

Ю.С.Салин

**СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ
КОРРЕЛЯЦИЯ**

Ю. С. Салин

СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ

Под редакцией акад. Ю. А. Косыгина



МОСКВА «НЕ Д Р А» 1983

Салин Ю. С. Стратиграфическая корреляция. М., Недра, 1983, 157 с.

Стратиграфическая корреляция рассматривается как операция, лежащая в основе всей геологии. В рамках топологической модели Вернера определяются стратиграфические и геохронологические понятия (одновременность, шкала, стратиграфическое подразделение, фации, несогласия и т. д.), разрабатываются алгоритмы решения практических задач корреляции. Применение алгоритмов иллюстрировано примером сопоставления на ЭВМ неогеновых разрезов Восточной Камчатки. Построение геологической карты по данным стратиграфической схемы представлено как цепь усложнений и пополнений модели Вернера. Дается обзор существующих математических методов стратиграфической корреляции.

Для стратиграфов, тектонистов, геологов-съемщиков и поисковиков; будет полезна студентам и преподавателям геологических специальностей вузов.

Табл. 3, ил. 28, список лит. — 49 назв.

Рецензент — д-р геол.-минер. наук С. В. Мейен (ГИН АН СССР)

Не исключено, что читатель, составляющий первое представление о книге по ее названию, пожмет плечами: «Зачем писать целую монографию по такому незначительному вопросу?» И ошибется. Хотя в привычной табели о рангах проблема выявления закономерностей в размещении кратеров на Марсе стоит намного выше стратиграфической корреляции, их истинная научная важность находится в прямо противоположных соотношениях.

Если наука, как сказал Уиллард Гиббс, — это язык, то стратиграфию можно считать азбукой геологии. В самом деле, исходный фактический материал геологи получают в виде разрозненного набора точек наблюдения, разрезов, профилей, а оперируют во всех своих построениях непрерывными телами — свитами, блоками, складками и т. д. Необходимым звеном в построении непрерывного, полноопределенного пространства по данным фрагментарного, неполноопределенного является стратиграфическая корреляция — основная, конечная задача стратиграфии. Поэтому стратиграфические корреляционные понятия входят неотъемлемым элементом в любые геологические описания, реконструкции, выводы, теории (если эти теории действительно геологические). Не осознавать этого — значит уподобляться мольеровскому Журдэну, не подозревавшему, что он говорит прозой.

Предлагаемая книга интересна прежде всего широтой охвата проблемы — от философии до решения практических задач на ЭВМ и от построения геохронологических шкал до проведения геологических границ в метрическом пространстве.

Первый аспект особенно важен. В начале 60-х годов (когда я работал еще в Новосибирске) были сформулированы и стали широко применяться в геологии требования к методологическому обоснованию и строгости теоретических построений. Кроме конструктивных продолжений, они породили волну философствования и теоретизирования, в которой растворилось, потерялось все то немного, что заслуживало внимания. Результатом явилось недоверие и вызванная им изоляция разных уровней научного исследования.

В геологических науках никто не строит свою теорию по чужой методологии. Исследователь, разрабатывающий методику, не основывается на чужой теории. Практик, привыкший к традиционной методике, с сомнением воспринимает новые, непробированные приемы, даже если старые полностью исчерпали себя. Поэтому, если ты разработал методологические критерии и рекомендации для теоретика, ты должен сам ими воспользоваться и с их помощью построить теорию, если не хочешь, чтобы твои предложения остались пустым звуком. Если ты — автор строгой, эффективной

теории, сам воплощай ее в методы, алгоритмы, если тебя не устраивает судьба оказаться посмертно переоткрытым через 200 лет. И наконец, разработал метод — сам примени его, чтобы не смотрели на тебя как на рекламного агента, стремящегося во что бы то ни стало сбыть товар.

Только такие сквозные разработки способны поломать барьеры недоверия. К их числу и относится предлагаемая читателю монография. Возможно, она является первой из их числа и не только в геологии. По крайней мере, прецеденты мне неизвестны.

Что касается методов и их практических приложений, престижные соображения здесь обычно не возникают. Философско-методологические исследования обычно таковыми и признаются, хотя и с некоторым оттенком пренебрежения. А вот к статусу теории геолог подходит ревниво, даже болезненно. Только «высшие» эволюционные, генетические построения удостоиваются титула теоретических. Статические, структурные результаты расценивают в лучшем случае как сырье для настоящей науки, низводят их до уровня техники дела. Если же к понятию «теория» подойти как к математически однозначной и практически эффективной совокупности высказываний, позволяющей из исходных истинных данных получать истинные результаты, то и построения автора подпадают под этот ранжир. Просто это геометрическая теория слоистого строения Земли.

Кроме стратиграфии, в книге рассматриваются другие отрасли геологии — тектоника, структурная геология и геологическое картирование, которые занимаются изучением слоистой структуры. В единую теоретическую систему объединяются дифференциальные, проективные (модель Хейтса), аффинные и метрические (сплайновая модель) модели слоистых толщ. Это теоретическое единство снимает с повестки дня такую сложную техническую проблему, как совместимость разных алгоритмов, результатов решения предыдущих задач и исходных данных для последующих.

Многим геологам строго определяемые понятия могут показаться абстрактными, даже схоластическими. Оживляет, конкретизирует, делает их ясными для всех введение геологического полигона, на примере которого каждое нововведение получает наглядную и привычную интерпретацию.

Большое будущее, особенно для поисков нефти в акваториях, имеют предложенные математические методы корреляции, цифровое кодирование послойных описаний разрезов, введение понятия непересекающихся границ, другие интересные идеи.

Короче говоря, если вы еще не решили, стоит ли читать книгу, которую сейчас держите в руках, советую: прочитайте. Не пожалейте!

Академик Ю. А. Косыгин.

Вряд ли найдется в геологии более изученный объект, чем слоистые толщи. Однако закономерности их внутреннего строения остаются до сего времени почти неизвестными или, лучше сказать, несформулированными. В геологических построениях используется лишь закон параллельности кровли и подошвы слоя. Других формулировок, на которых можно было бы основать методы решения важнейших геологических задач, в литературе найти не удастся.

Такое положение не случайно. Оно имеет три основные причины. Первая — историческая. По А. Иовскому, проводившему периодизацию истории геологии, «первая эпоха заключает в себе самые произвольные предположения» [14, с. IX]. Трудно ожидать, чтобы в этот донаучный период были достигнуты какие-либо успехи в изучении структуры слоистых толщ. «Вторая эпоха начинается с Вернера, который первый геогеническим мечтам противопоставил строгое наблюдение и точные исследования. Ему мы обязаны определением слоев Земли, хорошей терминологией и строгим очертанием главных периодов, в которые образовались различные оскальности» [14, с. IX]. За эту кратковременную эпоху была построена теоретическая модель слоистого строения Земли, без изменений дошедшая до нашего времени и служащая уже около 200 лет структурной основой стратиграфии, геологического картирования и, в конечном итоге, геологии в целом. Были впервые определены многие отношения в слоистых толщах, дана их классификация, разработаны процедуры применения при изучении земной коры [24].

Однако в наступившей вслед за тем и продолжающейся до сих пор третьей, лайелевской эпохе теоретические построения А. Г. Вернера были признаны наивными, поспешными и даже вредными [10, 18]. Интерес к изучению структуры сменился безраздельным господством историко-генетических построений. Вряд ли можно ожидать открытия каких-либо структурных закономерностей при отношении к любым негенетическим исследованиям как к чему-то второсортному, в лучшем случае как к подготовке исходного материала для настоящей науки.

Вторая причина заключается в неудачном выборе геометрии для пространственных построений. В настоящее время общепринята следующая классификация геометрических методов и средств.

Метрическая геометрия изучает пространственные характеристики, остающиеся неизменными при любых поворотах и параллельных переносах фигуры. Метрические свойства — длины, углы, площади, объемы; отношения — перпендикулярности, осевой и плоскостной симметрии.

Аффинная геометрия изучает пространственные характеристики, остающиеся неизменными при любых проектированиях пучком параллельных линий. Аффинные свойства — форма тела; отношения — параллельности, центральной симметрии, пропорциональности отрезков одной и той же прямой, подобия.

Проективная геометрия изучает пространственные характеристики, остающиеся неизменными при любых проектированиях пучком сходящихся или расходящихся линий. Проективные свойства — порядок линии (линия первого порядка — прямая; среди кривых различаются квадратные, кубические и т. д.), выпуклость, вогнутость фигуры.

Дифференциальная геометрия изучает пространственные характеристики, остающиеся неизменными при любых гладких преобразованиях, т. е. таких преобразованиях, которые переводят все непрерывно дифференцируемые кривые или поверхности в кривые и поверхности, также непрерывно дифференцируемые. Дифференциальные свойства — гладкость, кривизна; отношения — характер сочленения кривых или поверхностей — гладкий или угловатый, эквидистантность.

Топология изучает пространственные характеристики, остающиеся неизменными при любых непрерывных преобразованиях, т. е. таких преобразованиях фигуры, которые сохраняют бесконечно близкие точки бесконечно близкими, а удаленные на конечные расстояния — удаленными на конечные расстояния. Иными словами, топологические характеристики фигуры не изменятся, как бы мы ее ни мяли, скручивали, изгибали, сжимали, вытягивали. Нельзя только рвать ее и склеивать (вводить в соприкосновение) несоприкасающиеся точки. Топологические свойства — непрерывность, наличие дыр и пустот; отношения — пересечения, соседства, включения, последовательности.

Ясно, что топологические характеристики — наиболее глубокие, фундаментальные, устойчивые при самых сильных деформациях. Соответственно наиболее фундаментальными должны быть и модели, построенные на этих характеристиках. Однако абсолютное большинство приемов геометризации геологических построений связано с углами, размерами, формой, пропорциями фигуры, т. е. с понятиями метрической и аффинной геометрии.

Это тем более странно, что важнейшие пространственные закономерности слоистых толщ, лежащие в основе стратиграфических и структурно-геологических методов, позволяют производить корреляцию, прослеживание и картирование как горизонтальных, так и наклонных или смятых в складки геологических тел. Другими словами, закономерности, позволяющие производить корреляцию в слоистых толщах, не разрушаются пликативными дислокациями, они инвариантны относительно таких деформаций. Геометрические характеристики, остающиеся неизменными при таких преобразованиях, как раз и изучает топология.

И с геологической, и с геометрической точки зрения правильнее будет сначала построить основной топологический каркас сло-

стой структуры, а затем пополнять его последовательно дифференциальными, проективными, аффинными и, в последнюю очередь, метрическими характеристиками.

Третья 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 — сначала строят простейшую модель, затем ее постепенно усложняют. При этом исходная модель должна представлять скорее карикатуру на объект, чем его всестороннее отображение. Вряд ли иначе, чем к карикатуре на действительность, можно отнести к шестиугольной модели сферы влияния или рынка сбыта, принятой в экономической географии. Более неожиданным выглядит другой вывод — любой идеальный кристалл в систематике Е. С. Федорова не соответствует никакому природному объекту. Все реальные кристаллы приходится считать в той или иной степени деформированными.

Построим сначала простейшую модель слоистой структуры, учитывающую только самые фундаментальные топологические свойства стратифицированных объектов — непрерывности и порядка, затем будем усложнять ее, сначала путем введения других топологических, затем дифференциальных, проективных, аффинных и метрических характеристик. При этом будем стремиться к построению многообразной привычной конструкции, содержащей все черты, необходимые для решения задач стратиграфии, картирования, поиска полезных ископаемых.

Методология и логика науки предъявляют многочисленные требования к теоретическим конструкциям — выводимость из наблюдений, однозначность, непротиворечивость, простота построения, отсутствие логических кругов в последовательности вывода, возможность пополнения новыми характеристиками, совместимость с другими моделями, т. е. возможность объединения с ними в рамках общей теории. Будем строить модели, соответствующие всем этим неэмпирическим критериям оценки. Окончательным остается критерий практической полезности. Чтобы убедиться в эффективности теории, необходимо выяснить — а что она умеет делать?

Последовательность построения теоретических объектов, логического вывода понятий реализована в виде алгоритмов, пригодных для ручной и машинной обработки реальных фактических материалов. Примеры решения конкретных практических задач на ЭВМ приводятся в книге как иллюстрация применяемых понятий и операций и как показатель практической эффективности теоретических конструкций.

ОСНОВНАЯ МОДЕЛЬ ГЕОЛОГИИ

Своим современным состоянием геология во многом обязана Ч. Лайелю. Большинство геологов, по-видимому, согласятся с таким определением: «Геология есть наука, рассматривающая постепенные изменения, происходившие в органическом и неорганическом царствах природы; она разбирает причины этих изменений и то влияние, которое они производили на преобразование поверхности и внешнего строения нашей планеты. При помощи таких исследований состояния Земли и ее обитателей в первобытные периоды мы приобретаем более точное познание о ее теперешнем состоянии и более верный взгляд на законы, ныне управляющие ее одушевленными и неодушевленными произведениями» [18, с. 1].

Конечно, наш современник может возразить: во-первых, изменения не только постепенные, во-вторых, преобразования не только поверхности и внешнего строения. В основном же общая или теоретическая геология за предыдущие полтора столетия развивала и совершенствовалась два главных положения, отраженные в лайелевском определении: 1) геология есть исследование изменений (история) и выявление их причин, 2) при помощи таких исследований устанавливаются закономерности строения Земли. Нетрудно убедиться, что в полном соответствии с этими требованиями строились и строятся теории органического и неорганического происхождения нефти, тектоника плит и противостоящие ей фиксистские теории, эволюционная палеонтология, теория метаморфизма и многие другие отрасли геологии.

Что же касается влияния на геологию А. Г. Вернера, Ч. Лайель оценил его так: «Гениальность этого человека вполне заслуживала того удивления и тех чувств признательности и дружбы, которые питали к нему все ученики его; но чрезмерное влияние, оказанное им на мнения современников, повредило впоследствии успехам науки. Вред был так велик, что значительно превысил пользу, доставленную его трудами» [18, с. 52]. В чем же заключался этот вред? «Главная заслуга вернеровской системы преподавания заключалась в неуклонном направлении внимания своих слушателей на постоянные отношения наслоенности в известных минеральных группах...» [18, с. 53], но «в настоящее время видно, что саксонский профессор ложно толковал многие из самых важных явлений даже в непосредственном соседстве с Фрейбергом» [18, с. 52—53]. Порфир, который А. Г. Вернер считал первичным, на самом деле проходит в виде жил через пласты каменноугольной формации. Гранит Гарцских гор, принятый за ядро этой цепи, прорывает

более молодые залежи и к тому же содержит обломки граувакковых сланцев с органическими остатками.

Итак, вред заключался в ложности вернеровских толкований слоистого строения земного шара, толкований, распространяемых А. Г. Вернером на весь мир, но опровергаемых наблюдениями уже в пределах одного дня ходьбы от Фрейберга. Но может быть, дело не в этом? Нет, как будто все правильно. «Первые исследователи были так поражены громадным горизонтальным протяжением однородных пород, что слишком поспешно составили мнение, будто весь земной шар окружен рядами различных формаций, расположенных вокруг ядра планеты, подобно концентрическим слоям луковицы» [19, с. 126—127]. Первыми исследователями были, конечно, А. Г. Вернер и его ученики.

И все-таки этот вывод выглядит поначалу сомнительным. Много ли вреда может принести поспешно составленное мнение? Стоит ли оно такого критического внимания? Как ни странно, оказалось, что стоит. Известный философ Г. Спенсер излагает «гипотезу Вернера» в стиле иронического пересказа: «По всему пространству земного шара те же непрерывные слои лежат один на другом в правильном порядке наподобие лепестков луковицы» [35, с. 292]. Далее он рассматривает гипотезу и с позиции теоретической невозможности формирования таких «луковичных лепестков», и с позиции несоответствия ее действительности.

Непонятно, как из хаотического всеобщего раствора, покрывающего всю землю, могли один за другим образоваться разные по составу пласты, заключающие к тому же остатки животных и растений, неспособные существовать в предполагаемых условиях всеобщего раствора. Одни и те же литологические признаки фиксированы в разных по возрасту формациях. Сланцевые изломы, например, встречены в древнейших и в каменноугольных формациях. С другой стороны, один и тот же по положению пласт не сохраняет при прослеживании свои литологические свойства. Лландоверийская формация описывается в разных местностях то как «песчаник или конгломерат», то как «нечистый известняк», то как «кремнистый песчаник».

В хоре критиков начинают звучать голоса и наших соотечественников. Д. И. Соколов в тех же выражениях, что и Ч. Лайель, пересказывает содержание «гипотезы Вернера».

Сомнения постепенно переходят в уверенность: в этой «поспешной» конструкции «луковичных лепестков» что-то есть! Н. А. Головкинский подтверждает это: «Послойно параллелизуя формации одной страны с формациями другой, мы обыкновенно не объясняем оснований, на которых держится наш метод, как будто он прост и непогрешим как аксиома. А всмотришься ближе, и возникает подозрение, что это не аксиома, а остаток полупоэтических, полуневежественных старых воззрений, по которым наружная часть земного шара состояла из непрерывных, концентрических, всюду одинаковых слоев» [10, с. 407]. Ситуация проясняется: вернеровская конструкция «луковичных лепестков» положена в основу ме-

тодов стратиграфической корреляции! Столь же однозначный вывод делает и Г. Спенсер: хотя в явном виде каждый геолог считает своим долгом высказаться против «поспешных» мнений, все действия, которые он предпринимает при корреляции, основаны на «тайном веровании» в гипотезу Вернера.

Теория и ее объект

Любая естественнонаучная теория основана на законах, выводимых из эмпирии. В то же время непосредственно наблюдаемые данные обычно не позволяют сформулировать какой-либо закон. Достаточно очевидно, что закон инерции Галилея или Ньютона не выводится из наблюдений. Скорее наоборот, наблюдения приводят к основному закону Аристотеля — любое тело стремится к состоянию покоя. Прилагая постоянную силу, равномерно движется по дороге лошадь с телегой. Любое тело, предоставленное самому себе, в конце концов останавливается. Общеизвестно, что современные данные о движении планет не дают возможности вывести кеплеровские законы небесной механики. И законы Кеплера, и законы механики Галилея — Ньютона можно вывести из эмпирии только с использованием некоторой модели. Действительность, взятая «в чистом виде», обычно настолько сложна, хаотична и незакономерна, что для построения теории ее приходится подвергать упрощению, схематизации, идеализации.

По мнению Э. Кассирера и К. Пирсона, ни одна естественнонаучная теория не относится непосредственно к самим фактам действительности, а только к идеальным пределам, которые мы мысленно ставим на их место, заменяя таким образом непосредственные данные гипотетически придуманными моделями.

В качестве примера приведем такой объект, как точка в геометрии Евклида, — «то, что не имеет частей». Можно представить себе процедуру идеализации: последовательное уменьшение размеров реальных пространственных объектов до такого предела, меньше которого уже ничего быть не может. Такой объект не может делиться на части — часть ведь должна быть меньше целого.

Наиболее отчетливо устанавливается процесс идеализации в «мысленном эксперименте» Галилея. Из наблюдений можно вывести: чем более гладкими будут шар и наклонная плоскость, тем с более устойчивым ускорением шар будет катиться вниз по плоскости. Кроме того, при движении в разных средах (масло, вода, воздух) помехи движению одного и того же шара будут различными. Можно экстраполировать эту тенденцию до предельно мыслимого конца: представить себе идеально гладкий шар, движущийся по идеально гладкой плоскости в совершенно не сопротивляющейся среде. Это и будет теоретический объект модели, именно с ним и проводил Галилей свой мысленный эксперимент: движение шара вниз по плоскости будет ускоряться, движение вверх по плоскости — замедляться, тогда естественным оказывается вывод, что

при горизонтальном положении не будет ни замедления, ни ускорения, т. е. движение останется равномерным.

Хотя в действительности тела не подчиняются закону инерции, это не мешает нам признавать его не имеющим исключений: любую реальную ситуацию мы раскладываем на две части — движение в соответствии с законом и отклонения от него. Для отклонений далее находятся объяснения — трение, сопротивление среды и т. д. Аналогично и в небесной механике: когда на основе кеплеровской кинематики и допущения о притяжении планет Солнцем Ньютон сформулировал закон всемирного тяготения, отклонения от кеплеровских орбит могли рассматриваться как опровержения закона. Такие отклонения были впоследствии найдены, для «спасения» закона были выдвинуты гипотезы о возмущающем воздействии других масс. Некоторые возмущающие массы были найдены, другие — нет. Отклонение орбиты Меркурия оставалось необъясненным вплоть до построения общей теории относительности, но это, естественно, не привело к отказу от закона всемирного тяготения. Модель, в которой он оставался всегда справедливым, по-прежнему использовалась и по-прежнему приносила многочисленные практические результаты.

Многие геологи, совершенно справедливо указывающие, что все реальные слои где-то заканчиваются, конечно же правы. Но это — правда добросовестного наблюдателя Протагора, утверждавшего, что окружность касается прямой не в одной точке. Процедура же конструирования А. Г. Вернером теоретических геологических объектов выглядит безукоризненной. Ведь от наблюдения реального «громadного горизонтального протяжения однородных пород» до идеализации — протяжения через весь земной шар — всего один шаг, напрашивающийся сам собой. Если и есть в науке другие примеры столь же блестящей идеализации, то они связаны с именами таких гигантов, как Евклид, Галилей, Ньютон.

«Луковичный лепесток» модели Вернера — теоретический объект, заданный процедурой построения

Можно было бы подумать, что объект вернеровской модели получен в результате простейшей экстраполяции — увидел Вернер в обнажении слои, протягивающийся далеко-далеко, и представил, что он тянется еще дальше, вокруг света. Но «луковичный лепесток» — не образ, а теоретическая конструкция, он строится, хотя и очень просто. Просто, как все фундаментальное.

Задолго до Вернера был известен закон Стено, позволяющий устанавливать возрастную последовательность слоев одного и того же разреза: выше — значит моложе. Но этот закон ничего не говорил об одновозрастности слоев разных разрезов. Вернер предложил устанавливать одновозрастность по сходству литологических признаков. Если в любом из разрезов каждый тип горной породы (известняк, песчаник, аргиллит и т. д.) встречен в последовательности слоев лишь раз и если последовательности смены литологичес-

ких признаков в разных разрезах совпадают, таким определением одновозрастности можно пользоваться (рис. 1). Неоднозначности, противоречий с законом Стено не возникает. Последний шаг в построении — утверждение, что одновозрастные (и литологически неизменные) слои, встреченные в некоторых исследованных разрезах, присутствуют и во всех остальных местах, полностью опоясывая земной шар.

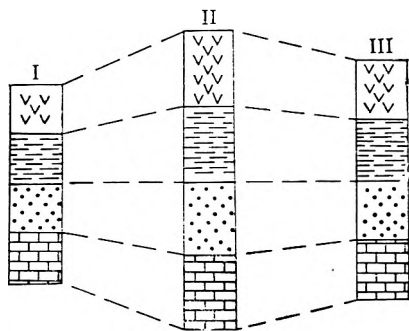


Рис. 1. Однозначное непротиворечивое определение одновозрастности по сходству литологических признаков.

Здесь и далее римскими цифрами обозначены номера разрезов

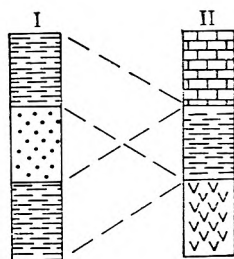


Рис. 2. Невозможность однозначного непротиворечивого определения одновозрастности по сходству литологических признаков

Однако впоследствии была установлена повторяемость одних и тех же пород в некоторых разрезах. Например, в разрезе I наблюдалась последовательность: самый нижний изученный слой сложен аргиллитом, далее вверх он сменяется песчаным и снова аргиллитовыми слоями. В разрезе II лишь один аргиллитовый слой (рис. 2). По определению Вернера, оба слоя из разреза I эквивалентны ему по возрасту и, следовательно, одновозрастны между собой, но закон Стено заставляет сделать вывод об их разновозрастности — ведь один из них выше, а значит моложе другого. Попытаемся устранить противоречие: только один из них эквивалентен по возрасту аргиллитовому слою из разреза II, но какой? Возникает неоднозначность выбора. Первое ниспровержение Вернера последовало безоговорочно.

Тем не менее теоретическая конструкция осталась. Просто было признано, что литологические признаки — это «плохие» признаки, и вопрос был поставлен так: где найти новый фактический материал, который можно подогнать под старую модель? Материал был найден, им оказались окаменелые остатки древних организмов. Это открытие сделал английский инженер В. Смит.

Замена литологических признаков палеонтологическими устранила все противоречия и неоднозначности. Окаменелости разных видов сменялись в каждом из разрезов без повторений, последовательности смены в разных местах были одинаковыми. Вернеров-

ское требование — каждый слой тянется через весь земной шар — было фактически заменено эквивалентным по смыслу утверждением: слой не заканчивается в пределах любого изучаемого участка, тянется от одной его границы до другой.

Повторяемость литологически одинаковых слоев не мешала их прослеживанию: некоторый песчаный слой разреза А объединялся в единое непрерывное тело с тем из сотни песчаных слоев разреза Б, которому он был эквивалентен по возрасту, что устанавливалось по сходству окаменелых остатков древних организмов. Последовательность смены окаменелостей оказалась прекрасным рабочим инструментом. Она позволяла наносить слои на карту, устанавливать их конфигурацию, размеры, после чего можно было уже оценивать запасы полезных ископаемых, задавать направление поисков, восстанавливать геологическую историю. Мощный импульс получило геологическое картирование, превратившееся в специальную, детально разработанную отрасль геологии. Кроме карт отдельных рудников, шахт, разведочных площадей, в начале XIX в. появляются карты Средней Англии, окрестностей Петербурга, обширных областей Франции и др. Слои, те же самые, что и в Англии, были выделены в Уэльсе, Шотландии, Бельгии, на Урале, в Андах. Появляются первые выводы о геологическом строении крупных регионов и целых континентов.

Последовательность палеонтологических признаков получила собственное название — геохронологическая или возрастная шкала, или, как переводил на русский язык немецкий термин *Altersscala* (возрастная шкала) Алексей Таскин, переводчик трудов Бернгарда фон Котты, — лестница древности. Для каждого слоя любой изученной местности прежде всего выяснялось его место на какой-то из ступенек этой лестницы. Без этого уже не мыслилось ни прослеживание слоев, ни их сравнение, ни какое-либо иное геологическое исследование.

Вся последовательность была поделена на интервалы, получившие названия — силур, пермь, юра и т. д. Большие части были в свою очередь поделены на более мелкие, последние — на еще более мелкие. Любой отрезок шкалы стали называть геохронологическим подразделением, а весь комплекс слоев, расположенных на данной ступеньке лестницы древности, принадлежащий к данному геохронологическому подразделению, — стратиграфическим подразделением.

Бурный прогресс в геологическом изучении обширных территорий принес и много неприятных открытий. Как констатировал Г. Спенсер, по мере того, как геология продвигалась вперед, не раз оказывалось, что тот или иной вид, который долгое время признавался руководящим для какого-либо стратиграфического подразделения, внезапно обнаруживали и в других подразделениях. Зачастую делались и другие открытия: если в одном разрезе окаменелость А в вышележащих слоях сменялась окаменелостью В, то в другом разрезе обе они обнаруживались в одном и том же слое или сменяли друг друга в обратном порядке. Открытие, в свое

время оказавшееся достаточным для ниспровержения Вернера, не привело к ниспровержению Смита. Почему?

Очевидно, геохронологическая шкала стала настолько необходимым инструментом, что без нее оказалось уже невозможным дальнейшее продвижение вперед. Снова был поставлен вопрос: если использование всего исходного материала не гарантирует однозначности и непротиворечивости построений, то как отобрать ту часть, которая приведет к удовлетворительному результату?

Стратиграфические подразделения — «луковичные лепестки» — и геохронологическая шкала используются и поныне. Это означает, что поставленная задача была как-то решена.

Модель и действительность

Открытому признанию модели Вернера препятствовала исчезающе малая сфера применимости этой модели самой по себе. Действительно, попробуем представить ее наглядно.

Между двумя любыми мыслимыми разрезами тянутся непрерывные слои, причем в одинаковом порядке по отношению друг к другу. Слои при этом могут как угодно изгибаться (но не до вертикали, иначе изменится их порядок), могут раздуваться и сокращаться в мощности (но не до нуля, иначе они перестанут быть непрерывными).

В этой модели не находят себе места ни разломы, нарушающие непрерывность слоев, ни опрокинутые залегания, ни линзы и выклинивания, ни фациальные замещения, ни прерывания слоев проливами, речными долинами, другими отрицательными формами земной поверхности, ни размывы и несогласия. Иначе говоря, чтобы модель работала, необходимы идеальные условия, этого на самом деле не бывает, следовательно, модель неприложима к действительности, — заключает геолог. И зря. Условий, в которых соблюдается закон инерции, тоже не бывает в действительности — никому еще не удавалось изготовить идеально гладкие шары и идеально гладкие плоскости и поместить их к тому же в абсолютно несопротивляющуюся среду, и все-таки закон инерции считается приложимым к действительности.

Начнем с того, что требуемые идеальные условия в геологии встречаются — есть такие участки в платформенных областях, где и пласты тянутся без выклиниваний, и разломов нет, и опрокинутых залеганий тоже. Однако, это утешение очень слабое. Какую-то сферу применимости модели найти при этом можно, но она будет так мала по сравнению с безбрежным океаном геологической действительности! Но разве так должен ставиться вопрос? Конечно, нет, а поставили его именно так.

Автора «луковичной модели» обвинили в том, что он не заметил (проигнорировал, не сумел предвидеть и т. д.) разломов, размывов, других явлений многогранной геологической действительности, в том, что его модель слишком проста, наивна, поспешна, что она опровергается даже в горах поблизости от кафедры

А. Г. Вернера, докуда саксонский профессор, небольшой любитель путешествовать, по-видимому, так и не добрался.

Но с тем же успехом можно обвинять Галилея и Ньютона, не заметивших (проигнорировавших, не сумевших предвидеть и т. д.) трения, тяготения, сопротивления среды, магнетизма, электричества и всех других многогранных черт физической действительности при формулировке закона инерции. Модель, описывающая поведение теоретических объектов, вовсе не предназначена для того, чтобы отражать все черты реальной действительности. Она и обязана быть простейшей (если угодно — наивной, примитивной). От нее требуется лишь, чтобы она позволяла охватывать все многообразие при своих дальнейших усложнениях и дополнениях, для которых она должна играть роль надежного фундамента.

Да, порфир, названный А. Г. Вернером первичным, пересекает пласты каменноугольной формации, да, гранит Гарцских гор прорывает другие залежи, да, эти факты не укладываются в модель «луковичных лепестков» [18]. Все это так же справедливо, как и то, что замедление движения тела в сопротивляющейся среде не укладывается в галилеевско-ньютоновский закон инерции. Но закон инерции, пополненный понятием о сопротивлении среды, позволяет полностью описать движение любых реальных тел в любых реальных средах. Более того, лишь принятие закона инерции как исходного и позволяет ввести само понятие сопротивления. В динамике Аристотеля оно не имело никакого смысла. Только закон инерции позволяет определить понятие силы как всего того, что отклоняет движение тела от равномерного и прямолинейного.

Вернеровская теория строения Земли неотличима в этом смысле от галилеевско-ньютоновской механики. Любые отклонения поведения слоев от требований «луковичной модели» определяются как несогласия. Если замеченные Ч. Лайелем явления и не соответствовали исходной модели, то они вписывались в модель, пополненную понятием несогласий. Более того, так же как и силы в механике, несогласия в геологии могли быть введены только на основе исходной модели, как отклонения от нее. Ведь для определения отклонения, аномалии надо сначала определить понятие нормы, эталона: если отклонение — то от чего, если аномалия — по сравнению с чем?

И хотя роль вернеровской модели в геологии аналогична роли закона инерции в физике, судьба этих двух фундаментальных положений в истории науки оказалась резко неодинаковой. Если закон инерции был по достоинству оценен и использован при построении физики как современниками Галилея и Ньютона, так и нашими современниками, то модель Вернера была подвергнута жестокой и несправедливой критике, хотя (парадоксально!) в качестве основы геологии она использовалась всегда и противниками Вернера, и его сторонниками, и геологами, не подозревающими даже о ее существовании. С легкой руки Ч. Лайеля любое пополнение и усложнение «луковичной модели» преподносилось как ее опровержение. Когда же факты противоречили образу

«Вернера, недопонявшего очередное что-то такое», от них, так сказать, абстрагировались. Критики не упоминают, что одно из первых определений несогласий и их первая классификация (превосходящая, кстати, большинство современных) принадлежит именно А. Г. Вернеру, и так же, как и все его построения, «пленяет порядком, в ней находящимся и точностью, с каковою каждая мысль выражена» [31, первая нумерованная страница].

Наверное, ошибался и Вернер. Но ведь и Ньютон тоже ошибался. Был Вернер и нептунистом. Это такая же объективная истина, как и то, что Ньютон был богословом. Но основой всей геологии является геологическая карта, а настоящая геологическая карта — это карта, показывающая распределение в пространстве стратиграфических подразделений [20 и др.], а стратиграфические подразделения — это лепестки «луковичной модели».

Роль генезиса, истории, причинности в судьбе модели Вернера

Огромную роль в оценке, или вернее, в недооценке «луковичной модели» сыграли чисто философские мотивы. Вернеровские построения оказались не соответствующими основным требованиям, предъявляемым в геологии к теоретическим конструкциям: генезис, история, причинность. Эти требования, обязанные своим происхождением трудам Ч. Лайеля, сохранились в чистоте и неприкосновенности до нашего времени. Геология для многих геологов, по крайней мере от А. А. Иностранцева до Г. П. Леонова — это история Земли. «Обосновать несостоятельность разного рода агенетических проектов совершенствования геологической науки» стремятся Р. А. Жуков и его единомышленники [22, с. 64]. На мой вопрос на Всесоюзном семинаре «Экосистемы в стратиграфии» в октябре 1978 г. во Владивостоке: «Считаете ли вы, что права называться теоретическими заслуживают только причинные построения?» В. А. Красилов (автор нескольких книг по общей и региональной стратиграфии) ответил безоговорочным: «Да». Подобное отношение глубоко укоренилось в сознании геологов. Нельзя сказать, что геолог усваивает такой образ своей науки с первого курса института, — устойчивые представления о ней формируются уже в школе на уроках географии и природоведения.

Теории, действительно, могут быть генетическими, исторически, причинными. Но не обязательно. Ни одному из этих требований не отвечает геометрия — наука, долгое время служащая эталоном совершенства теоретических построений. Кристаллография, которая была типичной геологической дисциплиной — описательной, генетической, исторической и причинной, после разработки математически строгой систематики кристаллов перешла в разряд точных наук. Успех Е. С. Федорову обеспечил лишь сознательный отказ от всяких генетических объяснений, так как «...в общем виде задача построения математической теории форм кристаллов в связи с условиями образования, вероятно, настолько сложна, что

для ее решения потребуется добрый десяток ученых масштаба Гаюи и Федорова» [21, с. 51].

Не находит себе места причинность в механике. «Можно думать, что подобно Гуку и Гюйгенсу, — пишет С. И. Вавилов [4, с. 53], — физики надолго застряли бы в гипотезах о «причинах тяготения», прежде чем придти к формальному закону Ньютона». Ньютон, стремившийся построить физику по образу и подобию геометрии, часто подчеркивал необязательность выяснения причин для изучения явления.

Может показаться, что вернеровские построения ничего не объясняют и потому не отвечают основному философскому требованию к науке всех времен: теория должна быть объясняющей. Но объяснения могут быть не только причинными, как думают, вероятно, почти все геологи. Согласно современной точке зрения, объяснить явление, объект — значит подвести его под закон, установить его закономерную связь с другим явлением, объектом. Объяснить закон — значит подвести его под теорию. Объяснить теорию — значит подвести ее под более общую теорию. Законы Кеплера объясняют движение планет, хотя ни слова не говорят о причинах. Закон всемирного тяготения Ньютона объясняет кеплеровские законы, а теория относительности Эйнштейна является объясняющей для ньютоновской механики, несколько не удовлетворяя нашу любознательность относительно причин.

Более правильное, чем в современной геологии, отношение к генезису и прочинности существовало в долайелевской геологии.

«Признаки от местоположения и вероятного (выделено В. Севергиным — Ю. С.) происхождения взятые, весьма ненадежны... Ничто так не зыблемо, как вероятие; а какое же наше здание, которое утверждено на зыблющемся основании?» [32, с. 2—3].

Как видим, вернеровские построения не должны отвергаться из-за их несоответствия предъявленным геологами философским требованиям (генезис, история, причинность), так как сами эти требования не обязательны, они не являются общенаучными.

Возможные альтернативы вернеровской модели земной коры

Попробуем представить, на чем еще можно построить геологию, если не на «луковичной модели». Не превратится ли единая геологическая наука в этом случае в конгломерат различных дисциплин?

В работах самого Ч. Лайеля общегеологических фундаментальных понятий и моделей найти не удастся. Исходные же посылки носят скорее философский, чем конструктивный характер. Это скорее указания, чем утверждения. Их невозможно взять за основу теории подобно аксиомам Евклида или законам Ньютона.

В современной теоретической геологии, построенной по Лайелю, — исторической, генетической, причинной — выбор моделей,

аксиоматических систем, строгих математических конструкций достаточно богат. Известны безупречно построенные седиментологические основы литологии. Тектоника также никогда не страдала от нехватки моделей, среди которых были и вполне строгие, объясняющие движения континентов, плит, блоков. В изучении метаморфических пород роль фундаментальной играет теория Д. С. Коржинского, основанная на физико-химических посылаках. Все эти теории богаты следствиями, имеют широкую сферу применения. Но может ли хоть одна из них претендовать на роль основы всей геологии?

Возьмем модели механической седиментации. Все они исследуют процессы осаждения частиц в вязкой среде под действием гравитации и движений самой среды. Нет ничего невозможного в построении на основе подобных представлений полной теории, объясняющей закономерности образования терригенных толщ, формирования и распределения в них месторождений полезных ископаемых. Но уже расширение сферы действия этой теории на хемогенные отложения будет представлять серьезные и неизвестно, преодолимые ли, трудности. Скорее всего, понадобится самостоятельная модель хемогенной седиментации, которая может быть перестроена в обширную теорию, существующую параллельно с теорией механической седиментации. И ни одна из этих теорий не способна будет охватить процессы и результаты биогенной седиментации и вулканизма. Придется создавать еще две разные теоретические системы. А говорить о построении какой-то общей, объединяющей конструкции даже в голову не приходит. Неизвестно даже, на каком языке строить эту всеобщую теорию — физики, химии или биологии. А ведь речь идет всего-навсего об объяснении формирования первичной структуры слоистых толщ. Объяснять образование складок, разломов, угловых несогласий надо будет с позиции еще одной (по крайней мере) теории, тектонической, очень далекой от первых четырех.

К тому же все перечисленные теоретические системы лишь объясняют механизмы и причины образования различных характеристик слоистых толщ. Они не предназначены для построения нужных объектов на основе разрозненных наблюдений, для формулировки и решения задач расчленения, корреляции разрезов, проведения границ скоррелированных слоев и стратиграфических подразделений, выделения несогласий, разломов и их прослеживания. Решать эти задачи геологу-практику придется самому, располагая лишь собственной интуицией и эмпирией.

Но и эти четыре-пять литологических и тектонических теорий еще не все. Свой вклад еще должны внести палеогеография, историческая геология, эволюционная палеонтология. Может ли быть окончательный продукт, полученный из столь разных исходных посылок, ясным, однозначным, непротиворечивым, хотя бы контролируемым? Может ли он отвечать требованию простоты? Синтетические конструкции — не фантазия. Единую теоретическую систему, в которую включено огромное количество объектов и яв-

лений — от глобальной тектоники до молекулярной генетики, пытаются строить В. А. Красилов [24].

Таковы закономерные результаты строгого следования указаниям Ч. Лайеля.

И наряду с этими официально признанными, престижными, доминирующими в теоретической геологии наших дней исследованиями на уровне «тайного верования» развивается и совершенствуется столько раз раскритикованная, осмеянная и похороненная теория Вернера! Не пора ли тайное сделать явным?

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Попробуем сформулировать процедуру построения «луковичной модели», отвечающую всем современным требованиям. Для этого потребуется уточнить все используемые понятия, представить в явном виде, без пропусков и логических кругов последовательность логического вывода. Постараемся свести к минимуму количество понятий в системе, число исходных посылок, отдельных шагов в логическом выводе. Будем стремиться к максимальной простоте построения.

Общая схема процедуры построения такова: части пространства внутри каждого «луковичного лепестка» — стратиграфического подразделения — связаны отношением одновозрастности, части разных лепестков — отношением разновозрастности. Разновозрастность в геологии обычно устанавливается на основании закона Стено: выше — значит моложе, а одновозрастность — на основании закона Смита, позволяющего истолковывать сходство по палеонтологическим признакам как возрастную эквивалентность. Но даже если сопоставляемые отложения и не содержат ни одной окаменелости, геолог все равно выделяет и прослеживает от разреза к разрезу одновозрастные слои, толщи, свиты. При этом он руководствуется литологическим сходством. Посылку, позволяющую по сходству литологических признаков устанавливать геологическую одновозрастность, связывают, естественно, с именем Вернера, называя ее предположением Вернера: формации, схожие между собой по составу, принадлежат к одной и той же эпохе (Г. Спенсер, 1866 г.) [35], или положением Вернера: литологически сходные отложения являются одновозрастными (Б. П. Жижченко, 1969 г.) [24]. Иногда та же посылка приводится без упоминания имени Вернера: отложения с одинаковым вещественным составом, встреченные в разных разрезах, являются одновозрастными (М. Е. Зубкович, 1968 г.) [24]. Существуют и обобщающие высказывания: сходное — синхронно (К. К. Марков, 1969 г.) [24], одинаковое — одновозрастно (К. В. Симаков, В. И. Оноприенко, 1974 г.) [24].

Итак, в качестве основных посылок аксиоматической системы, которую предстоит построить, примем законы Стено и Смита — Вернера. Однако попытка совместного использования законов Стено и Смита — Вернера даже в простейшей ситуации, как мы виде-

ли (см. рис. 2), приводит к противоречиям. Причем противоречия возникают не только с литологическими признаками. И палеонтологический признак может быть встречен в разрезе I дважды, а в разрезе II один раз, из чего следует тот же вывод: два слоя в разрезе I должны быть разновозрастными, так как один из них выше и, следовательно, согласно закону Стено, моложе другого, а по закону Смита они разновозрастны, так как порознь эквивалентны слою в разрезе II.

Обычно против вывода о противоречии выдвигается такой аргумент: «расхождение по возрасту между слоями в разрезе I невелико, в пределах зоны им можно пренебречь». Но говорить о степени расхождения можно только после введения метрики, количественной меры сравнения. Введение метрики — вещь вообще очень сложная, связанная с принятием дополнительных исходных посылок, резко усложняющих аксиоматическую систему.

Попытки введения метрики в шкалу геологического времени (что позволило бы сделать ее именно линейкой, а не лестницей) многочисленны и связаны не только с явлениями радиоактивного распада, но и со скоростью осадконакопления, эволюции [24].

Во всех этих случаях приходится принимать неочевидные посылки, приемлемые скорее в качестве окончательного вывода, чем исходных положений, например: виды изменяются с одинаковой быстротой в разные времена (И. Д. Лукашевич, 1911 г.) [24]; реки всегда приносили в океан такое количество растворенного вещества, как в настоящее время (И. Вальтер, 1911 г.) [24]; в течение радиоактивного процесса не происходит привноса материнских и дочерних элементов и их потерь; на стадии своего образования порода или минерал не содержит конечного дочернего изотопа («Ядерная геология», 1956 г.) [24]. Для того чтобы быть уверенным в отсутствии привноса и выноса материнских изотопов, надо, ни много ни мало, знать .. всю геологическую историю анализируемого минерала или породы [28]. Кроме того, при попытках введения метрики в шкалу геологического времени появляются многочисленные дополнительные противоречия. Так что устранение собственных противоречий приходится считать внутренним делом самой стратиграфии.

Действие законов Стено и Смита — Вернера ограничим такой системой признаков, в которой не возникает противоречий. Именно таков традиционный путь, которому мы и последуем.

Исходные понятия

По Г. П. Леонову [20], исходными понятиями своих построений А. Г. Вернер считал формацию и залегание. Под залеганием понималась последовательность, время и эпохи образования различных толщ горных пород, под формацией — совокупность горных пород близкого химического состава. Естественно, спустя 200 лет в эти понятия приходится вносить поправки. Современная стратиграфия строится не только на литологических данных, как это было у Вер-

нера. Кроме того, залегание в вернеровском понимании, являясь исходным для вывода многочисленных дальнейших понятий, само может быть выведено из первичных наблюдаемых данных.

Первичными, не выводимыми ни из каких других понятий данной системы прием понятия «разрез» (имеется в виду разрез — колонка, а не разрез — профиль) и «признак».

Разрез — вертикальная прямая, направленная снизу вверх. Подобное понимание разреза принято в геологии: «... твердую точку опоры дают лишь вертикальные разрезы» (Г. А. Траутшольд, 1877 г.) [24, с. 181]. Ближе всего отвечает такому представлению вертикальная буровая скважина. Введем допустимую степень отклонения от вертикали. Если реальный разрез имеет некоторый наклон, но при этом порядок следования слоев на нем по сравнению с вертикальным разрезом не меняется на обратный, отклонение будем считать допустимым (рис. 3). Понятно, что этому требованию отвечает даже такая направленная горизонтальная линия (например, разрез вдоль обрыва речного или морского берега), на которой порядок тел остается таким же, как и на вертикали, направленной снизу вверх.

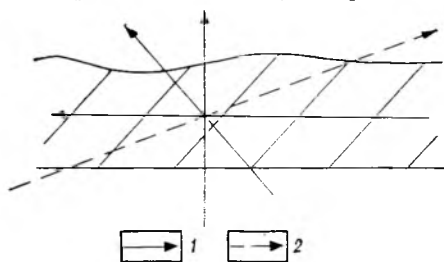


Рис. 3. Допустимые (1) и недопустимые (2) отклонения от линии отвеса

Признаком И. Н. Нюберг предложила считать все то, о чем можно сказать, присутствует ли оно в данном месте или нет. Не будем отдавать предпочтения никаким из признаков. Введем в обработку на равных правах литологические, палеонтологические, геохимические, геофизические и любые другие признаки. Не будем забывать урока — горные породы и окаменелости использовались для одних и тех же целей и обнаружили одни и те же недостатки.

Оба понятия — разрез и признак — прямо или опосредованно определяются какими-то операциями наблюдения или измерения.

Единственным исходным фактическим материалом пусть будут наблюдаемые данные о распределении в конкретных разрезах точек, обладающих изученными признаками.

Стратиграфические отношения

Введем понятие о стратиграфических отношениях сначала для точек, а потом для признаков.

Если две точки m и n находятся на одном и том же разрезе, то они имеют стратиграфические отношения. Если при этом m следует на разрезе за n , то отношение m к n — стратиграфическое отношение «выше», отношение n к m — стратиграфическое отношение «ниже». Точки, не расположенные на одном и том же разрезе, не имеют стратиграфических отношений.

Обозначим буквами A и B какие-либо признаки, например, A —

песчаник, В — двустворка *Mytilus littoralis*. Тогда буквами а и b будем обозначать точки, где фиксированы эти признаки: а — точка, горная порода в которой представлена песчаником, b — точка, в которой найдена двустворка *Mytilus littoralis*. Стратиграфические отношения между признаками определим через отношения между точками.

Если есть хотя бы один разрез, в котором точки а и b имеют стратиграфические отношения, то и признаки А и В имеют стратиграфические отношения. Если ни одного такого разреза нет, т. е. точки а и b встречены только в разных разрезах, то признаки А и В не имеют стратиграфических отношений.

Если во всех разрезах, где есть и точки а, и точки b, все а выше любой b, то признак А выше В, В ниже А. Назовем такие признаки стратифицирующими относительно друг друга [28—30].

Стратифицирующие признаки аналогичны отличительным видам Г. Бронна — животным, попадающимся только в одной формации, не переходящим в другую, выше- или нижележащую (Э. И. Эйхвальд, 1854 г.) [24]. Но для выявления стратифицирующих признаков не нужно предварительного выделения формаций, как того требует определение отличительных видов. Ближкое понятие — формы, по которым можно выделять зоны, Г. Харрингтона [28—30]: окаменелости вида А, которые никогда не были найдены ниже окаменелостей вида В.

Проводя здесь и далее параллели между предлагаемыми и имеющимися в литературе формулировками определений, необходимо оговориться: аналогии касаются лишь общей идеи. Не может быть и речи о заимствовании и использовании имеющихся формулировок. Все известные определения неконструктивны, они не содержат фиксированного перечня однозначных операций, необходимых и достаточных для построения определяемых объектов на основе исходных наблюдаемых данных.

Стратиграфические отношения «выше — ниже» между признаками, на первый взгляд, очень похожи на отношения строгого порядка — больше, лучше, сильнее, быстрее. Они обладают свойствами антирефлексивности: ни один признак не может быть поставлен в отношение «выше» с самим собой и асимметричности: если А выше В, то выражение «В выше А» всегда неверно. Но мы не можем приписать им свойство транзитивности — если А выше В, а В выше С, то А выше С. К сожалению в геологии очень часты такие ситуации.

В скв. 1 известняк стратиграфически выше песчаника, в скв. 2 песчаник выше глины. Если бы стратиграфическое отношение «выше» обладало свойством транзитивности, мы были бы обязаны сделать вывод — известняк выше глины. Но в скв. 3 отношения между ними обратные — известняк ниже глины. Чтобы не возникло логического противоречия, от введения свойства транзитивности приходится отказываться. И все-таки транзитивность — слишком полезное свойство, чтобы можно было так легко примириться с его

отсутствием. Ради его введения не жалко идти и на усложнения.

В последовательности признаков, отвечающей некоторым требованиям, транзитивность может быть введена непротиворечиво. Для этого необходимо определить следующие понятия.

Если хотя бы в одном из разрезов, где есть и точки *a*, и точки *b*, есть и *a* выше *b*, и *b* выше *a*, или если есть хотя бы одна пара точек, занимающих одно и то же положение (двустворка *Mytilus littoralis* в песчанике), то признаки *A* и *B* — нестратифицирующие относительно друг друга. Среди отношений между нестратифицирующими признаками можно было бы выделить привычные отношения совпадения, чередования, включения, пересечения, но для наших целей это не нужно, а так как привычного термина для обозначения «сборного» понятия, охватывающего все эти отношения, нет, приходится изобретать новый — «быть нестратифицирующим».

Стратифицирующие последовательности

Следующим этапом в логическом выводе будет определение понятия «стратифицирующая последовательность»: такая последовательность признаков, в которой каждый признак выше непосредственно предыдущего и не имеет иных стратиграфических отношений ни с одним из других предыдущих. Иными словами, с другими предыдущими ему запрещается иметь отношения «ниже» и «быть нестратифицирующим», разрешается быть выше или не иметь отношений. Возможно, определение покажется замысловатым, вычурным. Но зато в построенной таким образом стратифицирующей последовательности можно однозначно и непротиворечиво ввести транзитивные отношения возрастной последовательности и эквивалентности на основе законов Стено и Смита — Вернера. Для этого сформулируем следующую посылку: если имеется стратифицирующая последовательность *A, B, C, D, E, F*, то любую точку некоторого разреза, обладающую признаком *C*, можно считать одновозрастной любой другой точке любого разреза, обладающей тем же признаком *C*, более молодой, чем любая точка, обладающая признаками *A* и *B*, и более древней, чем любая точка, обладающая признаками *D, E, F*.

Та часть посылки, где говорится об одновозрастности всех точек с признаком *C*, является формулировкой закона Смита — Вернера. Другая часть, содержащая вывод о возрастной последовательности, близка к закону Стено: выше значит моложе. Отличий от закона Стено три. Во-первых, даже для точек одного и того же разреза отношение «моложе» выводится из отношения «выше» через отношение следования двух признаков в стратифицирующей последовательности. Во-вторых, и в одном разрезе «выше» значит «моложе» только для точек, обладающих разными признаками данной последовательности; для точек, обладающих одним и тем же признаком, «выше» не значит «моложе». В-третьих, отношение «моложе» выводится также для точек разных разрезов, не лежа-

щих «выше» одна другой. Достаточно нахождения в этих точках разных признаков последовательности.

Такие уточнения законов Стено и Смита — Вернера необходимы для устранения противоречий.

Близкий подход к установлению возрастных отношений находим у М. Неймайра: слои, отмеченные одними и теми же ископаемыми, входящими в правильную последовательность, принадлежат одному и тому же геологическому подразделению, или имеют «одинаковый возраст» [24].

Геохронологическая шкала

Хотя при установлении возрастных отношений с помощью любой стратифицирующей последовательности противоречий не возникает, результаты, полученные по одной из них, будут противоречить результатам по другой. Например, часто приходится говорить: данные слои по моллюскам сопоставляются с миоценовыми толщами, а по фораминиферам — с олигоценными. Необходимо выбрать среди всех последовательностей одну, наилучшую, и возрастные отношения, установленные с ее помощью, считать эталонными, истинными по определению, не подлежащими проверке никакими другими методами. Речь идет, следовательно, об определении, о выборе эталона геологических временных характеристик.

В современной геологии господствует точка зрения, согласно которой временные характеристики существуют независимо от нас, от наших целей и измерительных возможностей. Считается, что «поверхности истинной одновременности», «идеальные изохронные границы» могут пересекать границы, установленные на основании реальных геологических данных с помощью любых методов синхронизации. Но как же тогда могут быть выявлены такие поверхности, откуда вообще могло появиться мнение об их существовании? Признавать такие понятия — значит признавать ноумены, «вещи в себе» Иммануила Канта, хотя большинство обладателей подобных взглядов и считают себя диалектическими материалистами.

Более зрелые науки давно переболели этими болезнями. В физике с начала нашей эры, от Августина (IV в.) до Ньютона тоже допускалось, что любые реальные физические процессы могут лишь верно или неверно отражать время, существующее независимо от процессов, от чего-либо «внешнего». Но уже Лейбниц, современник Ньютона, пришел к выводу, что время — порядок событий, так же как пространство — порядок тел. Любой из способов установления, измерения времени на основании наблюдаемых данных может быть принят за определение времени, тогда истина по определению одновременность и разновременность, установленная этим эталонным способом, верным надо считать результат, полученный любым другим способом и совпадающий с результатом, истинным по определению. Неверен результат, не совпадающий с истинным. Появляется возможность оценить любые методы, выделить среди них

хорошие — в достаточном для нас большинстве случаев дающие верные результаты, и плохие.

Но сначала предстоит среди всех имеющихся методов выбрать один, эталонный, с которым и будут сравниваться все остальные.

В поисках аналогии снова обратимся к физике, накопившей наибольший опыт в определении временных понятий. Эталонная мера времени — час — в античную эпоху определялась как одна двенадцатая часть дня от восхода до захода Солнца. Так как любой час равен любому другому часу, то на одно и то же по длительности (в нашем понимании, при использовании современных эталонов времени) событие летом потребовалось бы больше часов (или их долей), зимой — меньше, и закон инерции пришлось бы формулировать так: если на тело не действует никакая сила, то весной оно движется ускоренно, осенью — замедленно. Простейший закон резко усложнился бы, и вряд ли бы он был открыт, если бы «час» античности не был заменен в качестве эталона средней солнечной секундой — точно замеренной частью периода вращения Земли вокруг своей оси. Любая данная секунда по определению принимается равной любой предыдущей и любой последующей секунде, хотя проверить это утверждение просто невозможно. Как говорил еще в IV в. Августин, никакую секунду нельзя поставить рядом и сравнить с прошлой и будущей секундой. Но если даже эталон метра мы можем перенести и поставить рядом с любым измеряемым предметом, все равно остается вопрос: а как выяснить, не изменилась ли длина самого эталона при переносе, изменении положения, ориентировки, внешних условий? Нельзя измерить всего. То, с помощью чего мы измеряем все остальное, мерить уже нечем.

Средняя солнечная секунда долго и хорошо послужила науке в качестве эталона времени, но затем точнейшие измерения привели к открытию, которое можно было сформулировать в двух вариантах. Или: если на тело не действует никакая сила, то оно движется... чуть ускоренно; или: вращение Земли замедляется и, следовательно, каждая следующая секунда чуть-чуть длиннее предыдущей. Сохранение эталона времени потребовало бы переформулировки закона инерции, перестройки всей физики, воздвигнутой на его фундаменте, привело бы к резкому усложнению любых физических построений и расчетов. Стоило ли сохранять меру времени? В конце концов, и эталон, и любая другая временная характеристика, и любое понятие вообще — лишь исследовательский инструмент. Как и всякий инструмент, он оценивается соотношением затраченных усилий и полученного результата. Для улучшения этого соотношения стоило пойти на изменение определения. В качестве лучшего эталона времени был принят период обращения Земли вокруг Солнца (звездный год), не требующий переформулировки закона инерции.

Проанализируем, при каких условиях реализуется оптимальное соотношение между затраченными усилиями и полученным результатом в геологии.

Наименьшие затраты достигаются при минимальных требованиях к исходному фактическому материалу и максимальной простоте вывода временных характеристик из наблюдаемых данных. Что касается материала, то наиболее экономно ограничиться тем, что поставляется при массовых геологических работах — съемке, поисках и разведке, т. е. литологическими, палеонтологическими, геохимическими и геофизическими данными. Значение радиохронологических данных, по мнению многих геологов, наиболее близких к «истинному» времени, как выразительно сказал Б. С. Соколов [34], могло бы сравниваться со значением палеонтологических только в том случае, если бы пригодные для определения возраста радиоактивные минералы встречались столь же часто, как окаменелости, а стоимость определения, например, радиогенного аргона не превышала бы стоимости определения *Dictionema flabelliforme*.

Прежде чем говорить о наилучших результатах, выясним, для решения каких задач предназначены геологические временные понятия, зачем их вообще выдумали. Геохронологические понятия используются при прослеживании слоев и слоистых толщ, для построения универсальной координатной системы, а также для восстановления истории формирования и эволюции земной коры.

Прослеживание слоев необходимо при картировании при разведке и разработке месторождений. Очевидно, что наилучшими для прослеживания будут такие временные характеристики, которые позволяют проследить на наибольшей территории наибольшее количество слоев, каждый из которых отграничен от других.

По мере накопления данных о распространении и поведении слоев разного возраста геологическое время все больше и больше стало играть роль главной оси универсальной координатной системы, позволяющей устанавливать закономерности пространственного размещения геологических объектов, в том числе залежей полезных ископаемых. Конечно, наиболее полезной следует признать координатную систему, обеспечивающую «наибольшую разрешающую способность» — выделение наименьших возрастных интервалов и их прослеживание на наибольших пространствах.

И для восстановления истории и эволюции земной коры наилучшим будет такой способ построения временных характеристик, который позволит разделить как разновременные наибольшее количество событий, происходящих в одном месте, и идентифицировать как одновременные наибольшее количество разноместных событий, т. е. представить наиболее детализированную и наиболее полную историческую картину.

Таким образом, для решения всех трех задач, которые нуждаются во введении геологических временных понятий, наиболее полезным будет то определение, которое по литологическим, палеонтологическим, геохимическим и геофизическим данным позволит выделять наибольшее количество стратиграфических подразделений и обеспечивать их прослеживание на наибольшей территории.

Именно таков подход, когда одновозрастными признаются части пространства, содержащие ортохронологические, архистратиграфические или руководящие виды, что, по существу, одно и то же [24]. Приведем одно из многих определений: геологически одновременны слои, хотя бы образованные из различных пород и находящиеся в различных местах земного шара, но содержащие одни и те же руководящие окаменелости (С. А. Яковлев, 1933, 1948 гг.) [24]. К тем же рекомендациям сводится и применение наиболее популярного в настоящее время зонального метода, в котором зона выделяется по присутствию руководящих форм (Д. М. Раузер-Черноусова, 1955 г., «Решение III сессии МГК», Берлин, 1885 г. и др.) [24]. Ничем не отличается и способ непосредственного проведения биохронологических границ, например, границы силура и девона по подошве зоны *Monograptus unifornis* — типичного руководящего вида.

Наиболее четко определил понятие руководящих форм в 1956 г. Г. П. Леонов: группы ископаемых, которые на обширных пространствах обнаруживают одинаковую последовательность форм (видов или родов), быстро сменяющих друг друга в вертикальном разрезе земной коры [24]. Зональное ископаемое или вид — индекс зоны, по В. Аркеллу, должны удовлетворять следующим требованиям — легкость определения в сочетании с узким вертикальным и универсально широким горизонтальным распространением [24].

По мнению некоторых исследователей (М. К. Коровин, Б. М. Келлер, А. В. Македонов) [24], руководящими, т. е. отвечающими тем же требованиям и пригодными для тех же целей, могут быть не только виды, но и другие, литологические, например, признаки.

Из всех последовательностей, которые можно построить по данному фактическому материалу, будем выбирать последовательность руководящих признаков, обеспечивающих наиболее дробное расчленение и наиболее далекую корреляцию, т. е. выделение в изучаемом пространстве наибольшего количества стратиграфических подразделений и их прослеживание на наибольшей территории.

Трудность выбора заключается в том, что для оценки оптимальности имеются одновременно два критерия. Хорошо, конечно, если последовательность будет наилучшей по обоим критериям сразу, а как быть, если одна из них обеспечивает выделение наибольшего количества подразделений, а другая — прослеживание на наибольших пространствах? Необходимо найти один показатель, который отражал бы одновременно и качество выделения, и качество прослеживания.

Допустим, мы оцениваем какую-то последовательность, состоящую из восьми признаков. Первый, самый нижний ее признак встречается в пяти разрезах. Будем говорить, что его частота равна пяти. Он позволяет отождествить по возрасту, синхронизировать друг с другом слои этих пяти разрезов. Вышележащий, второй

признак имеет частоту 4, третий — 9 и т. д. Подсчитаем сумму частот данной последовательности.

Есть и другая последовательность, отличающаяся от данной наличием двух дополнительных признаков. Она обеспечивает выделение десяти разных стратиграфических подразделений в том же объеме исследованного пространства вместо прежних восьми. Количество подразделений увеличилось. Одновременно увеличилась и сумма частот на то количество, которое принесли с собой два дополнительных признака. Если же другая последовательность отличается от данной нехваткой каких-то признаков, это приведет к уменьшению количества подразделений. Уменьшится и сумма частот.

Существует и еще одна последовательность с тем же количеством признаков. Но некоторые из них распространены в большем количестве разрезов. Например, первый не в пяти, а в семи, второй — в восьми, третий — в тринадцати разрезах и т. д. Такая последовательность позволяет проследить выделенные подразделения на большей территории. Одновременно увеличивается сумма частот. Если же признаки распространены в меньшем количестве разрезов, это ухудшит качество нашего инструмента для прослеживания и уменьшит сумму частот.

Ясно, что сумма частот и есть тот показатель, который мы ищем, она может служить критерием оптимальности стратифицирующей последовательности. Среди всех последовательностей, которые можно построить по данному материалу, будем выбирать имеющую наибольшую сумму частот. Именно ее и будем называть геохронологической шкалой. Члены шкалы — это признаки наилучшие среди всех, назовем их в соответствии с традицией руководящими признаками.

Процедура построения шкалы не меняется в зависимости от размера исследуемой территории — шкала для небольшого нефтегазодобывающего участка строится так же, как и планетарная. Признаками, руководящими для небольших участков, чаще будут характерные разновидности горных пород. При расширении изучаемой территории они перестают удовлетворять предъявляемым требованиям и постепенно выбывают из обработки. Геохронологические шкалы больших регионов, континентов, планеты в целом строятся из палеонтологических признаков — видов и родов ископаемых организмов.

Возрастные диапазоны

Неоднократно отмечалось, что недопустимо производить синхронизацию на основании одних руководящих признаков: «... корреляция тем более выигрывает в достоверности, чем на большее число элементов фауны она опирается и чем меньше она основывается на сравнении одних только так называемых руководящих форм» (К. Динер, 1934 г.) [24, с. 100].

Для привлечения к синхронизации всех имеющихся признаков введем понятие возрастного диапазона.

Перенумеруем члены геохронологической шкалы от 1-го, самого древнего — до N-го — самого молодого. Пусть I и J — члены шкалы, причем J моложе I, соответственно номер J больше номера I. Если признак K выше (I—1)-го члена шкалы и не имеет иных стратиграфических отношений с предыдущими членами и к тому же ниже (J+1)-го и не имеет иных стратиграфических отношений с последующими членами, то его возрастной диапазон включает все члены шкалы от I до J. Будем обозначать его (I, J).

Таким образом, геохронологическая шкала — последовательность руководящих признаков — будет выполнять свою роль эталона для возрастной оценки всех остальных признаков.

Возрастным диапазоном руководящего признака I будем, по определению, считать сам признак I.

Понятие «возрастной диапазон» может рассматриваться как экспликация, логическое уточнение традиционного понятия «био-хрон»: временное подразделение, отвечающее полному распространению какой-либо систематической группы ископаемых организмов (Б. М. Келлер, 1950 г., Д. Л. Степанов, 1958 г.) [24]. Такой же геохронологический смысл вкладывал С. Бакмен в понятие «биозона»: полное время существования таксона или группы таксонов [24]. В отличие от биохрона и биозоны, возрастной диапазон относится не только к палеонтологическим, но и к любым другим признакам.

Совокупность всех признаков, возрастной диапазон которых включает какой-то один и только один I-й член шкалы, будем называть I-м геохронологическим подразделением.

Отношения возрастной последовательности между признаками с непересекающимися возрастными диапазонами есть отношения строгого порядка, они антирефлексивны: ни один признак не может быть поставлен в отношение «моложе» или «древнее» сам с собой; асимметричны: если A моложе B, то выражение «B моложе A» всегда неверно; транзитивны: если A моложе B, а B моложе C, то A моложе C.

Современному геологу может показаться несерьезным такое пристальное внимание к простейшим вещам. Однако исследователи прошлого века с большим уважением относились к математическим свойствам фундаментальных геологических отношений: «Если каким-нибудь образом достоверно известно, что одна и та же порода B древнее породы C, но при том позднейшего образования, нежели третья порода A, не находящаяся в непосредственной связи с породой C, то она должна быть во всяком случае новее, нежели A. Выражаясь математически: A древнее B, B древнее C, следовательно, A древнее C» (Б. Котта, 1862 г.) [24, с. 182]. Возрастные отношения между признаками с одинаковыми возрастными диапазонами есть отношения эквивалентности. Они рефлексивны: любой признак A является одновозрастным самому себе; симметричны: если A одновозрастно B, то и B одновозрастно A; транзитивны:

если А одновозрастно В, а В одновозрастно С, то А одновозрастно С.

Возрастные отношения между признаками отличаются от стратиграфических отношений между теми же признаками именно свойством транзитивности, позволяющим делать выводы о признаках, «не находящихся в непосредственной связи» друг с другом, как заметил Б. Котта, например, ни разу не встреченных в одном и том же разрезе. Транзитивность открывает широкие возможности в использовании возрастных отношений.

Все эквивалентные признаки взаимозаменяемы: вывод о корреляции, сделанный по А, остается прежним, если мы заменим А эквивалентным ему В [28, 29]. Это обстоятельство становится чрезвычайно важным, если ни А, ни В не распространены повсеместно: возможность обнаружения одного из двух признаков гораздо больше, чем возможность обнаружения каждого из них в отдельности.

Точно так же используется при корреляции и любой руководящий признак: он позволяет делать те и только те выводы, которые можно сделать по любому эквивалентному ему неруководящему признаку.

О хронологической взаимозаменяемости признаков писал и С. В. Мейен (1974 г.). Интересно было бы сравнить позиции. Однако определения он не дает, больше того, вводя принцип хронологической взаимозаменяемости, один из фундаментальных в своих построениях, не дает и формулировки принципа.

Геологический возраст

Так как в какой-либо точке разреза, в определенном слое может быть фиксировано несколько разных признаков, необходимо ввести понятие области пересечения (общей части) возрастных диапазонов этих признаков. У двух диапазонов (3, 7) и (5, 11) область пересечения, совпадающей частью будет (5, 7), у диапазонов (2, 15), (3, 6), (6, 16), (4, 11) область пересечения (6, 6) и т. д.

Введенное понятие соответствует конкурентно-ранговой зоне — разнородной биоzone, составленной из одновременно существующих (двух или нескольких) таксонов, биоzone которых не обязательно совпадают («Французский стратиграфический кодекс», 1962 г.) [24]; зоне, включающей перекрывающие друг друга интервалы распространения характерных таксонов, от которых она получила свое название («Американский стратиграфический кодекс», 1961 г.) [24].

Предложенных понятий достаточно, чтобы подойти к определению «геологического возраста». Это понятие часто наделяется в геологии многочисленными дополнительными характеристиками сверх необходимых и достаточных, полученных им в процессе определения, построения, вывода из наблюдаемых данных. Например, «Геологический словарь» [24] определяет геологический возраст как время, прошедшее от какого-либо геологического события.

Можно, конечно, говорить о «ходе времени», о «течении времени» вместо временной последовательности, писать: «... любое подразделение времени в истории Земли может быть распознано в любой точке земной поверхности, всюду оно оставило свой след» (Г. Я. Крымгольц, 1964 г.) [28, с. 127], можно очень образно представлять непрерывность, необратимость, направленность времени, никак не внесенные в само понятие явными и строгими формулировками. Но ведь такое представление — скорее образ, чем научное понятие, оно не построено однозначно на основании «позитивных документов региональной истории Земли» [34, с. 158].

Такому подходу противостоит ясная и четкая позиция А. П. Павлова, понимавшего геологический возраст слоя как его место в общей системе слоев [24]. Так как система слоев строится по их временным отношениям, определяемым с помощью шкалы, будем называть геологическим возрастом слоя, точки, любого другого пространственного объекта его место в геохронологической шкале.

Место некоторого геологического тела в шкале устанавливается путем нахождения области пересечения возрастных диапазонов всех признаков, фиксированных в этом теле. Если такой областью будет только I-й член шкалы, будем говорить, что данный объект имеет I-й возраст. Если область пересечения есть какая-то часть шкалы от I-го до J-го членов, возраст объекта соответственно (I, J) — имеющихся данных недостаточно для установления более узкого интервала возраста.

Между точками, слоями, другими пространственными объектами устанавливаются такие же отношения «моложе», «древнее», «одновозрастно», как и между признаками, с теми же математическими свойствами.

Стратиграфические подразделения

Понимание стратиграфического подразделения как множества всех слоев, располагающихся на одной ступеньке «лестницы древности», наиболее обычно. В «Общей геологии», например, стратиграфическая единица определяется как комплекс пород определенного возраста [24]. Такая тенденция четко прослеживается еще с тех времен, когда любые стратиграфические подразделения называли формациями (Э. Эйхвальд, Э. Фраас, Ж. Кювье и А. Л. Броньяр) [24].

Так же определяются в современной геологии и «хроностратиграфические подразделения» — подразделения, в основу выделения которых положено соответствие их определенным отрезкам геологического времени (Д. Л. Степанов, 1954 г.) [24]. Но так как стратиграфия — это наука, единственным инструментом которой являются временные конструкции, следует согласиться с О. Шиндевольфом и Б. С. Соколовым в том, что название «хроностратиграфия» — плеоназм (типа «темный мрак», «обломочный конгломе-

рат»), где название «хроно» указывает на временное содержание, и без того присущее стратиграфии [24, 34].

В полном соответствии с приведенными высказываниями стратиграфическое (хроностратиграфическое) подразделение можно было бы определить как множество всех тех и только тех объектов (точек наблюдения, интервалов конкретных изученных разрезов, фрагментов обнаженных поверхностей), которые имеют один и тот же геологический возраст. Но такое определение не будет отвечать целям выделения стратиграфических подразделений. Эти подразделения имеют смысл как картируемые тела, которые можно протянуть от одного изученного разреза до другого. Точки между разрезами не изучены, об их возрасте мы ничего не знаем, и потому на их включение в состав подразделения наложен безоговорочный запрет — ведь в определении говорится о присутствии только точек с одинаковым установленным возрастом. Следует разрешить включение в состав стратиграфического подразделения точек с неустановленным возрастом. Кроме того, очевидно, что не вызовет никаких противоречий и присутствие в стратиграфическом подразделении наряду с точками I-го возраста и точек возраста (I, J), (H, I), (H, J), т. е. возраста, включающего I.

Но снятие запретов на присутствие точек неустановленного и более широкого возрастного диапазона ведет к непредусмотренным последствиям. В каком-то изученном разрезе, где выделены два стратиграфических подразделения с точками I-го и J-го возраста, между ними может существовать только одно стратиграфическое отношение: J-е подразделение выше I-го. Любое иное отношение противоречило бы определениям стратифицирующих признаков, стратифицирующей последовательности, геохронологической шкалы, геологического возраста. В пространстве же между изученными разрезами ничто не запрещает I-му стратиграфическому подразделению оказаться выше J-го, пересечься, совпадать с ним, включаться в него или, наоборот, включать его. Понятно, что такая ситуация, может и допустимая для жил, даек, интрузий, выглядит противоестественной для слоистых толщ.

Ранее [28—30] были предложены определения, устраняющие эту противоестественность: если во всех разрезах, где встречены и точки а тела А, и точки b тела В, все а выше любой b, то тело А выше В, В ниже А. Тела, для которых справедливо отношение «выше», названы стратифицируемыми друг относительно друга. И если даже мы проводим их границы путем интерполяции или экстраполяции в неизученных частях пространства, чтобы оставаться стратифицируемыми, тела должны сохранять свои отношения в любом месте, где возможно провести вертикальный разрез, т. е. везде.

Стратифицируемые тела, хотя и не введенные в явной форме, широко используются в геологической практике. Когда геолог, проследивший на большом протяжении две свиты, в единственном месте наблюдает их контакт и видит, что свита А лежит выше свиты В, он приходит к выводу о подстилании свиты А свитой В на всю площадь распространения этих свит.

Различные частные случаи или близкие формулировки условия о стратифицируемости приводятся в литературе: «... если в двух сравниваемых разрезах существует пара стратиграфических подразделений, которые можно объединить, то сопоставление вышележащих подразделений одного разреза с нижележащими другого не имеет смысла» [27, с. 58]; «пласты не могут пересекаться» (Ю. А. Воронин, 1967 г.) [28, с. 69]. Особенно четко формулировали условие непересечения многие геологи на заре развития нашей науки, в XVIII в., когда впервые множество геологических тел было разделено на пласты и жилы. Ранее, в XVI в., в трудах Г. Агриколы [1] все геологические тела именовались жилами (*vena*). Современные же переводчики Г. Агриколы называли пологие жилы пластами, чтобы отличить их от глубоких, крутопадающих жил, но в латинском оригинале и то, и другое — *vena*: *vena profunda* — глубокая жила, *vena dilatata* — расширенная жила.

Для геологов XVIII в. было гораздо яснее, чем для современных геологов, что единственной или по крайней мере основной характеристикой слоистых толщ, выделяющей их среди множества всех геологических объектов, является именно свойство непересечения одного слоя с другим, а не плоская форма или параллельность границ, которые, хотя и в самом деле типичны для слоев, но могут встречаться и у жил, даек, некоторых интрузий.

Вот как производил разделение А. Цеплихаль в 1780 г.: «Когда же два пласта сходятся, то они никогда так, как жилы, один сквозь другой не переходят, но ложатся один на другой, от чего нередко могут произойти весьма толстые пласты» [37, с. 201]. Те же различия между пластами и жилами называет К. Гергард (1790 г.): «Настоящая жила различается от рудных слоев и пластов тем, что сии последние лежат параллельно с каменными пластами, а первая их прорезывает и составляет с оными угол разной величины» [24, с. 114]. А вот как излагает отношение А. Г. Вернера к главным отличиям руд (рудных жил) от слоев А. Иовский: «Знаменитый Вернер определял их следующим образом: руды суть особые вместилища минералов плоского вида, почти всегда пересекающие слои гор и наполненные минеральным веществом, более или менее отличным от вещества, составляющего толщу, в коей они заключаются» [14, с. 6].

Введем в определение стратиграфических подразделений условия, запрещающие их пересечения и разрешающие присутствие в каком-то I-м из них наряду с точками I-го возраста также и точек неустановленного и более широкого, чем I-й, возраста: стратиграфические подразделения — односвязные, стратифицируемые относительно друг друга области пространства, каждая из которых включает точки с одним и тем же для данной области I-м единичным возрастным диапазоном, и может включать также точки с более широким, чем I-й, возрастным диапазоном.

О точках с неизвестным возрастом в определении не сказано ничего, поэтому допускается их присутствие в стратиграфическом подразделении. Кроме того, введено требование связности, кото-

рая понимается в геометрии как возможность соединения двух любых точек тела непрерывной линией, каждая точка которой принадлежит данному телу. Без точек неустановленного возраста провести такую линию было бы невозможно.

Все связанные тела в геометрии разделяются на односвязные и многосвязные. Если любую замкнутую кривую можно, не выходя за пределы данного тела, стянуть в точку, то такое тело односвязно. В противном случае тело многосвязно. Примером многосвязного тела может служить какая-нибудь область с дырой. Замкнутая кривая, проходящая вокруг дыры, может быть стянута в точку только за пределами области, в пространстве, занятом дырой.

В наделении стратиграфических подразделений свойством односвязности нет ничего искусственного, посторонне-геометрического. Картируя какое-либо подразделение, геолог всегда подразумевает, что оно не содержит внутри себя пустот, «белых пятен», «вневременных частей», включений других стратиграфических подразделений.

«Луковичная модель»

Итак, «луковичный лепесток» (стратиграфическое подразделение) построен. Теперь можно перейти и к построению самой модели Вернера: согласный комплекс — односвязная область пространства, заполненная стратиграфическими подразделениями, каждое из которых соприкасается только с двумя другими подразделениями — вышележащим, по геохронологической шкале непосредственно более молодым, и нижележащим, по геохронологической шкале непосредственно более древним.

В согласном комплексе нетрудно узнать модель Вернера. Выполнены все требования — непрерывности, одинакового порядка, отсутствия конечности в «боковом» направлении в пределах любого заданного участка.

Все слои I-го возраста в некотором разрезе объединим в одно стратиграфическое подразделение, границу между I-м и (I+1)-м подразделениями в разрезе будем проводить где-то между самой верхней точкой I-го возраста и самой нижней точкой (I+1)-го возраста. В каком именно месте разреза пройдет граница, для топологической вернеровской модели, учитывающей в разрезе только порядок стратиграфических подразделений, безразлично.

Точно так же эта граница пройдет и где-то между изученными разрезами, лишь бы она была непрерывной и не перегибалась через вертикаль.

Ничего не говорится в определении согласного комплекса стратиграфического подразделения и о вещественном выполнении «луковичных лепестков». Таким образом фиксирована только вернеровская структура пространства. Это предоставляет широкий простор в использовании модели. На геологической карте, как это делается, например, на мелкомасштабных картах, может быть отражена только конфигурация изохронных границ бесплотных

стратиграфических подразделений. Такие карты необходимы для многочисленных поисковых, обзорных построений. Но вернеровская модель может использоваться и для прослеживания реальных геологических тел известного литологического состава. В этом случае границы стратиграфических подразделений играют роль линий построения, строительных лесов, которые после возведения здания становятся ненужными.

Синхронизация и идентификация

Термин «стратиграфическая корреляция» используется разными авторами в разных значениях. Будем считать «корреляцию» термином, включающим по значению два других — синхронизацию и идентификацию.

Синхронизация геологических объектов — установление их одновозрастности.

Идентификация — установление принадлежности двух сравниваемых областей пространства одному и тому же непрерывному геологическому телу [13, 36].

Геологическое тело — связная область пространства все точки которой обладают признаками одного и того же класса некоторой классификации. Чаще всего тела выделяют по литологическим признакам.

Идентификация в таком определении соответствует стратиграфической корреляции в понимании многих американских геологов — установлению литологической, латеральной, «боковой» непрерывности, синонимике угольных пластов в общепринятом у геологов-угольщиков понимании этого слова или, попросту, прослеживанию пластов от разреза к разрезу [24, 28, 36].

В. Смит также понимал стратиграфическую корреляцию как установление литологической непрерывности [45]. Кстати, он использовал и термин «идентификация» — слои, идентифицируемые по органическим окаменелостям (*strata, identified by organized fossils*). Такое отношение к корреляции было очень распространено в прошлом веке. Идентификация — массовая, типовая задача, имеющая огромное практическое значение.

Без введения ограничений задача имеет множество решений. Допустим, в одном разрезе выделено одно тело (одномерное) — пласт песчаника, в другом разрезе тел с тем же вещественным признаком десять. Мы можем объединить наш пласт в одно непрерывное двухмерное (трехмерное) тело с первым из них, со вторым и т. д. (рис. 4).

При многих десятках и сотнях разрезов, десятках и сотнях тел в каждом из них множественность решений огромна.

Введем упрощения и ограничения: 1) все тела односвязны; 2) изучаемая область также односвязна, она заполнена телами без остатка, внутри нее нет точек, не принадлежащих какому-либо телу; 3) тело Π_1 разреза I, лежащее выше (ниже) стратиграфического подразделения F, можно объединять в одно непрерывное

двухмерное или трехмерное тело только с таким телом Π_{II} разреза II, которое также лежит выше (ниже) стратиграфического подразделения F (рис. 5).

Смысл первых двух условий сводится к тому, что если прослеживаемые тела или их совокупности содержат какие-либо включения, то на данном этапе построения мы отвлекаемся от этого осложняющего момента. Понятно, что после идентификации уже

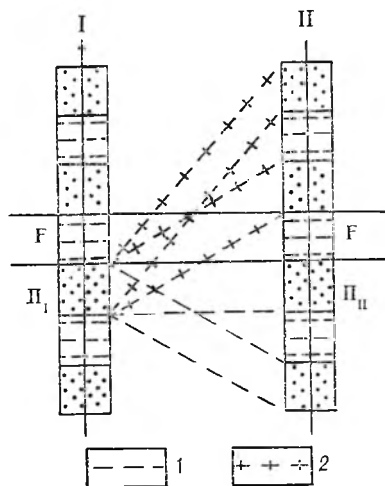
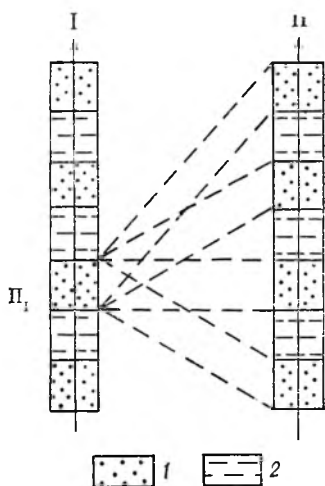


Рис. 4. Множественность решений задачи идентификации

1 — песчаник; 2 — аргиллит

Рис. 5. Сокращение числа вариантов идентификации

1—2 — варианты (1 — допустимые, 2 — недопустимые)

ничто не помешает нам учесть какие угодно включения. Третье условие означает, что стратиграфические подразделения только в том случае могут оказать помощь в прослеживании реальных геологических тел, если их границы не пересекаются с границами этих тел.

Оптимальна ситуация, когда внутри каждого стратиграфического подразделения в каждом разрезе заключено по одному и только по одному телу (4). Если прослеживаемые тела подчиняются условиям (1—4), множественность решений исключена (рис. 6). Система построенных геологических тел обладает всеми свойствами вернеровской модели или согласного комплекса, только здесь уже не бесплотные стратиграфические подразделения, а тела определенного литологического состава в одинаковом порядке непрерывно прослеживаются между любыми двумя разрезами.

А пока отметим следующее: да, прав был Н. А. Головкинский [10], именно вернеровская модель и представляет основание, на котором держится наш метод параллелизации формаций в 1983 г. так же, как и в 1869 г.

Важную роль во всей совокупности условий и определений, входящих в процедуру построения вернеровской модели, играет условие (4), смысл которого сводится к тому, что в одно и то же непрерывное тело объединяются разновозрастные слои разных разрезов.

Наиболее четко излагал его К. Циттель: «Если вышеуказанный факт мы формулируем в следующем положении, что одинаковые окаменелости доказывают одинаковую древность двух пластов, то приобретем безошибочное основание к распознаванию в изолированных клочках одного непрерывного слоя и соединим, таким образом, разбросанные элементы в стройный последовательный ряд» [38, с. 37].

Именно таков путь использования вернеровской модели, временных конструкций для решения практических геологических задач. И это стандартный, эталонный путь построения объемных конструкций слоистых геологических тел по данным описаний разрезов, поэтому трехмерные тела уже по построению будут вернеровскими, именно они и формируют понятие о норме, эталоне слоя, пласта, слоистой толщи. Они стандартны не потому, что среди всех тел, которые мы можем полностью обозреть, вернеровские тела наиболее обычные, а скорее потому, что, не имея в большинстве случаев возможности увидеть их целиком, мы вынуждены реставрировать их по наблюдаемым фрагментам, и принятая процедура построения целого по видимым частям пригодна в качестве стандартной, так как, во-первых, она предельно экономит строительные усилия, во-вторых, обеспечивает успех в большинстве ситуаций и, в-третьих, не приводит к противоречиям ни внутренним, ни внешним. Кроме того, крайне важно, что вернеровская модель не противоречит нашим интуитивным образным представлениям, сформировавшимся в результате многочисленных наблюдений в отдельных обнажениях, в каждом из которых слои тянутся в одинаковом порядке от края до края. Другими словами, наиболее типичная зримая картина может рассматриваться как частный случай вернеровской модели. Иначе и быть не могло, так как именно такие обнажения и послужили Вернеру прототипом для построения модели всей земной коры.

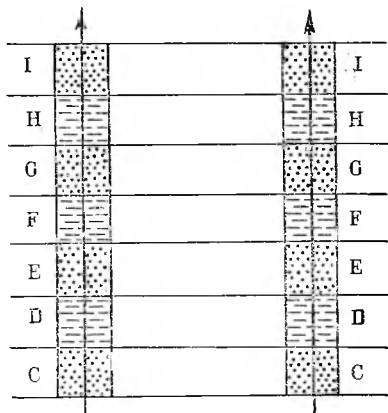


Рис. 6. Единственность решения задачи идентификации

Фации

Бурный прогресс геологии в начале прошлого века, обязанный использованием для картирования такого эффективного инструмента как геохронологическая шкала, способствовал появлению огромного количества выводов о поведении конкретных слоев в пределах данного стратиграфического подразделения. И снова заговорили об ошибках, недальновидности Вернера, о примитивности его схемы. Картированием с помощью шкалы установлены, например, такие типичные ситуации: слой известняка, принадлежащий к стратиграфическому подразделению S, прослеживается с запада только до реки P, здесь он заканчивается, и далее в пределах того же стратиграфического подразделения тянется к востоку слой песчаника. Такие, литологически различные, но одновозрастные слои или литологически различные части одного и того же стратиграфического подразделения стали называть фациями, например, известняковая и песчаная фации стратиграфического подразделения S.

Итак, литологически неизменные слои не тянутся вокруг земного шара. По латерали, в боковом направлении слой данного состава может смениться слоем другого состава. Ах, как наивен был Вернер, не сумевший этого предвидеть!

Ну, а если попробовать разобраться?

Согласно строгому определению стратиграфического подразделения, это часть пространства, обладающая только геометрическими и возрастными, но не вещественными характеристиками. Введение вещественных характеристик потребовало принятия условий (1—4). Согласно последнему из этих условий, внутри каждого стратиграфического подразделения в каждом разрезе заключено по одному телу. Множественность решений исключалась; при этом если тела в разных разрезах обладают одними и теми же вещественными признаками, решение существует и оно единственно. Именно этот вариант был проанализирован в предыдущем разделе. Но решения может и не существовать, если: а) тела разных разрезов сложены разными породами, б) в одном из разрезов тело отсутствует вместе со «своим» стратиграфическим подразделением (рис. 7).

Случай (а) привел в свое время к возникновению понятия «фация» и к очередному ниспровержению модели Вернера. Аналогичные обстоятельства типичны в истории любой зрелой науки, только на их основании делают совсем другие выводы. Так было в математике в ту эпоху, когда существовали лишь натуральные числа и операция вычитания не имела решения при вычитаемом большем, чем уменьшаемое. Существование решения было достигнуто путем расширения понятия «число» и введения новых объектов — отрицательных чисел. При таких же ситуациях были введены иррациональные, мнимые числа, нецелые степени и т. д.

Расширим понятие «геологическое тело» до «горизонта», введем новые объекты — фации. Горизонт — область пространства, все точки которой обладают каким-либо признаком заданной классификации, не обязательно одним и тем же; необходимо выполнение требований (1—4). Если два геологических тела составляют один и тот же горизонт, то они будут называться фациями (см. рис. 7).

Близкое по смыслу определение горизонта предлагал Н. И. Андрусов — толща пород, отвечающая определенной стадии развития бассейна и обнимающая поэтому разнообразные разновозрастные фации [24].

Начиная с А. Грессли, многие геологи считают фацию реальным геологическим телом, частью определенного горизонта или слоя. Н. С. Шатский, например, понимает фацию как разновозрастную, чаще смежную с данной группой минеральных образований другую горную породу, другой генетический комплекс, всегда стратиграфически относящуюся к тому же слою, свите, системе и т. д. [24].

Даже если считать, что А. Г. Вернер в самом деле не сумел предвидеть фациальных замещений, его теоретическая конструкция, построенная на неполных, недостаточно разнообразных исходных данных, снова осталась без изменений, только роль «луковичных лепестков», непрерывно протягивающихся через весь земной шар, вместо слоев стали играть горизонты. Но самое интересное вот в чем. Если понятия фаций действительно нет в исходной «луковичной модели», то Вернер сам и ввел его в качестве одного из усложнений и дополнений; только вернеровская терминология отличалась от принятой ныне. Саксонский профессор говорил не о фациях, а о распространенных по земному шару горных массах, образовавшихся не «беспрерывно (fortdauernd)», а «по одиночке (einzeln)» [31, с. 148—149].

Несогласия

Еще проще сделать решение задачи идентификации существующим в случае (б), когда сопоставляемое тело в одном из разрезов отсутствует вместе со «своим» стратиграфическим подразделением (см. рис. 7).

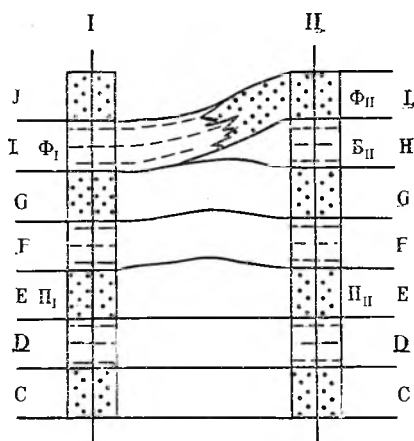


Рис. 7. Несуществование решения задачи идентификации для пластов BII и PhiII. Стратиграфическое подразделение I совпадает в разных разрезах с телами, обладающими разными вещественными признаками, подразделение II в разрезе II совпадает с телом BII, в первом разрезе оно отсутствует

Введем новое понятие: согласное отношение — соприкосновение стратиграфического подразделения с перекрывающим, в геохронологической шкале непосредственно более молодым, и подстилающим, в геохронологической шкале непосредственно более древним.

Принятое определение близко к определению согласного залегания по «Геологическому словарю» — залегание горных пород, характеризующееся постепенным переходом от слоев более древних к более молодым [24]. Также через отсутствие перерыва в стратиграфической последовательности определяют согласное залегание А. С. Барков, Н. И. Буялов, Г. Н. Сапфиров [24]. А. К. Башарин специально оговаривает сохранение той же последовательности наслоения по сравнению с принятым эталонным пространством (стратиграфической, геохронологической и другими колонками) [24].

Соприкосновение данного стратиграфического подразделения с чем угодно иным, кроме перекрывающего, непосредственно более молодого, и подстилающего, непосредственно более древнего, будет несогласным отношением или несогласием.

Несогласие в принятом определении включает многие известные в геологии типы отношений. Прежде всего в несогласия входят все отношения, определяемые через наличие перерыва в стратиграфической последовательности, — несогласные залегания, несогласия, перерывы [24]. Сюда же попадут тектонические несогласия (разломы) любых типов, срезания слоистых толщ поверхностями современного и древнего рельефа, срезания интрузиями, экструзиями, дайками и жилами. Общая черта всех таких несогласий — возможность их выявления стратиграфическими методами путем установления последовательности геологических тел в разрезах и сравнения этой последовательности с геохронологической шкалой данного участка.

Нетрудно видеть, что при таком подходе любое стратиграфическое подразделение имеет согласное ограничение только снизу и сверху, сбоку же, по латерали, никаких согласных ограничений не предусмотрено, что равносильно утверждению о бесконечности, вернее об отсутствии латеральной конечности стратиграфических подразделений самих по себе в пределах любого участка. Сделать стратиграфические подразделения конечными можно, только срезав их несогласными, несобственными границами — разломами, размывами, поверхностями магматических интрузивных и жильных тел. Интересно, что в несогласные границы попадут дневная поверхность и границы изучаемой территории, также обрезающие стратиграфические подразделения, другими словами, попадет все, что геолог обычно называет вторичными границами в противоположность первичным — согласным. Любая геологическая карта наглядно показывает, что латеральная конечность обеспечивается только несогласными границами.

В современной геологии нет ни понятия, сравнимого по степени общности с введенным понятием «несогласие», ни четкого пред-

ставления о роли несогласных границ в обеспечении латеральной конечности стратиграфических подразделений. В геологии XVIII в. и начала XIX в. было и то, и другое [24].

Чтобы восстановить первоначальную «луковичную модель» и использовать ее для идентификации также в случае несогласий, введем недостающие стратиграфические подразделения на правах

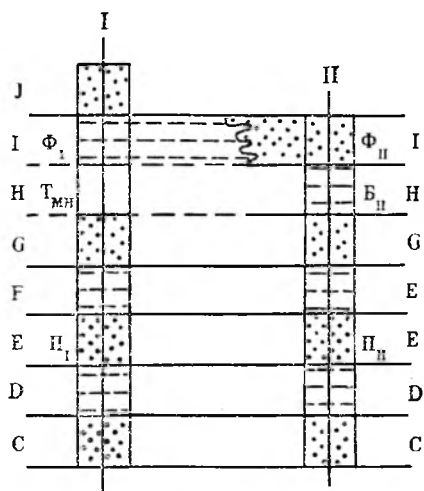


Рис. 8. Введение «мнимого» тела (T_{MN}) в разрез I позволяющее восстановить «луковичную модель»

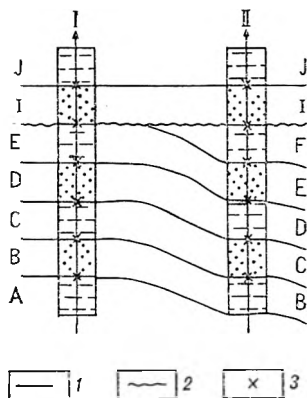


Рис. 9. Отношение согласия и несогласия поверхности

1—2 — поверхности (1 — согласные, 2 — несогласные); 3 — определяющие точки

«мнимых объектов» (рис. 8). Это вполне отвечает сложившейся практике — именно о таких объектах говорят: они в данном месте были сформированы, но впоследствии оказались размытыми или срезанными различными вторичными процессами.

Поверхность несогласия — такая поверхность, во всех определяющих точках которой фиксируются несогласные отношения. Определяющими назовем такие точки, в которых установлены отношения согласия или несогласия в соответствии с определениями (рис. 9).

Согласной будем считать границу, которая на всем своем протяжении разделяет два стратиграфических подразделения, соседствующих в геохронологической шкале.

Согласную границу, как это принято, можно по-другому называть первичной, несогласную — вторичной.

Первичные и вторичные границы

Введение понятий первичных и вторичных границ позволит подойти к решению проблем, широко обсуждаемых в геологической литературе.

Как пишет С. В. Мейен (1974 г.), в исходные наблюдения отношений «выше — ниже» между геологическими телами приходится вносить историко-геологические поправки: соотношение фиксировать не по вертикали (линия отвеса), а по предполагаемому направлению максимального градиента гравитационного поля Земли во время образования данного тела, учитывать только первичные (ни в коем случае не вторичные!) границы, только фауну *in situ* (отличая ее от переотложенной или вымытой). Такие поправки принимают даже «...самые ортодоксальные сторонники четкого отграничения «литостратиграфии» от «хроностратиграфии» и изгнания из первой понятия времени» (С. В. Мейен, 1974 г., с. 11). Я не сторонник изгнания из литостратиграфии понятия времени — очень полезной, необходимой структурной характеристики. Непонятно, зачем отграничивать литостратиграфию от хроностратиграфии. Вопрос следует поставить по-другому: необходимо ли внесение тех или иных «историко-геологических поправок», и если необходимо, то как сохранить однозначность и отсутствие субъективизма в построениях?

С. В. Мейен (1974 г.) не приводит алгоритма вывода направления максимального градиента гравитационного поля Земли во время формирования исследуемых тел. Возможно, направление задается как перпендикуляр к поверхности, на которой происходило отложение материала под действием гравитации и которая наблюдается нами как поверхность напластования. При этом возможно введение поправок за первичную негоризонтальность поверхности накопления (практически негоризонтально дно моря, лавовые потоки формируются на склонах вулканов, многочисленны всевозможные случаи косой слоистости и т. д.), тогда должен быть дан либо общий алгоритм выявления и исключения негоризонтальности, либо его модификации для каждой конкретной ситуации. В любом случае стратиграфические построения резко усложняются. Если же поверхность напластования просто принимается за первично горизонтальную, построение направления максимального градиента сводится к проведению перпендикуляра к поверхности напластования, «стратиграфической нормали». Но «стратиграфическая нормаль» — характеристика чисто статическая, наблюдаемая. Возможность ее построения, полезность, необходимость никак не связаны с историко-генетической интерпретацией. Соотношения между ними в последовательности логического вывода прямо противоположны: из наблюдаемых отношений на «стратиграфической нормали» выводятся хронологические взаимоотношения тел.

Целесообразно пойти на дальнейшее снижение требований к исходному материалу. Если определять стратиграфические отношения через положение на перпендикуляре к поверхности напластования, теряется возможность устанавливать стратиграфические отношения тел по данным скважинных наблюдений во многих других случаях, когда ориентировка напластования остается неизвестной. Поэтому и было принято определение через положение геологических объектов (точек, тел) на вертикали.

Проанализируем теперь, насколько необходимо учитывать вторичные границы при построениях геохронологических шкал и других возрастных конструкций.

За исключением взбросов и надвигов, все разновидности вторичных границ никак не отражаются на взаимоотношениях стратифицирующих признаков, поэтому можно не обращать на них внимания. Все, что было выше, остается выше, все, что было ниже, остается ниже, а это единственное, из чего мы исходим при построении стратифицирующих последовательностей и геохронологической шкалы. Вторичные границы могут привести лишь к сокращению набора стратифицирующих признаков, к выпадению их части снизу, сверху или изнутри.

Допустим, имеется разрез I, в нем фиксирована последовательность признаков А, В, С (рис. 10а); потом выясняется, что эта последовательность сокращена за счет срезания современным рельефом, и в разрезе II есть признаки, обнаруженные выше А, В, С. Стратифицирующая последовательность с максимальной суммой частот 7, т. е. геохронологическая шкала по данным обоих разрезов — А, В, С, D, E. Другими словами, ряд А, В, С достроился признаками D и E. Никаких проблем не возникло.

Допустим, имеется разрез I, в котором фиксирована последовательность А, X, Y, Z (см. рис. 10б). Потом выясняется, что она сокращена за счет размыва, и в разрезе II фиксированы выше А и ниже X признаки В, С, D, E. По данным двух разрезов строится последовательность с максимальной суммой частот 12—А, В, С, D, E, X, Y, Z. Последовательность А, X, Y, Z была расставлена изнутри признаками В, С, D, E. Полная последовательность и в этом случае получена без введения понятий вторичных границ. Стало быть, и такая граница, как стратиграфическое несогласие, не нуждается ни в каких специальных оговорках при введении исходных отношений «выше — ниже».

Допустим, имеется разрез I, в нем фиксирована последовательность X, Y, Z, В, С (см. рис. 10в). Затем по данным разреза II получена другая последовательность — Z, А, В, С. В качестве геохронологической шкалы принимается последовательность X, Y, Z, А, В, С с суммой частот 9. Если при описании разреза, например, скважины с неполным отбором керна мы пропустили, не заметили разлома сбросового типа, это не приведет ни к каким ошибкам. Наличие разломов сбросового типа не вынуждает вводить никаких поправок и ограничений на способы построения геохронологической шкалы.

Сложнее дело при разломах взбросового и надвигового типа. Рассмотрим два крайних случая [30]. В первом из них оба блока сложены комплексами, в которых все признаки повторяются, среди них нет стратифицирующих, во втором — имеются отчетливые последовательности. Где бы мы ни проводили линии разрезов (см. рис. 10г), пересекают они поверхность надвига или нет, в любом случае стратифицирующей последовательности не получим, наличие надвига никак не отразится на результатах (учитывать

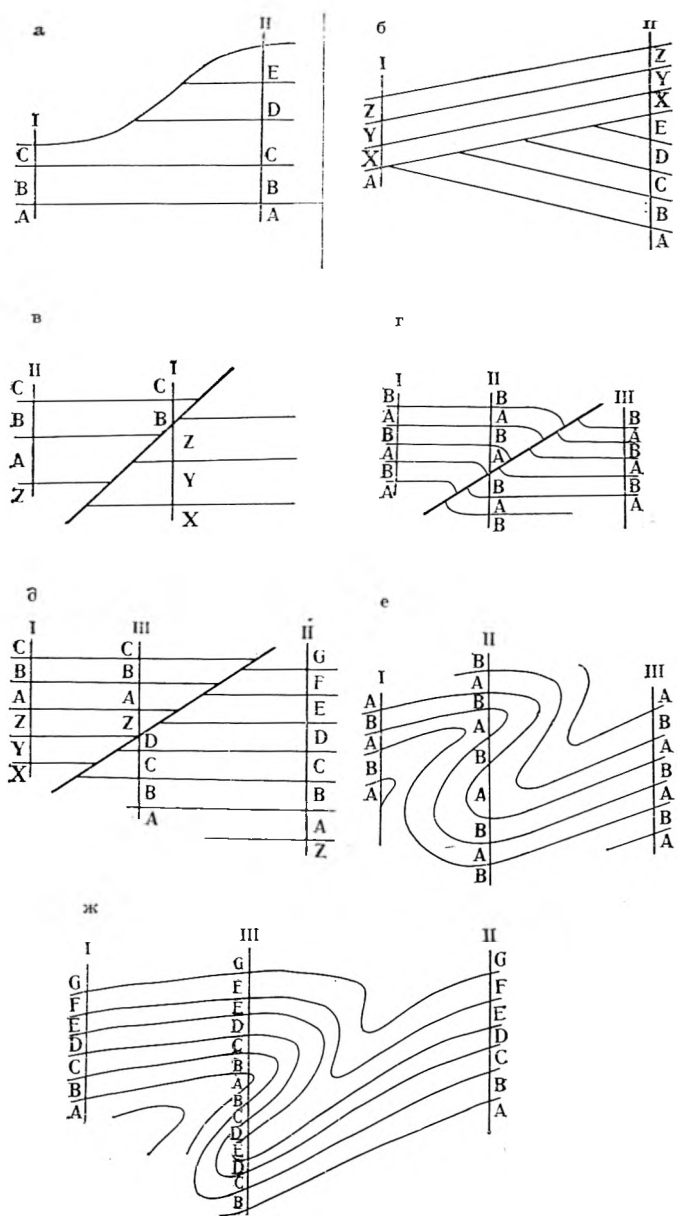


Рис. 10. Геологические ситуации (а—ж), осложняющие установление отношений «выше — ниже»

этот осложняющий момент при построении геохронологической шкалы ни к чему).

Во втором случае (см. рис. 10д) не учитывать надвиг нельзя. Если мы будем проводить линии разрезов, не пересекая его поверхность, мы получим по материалам разрезов I и II геохронологическую шкалу X, Y, Z, A, B, C, D, F, G с суммой частот 14 — мощный инструмент для корреляции разрезов и любых структурных построений. Если же мы проведем линию разреза III, пересечем при этом поверхность надвига и не будем по-прежнему обращать на него никакого внимания, мы лишимся нашего инструмента. Выясняется, что признаки C и D уже нельзя считать стратифицирующими относительно друг друга — в разрезе II D выше C, а в разрезе III обнаружены точки, обладающие признаками C и лежащие выше D. Такой же вывод можно сделать и об отношениях C с Z, A, B; A с Z, B, D; B с Z, D; D с Z. По материалам всех трех разрезов можно построить геохронологическую шкалу X, Y, Z, E, F, G с суммой частот 8. Инструмент, который позволял выделять десять подразделений, теперь будет выделять только шесть. Дробность расчленения и дальность прослеживания резко уменьшаются. Чтобы избежать этого, надо как-то учесть границы взбросово-надвигового типа.

Можно было бы определить эти границы как поверхности, при переходе через которые резко падает качество геохронологической шкалы. Вернее, мы будем определять таким образом не те вторичные границы, с которыми связываются представления о движениях, надвигах и взбрасываниях.

Ограничимся утверждением: существуют границы, при переходе через которые качество инструмента для корреляции скачкообразно падает. Естественно, что в наших интересах через них не переходить.

Рассмотрим разрез III по частям. Строим последовательность по материалам разрезов I и II и двух нижних слоев разреза III, содержащих признаки A и B. Качество шкалы не упало; запрещенная поверхность не пересекает разрез III в двух нижних его слоях. Добавляем третий, четвертый слой: поверхность не обнаруживается. Вводим пятый снизу слой, в нем содержится признак Z, качество инструмента сразу падает и продолжает падать по мере введения новых более высокозалегающих слоев. Следовательно, запрещенная поверхность находится между четвертым и пятым снизу слоями разреза III. Если разрезов, пересекающих поверхность, много, задаем по их данным ее пространственное положение и конфигурацию. Каждый разрез, проходящий через поверхность, следует делить на две части — лежащую выше нее и лежащую ниже нее и описывать по отдельности. Именно так и поступает стратиграф, описывая по отдельности разрезы в всячем и лежащем блоке надвига.

Конечно, легко выявить запрещенную поверхность в том случае, если каждый слой конкретного разреза содержит по одному стратифицирующему признаку. В другом разобранном нами ва-

рианте выявить такую поверхность было бы невозможно. Однако оба случая, рассмотренные совместно, позволяют обнаружить полезную закономерность: чем более резко падает качество инструмента, тем легче выявить и исключить причины этого ухудшения — запрещенную поверхность. Совершенно нельзя ее обнаружить стратиграфическими методами, когда она не мешает строить шкалу.

Можно ли выявить также запрещенные (для пересечения их вертикальными разрезами) поверхности нестратиграфическими методами? В принципе, да. Можно установить характер трещиноватости, дробления, мелкой складчатости, всегда сопровождающие эту поверхность и отличающие ее от всех других, и использовать этот набор диагностирующих признаков для распознавания. Но, скорее всего, в такой набор попадут и признаки сбросов, сдвигов, любых безамплитудных разломов, совсем не мешающих построению геохронологической шкалы. В этом случае было бы слишком много ненужных запретов. Лучше подобные морфо-тектонические признаки использовать лишь для выявления сомнительных участков, на которые следует обратить особое внимание, и подвергнуть их перебору, аналогичному вышеописанному.

Нормальное и опрокинутое залегание

С точки зрения исторической геологии (если поверхность накопления принята за первично горизонтальную) любое негоризонтальное залегание должно рассматриваться как нарушенное. Достаточно очевидно, что как бы ни было нарушено залегание, последовательность тел или признаков на линии отвеса остается такой же, как и при горизонтальных залеганиях, поэтому вводить какие-либо оговорки относительно нарушенных залеганий ни к чему. Ситуация меняется, когда углы достигают 90° . В этом случае приходится говорить о неопределенных стратиграфических отношениях между такими вертикально падающими телами. Последовательность стратифицирующих признаков не строится, инструмент для корреляции не работает.

Когда залегания становятся опрокинутыми, последовательность тел и признаков меняется на обратную. Проанализируем эту ситуацию [30].

Прежде всего, необходимо определить структурное явление, которое с генетических позиций называют опрокинутым залеганием. При построении геохронологической шкалы наиболее распространенные формулировки не пригодны — залегание, при котором более древние слои лежат на более молодых, подошва слоев обращена вверх, а кровля вниз. Возрастные понятия сами определяются через геохронологическую шкалу; их использование означало бы в данном случае логический круг.

Достаточно очевидно, что если одно и то же непрерывное тело встречено в конкретном разрезе дважды, то одно из залеганий (для нас сейчас неважно даже, какое именно) придется считать нормальным, второе — опрокинутым.

Рассмотрим два крайних случая. В одном из них (см. рис. 10е) дважды в конкретном разрезе встречен комплекс тел, в которых нет стратифицирующих признаков. Где бы мы ни проводили линии разреза, стратифицирующей последовательности, пригодной для корреляции, мы не получим. Опрокинутые залегания при построении шкалы можно не учитывать. Во втором случае (см. рис. 10ж) имеем по материалам разрезов I и II хорошую шкалу А, В, С, D, Е, F, G с суммой частот 14. Если учитывать материал по разрезу III, любой из признаков А, В, С, D, Е переходит в разряд нестратифицирующих по отношению к любому другому из них. Шкала может быть построена в варианте А, F, G с суммой частот 9. Установление стратиграфических отношений без учета опрокинутых залеганий приводит в этом случае к резкому ухудшению инструмента идентификации.

Приступим к перебору разреза III по частям. Строим последовательность по материалам разрезов I и II и двух нижних слоев разреза III. Качество шкалы остается высоким. Вводим в обработку третий, четвертый, пятый слои. Сумма частот повышается до 19. При введении шестого слоя сумма падает и продолжает падать по мере введения седьмого, восьмого и т. д. слоев. Попробуем принять гипотезу о наличии надвига между пятым и шестым слоями. Но и при введении в процедуру построения последовательности отдельно части разреза III выше пятого слоя качество последовательности не восстанавливается. Следовательно, гипотеза о наличии надвига ошибочна. Пробуем изменить отношения между подразделениями на обратные: если в разрезе С фиксировано выше D, будем считать С ниже D и т. д. Введем преобразованные таким образом отношения по шестому и седьмому слоям разреза III в последовательность, построенную по материалам I, II разреза и низов разреза III (в объеме 1—5 слоев). Качество сохраняется. Вводим седьмой, восьмой слои. Картина не меняется. При введении девятого, десятого и т. д. слоев качество начинает падать. По границе девятого и десятого слоев делим разрез III еще на две части, верхнюю из них пробуем отдельно ввести в процедуру построения шкалы в прямом порядке. Качество сохраняется.

Таким образом, для сохранения качества шкалы, построенной по материалам разрезов I и II, нам пришлось делить разрез III на три части и одну из них описывать в обратном порядке. Залегание в этой части будем называть опрокинутым, в остальных двух — нормальным.

Так же как и для случая с надвигами, для опрокинутых залеганий сохраняется полезная закономерность; когда нет никакой возможности распознать и исключить опрокинутые залегания, они никак не мешают нам в построении геохронологической шкалы. Чем больше они отражаются на качестве, тем большие возможности для своего выявления они нам представляют.

Чтобы не проводить перепроверку каждого разреза на нормальность — опрокинутость залегания (это привело бы к большим вычислительным затратам), необходимо обнаружить их диа-

гностические признаки. Такими признаками будут — широкое распространение крутых, видимых в обнажении, падений, наблюдаемые перегибания границ через вертикаль, другие показатели так называемой «напряженной тектоники». Когда таких признаков нет, например, в большей части плитных, орогенных комплексов, проверка на нормальность — опрокинутость при помощи трудоемкого перебора разрезов по частям отпадает.

Если выявление опрокинутых залеганий необходимо не для построения геохронологической шкалы, задача значительно меняется.

Ч. Лайель и Д. И. Соколов предлагают проследить слои до такого места, где залегание переходит в горизонтальное. Порядок слоев на участке их горизонтального залегания и будет нормальным, противоположный ему — опрокинутым [24]. Однако если признать существование горизонтальных лежащих складок, критерий оказывается неоднозначным.

Б. Котта [24] считает, что опрокинутые залегания не могут сохраняться на больших пространствах. Для использования этого критерия следует проследить слои по изучаемой территории и оценить площадь распространения испытуемого залегания. Но прослеживание слоев требует соответствующего инструмента, и все сводится опять-таки к использованию геохронологической шкалы, которая дает возможность установить опрокинутые залегания и без всякого подсчета площадей.

Если последовательность признаков соответствует их последовательности в геохронологической шкале, залегание считается нормальным, если же последовательность обратная по сравнению со шкалой — залегание опрокинуто.

Фауна *in situ* и переотложенная

Допустим, какая-то форма органических остатков имеет широкий возрастной диапазон (в уже построенной геохронологической шкале). В рассматриваемом районе она «проходит по разрезу» от самых древних до самых молодых подразделений. Тогда переотложение нижележащих экземпляров, скажем, в средние части разреза ничего не изменит. Как *in situ* эта форма была бесполезна для корреляции, так и в переотложенном состоянии она остается бесполезной.

Явление переотложения имеет смысл учитывать только для форм, имеющих четкое положение в построенной геохронологической шкале. Все находки органических остатков можно разделить на два класса: 1) закономерные, «на своем стратиграфическом уровне», и 2) аномальные. Такое разделение целесообразно производить в тех случаях, когда количества местонахождений «на своем» и «не на своем месте» резко несопоставимы. Аномальные исключаются из рассмотрения. При этом не имеет значения, являются ли аномальные экземпляры выше или ниже «своего» уровня, т. е. назовут ли их с генетических позиций переотложенными.

или вымытыми. Чтобы не подвергать сомнению и проверке каждую обнаруженную форму с позиции инсцитности — переотложенности, целесообразно найти диагностические признаки «переотложенных» форм. Такими признаками будут окатанность, обломанность, потертость органических остатков.

Интересно, что во всех рассмотренных случаях (с первичными и вторичными границами, с нормальными или опрокинутыми залеганиями, с фауной *in situ* или переотложенной) аномалии легко распознаются и исключаются, когда их анализируешь с помощью уже построенной, и к тому же высококачественной, геохронологической шкалы. Если начинать построение последовательности с аномальных участков и не подвергать разрезы перебору по частям, многие необходимые для корреляции стратифицирующие признаки будут безвозвратно потеряны. Очевидно поэтому, какую важность приобретают разрезы, с обработки которых целесообразно начинать построение, — опорные разрезы. Они должны удовлетворять таким требованиям: быть максимально длинными (по сравнению с остальными известными в районе описанными разрезами), содержать максимальное число признаков (т. е. быть наиболее детально и полно изученными) и не обладать диагностическими признаками, позволяющими предполагать наличие надвигов, опрокинутых залеганий, переотложенных форм. Такой подход позволяет резко сократить вычислительные затраты.

У всех «стратиграфических аномалий» есть одна общая черта. Для каждой из них считаются обязательными некоторые морфологические особенности. Для переотложенной фауны это окатанность, обломанность, другие следы переноса; для взбросов, надвигов — наличие приразломных дислокаций и зоны разлома: самой трещины, заполненной глинами трения или милонитами, брекчированных пород рядом с трещиной; для опрокинутых залеганий — замки изоклинальных складок. И тем не менее, для выделения каждого из этих феноменов обычно оказывается достаточно одного лишь возникновения стратиграфической необходимости». Более того, заключения о переотложении фауны, изображение на карте взбросов, надвигов, изоклинальных складок предпринимаются не только тогда, когда их необходимые морфологические характеристики не установлены, но даже тогда, когда установлены характеристики прямо противоречащие.

«Визейских *Striatifera striata* (Fisch.) в турнейские отложения не «переотложишь», но если форма, известная в более древних отложениях, обнаруживается в более молодых, ее считают переотложенной» [23, с. 101]. Переотложенными считают гигантские скопления костей наземных позвоночных и отдельные остатки морских беспозвоночных с сохранившимися мельчайшими деталями тонкой хрупкой скульптуры. Объяснения, конечно, находятся — полуфантастические силы водных стихий, бережный «перенос в породе». Для расширения набора объяснений стратиграфических аномалий в распределении органических остатков (всего двух — выше и ниже «своего» уровня) предложены такие понятия, как реликтовые,

суперститовые, криптосуперститовые, скрытозапоздалые, остаточные, колоннальные фауны, баррандовские колонии [24]. И не беда, что «понятие о суперститовых фаунах было введено Ф. Фрехом на примере, который впоследствии оказался ошибочным» [24, с. 289], а появление баррандовских колоний «согласно новым исследованиям... объясняется тем, что слои с более молодой фауной были вдавлены в результате тектонических движений в отложения, содержащие более древнюю фауну» [24, с. 292], т. е. совсем не тем, чем объяснял его катастрофист И. Барранд, и не тем, чем объясняли его эволюционисты Ч. Лайель и Ч. Дарвин. Была бы «стратиграфическая необходимость», а объяснения всегда найдутся! У геолога-полевика В. П. Нехорошева просто не хватило фантазии: если визейскую *Striatifera striata* (Fisch.) нельзя переотложить в турнейские отложения, то ее можно туда вдавить в результате тектонических движений.

Красную линию надвига проводят на карте не только по задернованным, необнаженным участкам, где ничего не видно, но и в прекрасно обнаженных районах, где наблюдаются параллельность поверхности самого надвига слоям выше- и нижележащих блоков, отсутствие приразломной плейчатости и где полость разлома — зона рассланцевания или милонитизации — не устанавливается без микроскопа; речь идет не только о мелких нарушениях, а о гигантских покровах — шарьяжах амплитудой в десятки километров. Выводы о тектоническом характере поверхности таких шарьяжей иногда делаются только на основании данных фауны о налегании более древних толщ на более молодые.

Опрокинутые залегания картируются не только тогда, когда наличие перегибов, замков изоклинальных складок остается неустановленным, но и тогда, когда достоверно установлено их отсутствие в изученном объеме пространства. Все это объясняется так: замки расположены глубже, под поверхностью, и поэтому не вскрыты выше, над поверхностью, и размыты сбоку, на сопредельной территории.

Так не лучше ли, если объяснения ничего не добавляют к самим фактам «стратиграфических аномалий», признать: и понятие опрокинутых залеганий и надвигов, взбросов, и переотложенной, вымытой, суперститовой, колониальной фауны введены только с целью сохранения качества инструмента идентификации — геохронологической шкалы.

Дальнейшие пути детализации вернеровской модели

Так как введенное понятие несогласной границы является предельно общим, сначала предстоит выделить стратиграфические и тектонические несогласные границы — разделить размыты от разломов.

После разделения разломов и размывов следующим этапом должно быть выделение подклассов внутри каждого из них. Уже одно это представляет собой обширную область геологических ис-

следований, охватывающую значительную часть тектоники и структурной геологии.

Когда логическая процедура определения каждого конкретного типа несогласия будет сформулирована, ее можно будет реализовать на ЭВМ. Выделение несогласий на геологической карте, как и синхронизацию и идентификацию, можно будет выполнять автоматически.

В результате решения задачи идентификации получаем стратиграфическую схему. «Полный скоррелированный свод этих подразделений (свит, серий, горизонтов) любого региона образует его стратиграфическую схему — своеобразную модель, отражающую положение стратиграфических тел в исследуемом пространстве» [36, с. 159]. Своеобразие стратиграфической схемы как модели строения данного региона заключается в том, что она отражает только топологические пространственные характеристики стратиграфических тел (последовательность, непрерывность, односвязность, соприкосновение), причем только «первичные» — без учета несогласий. Затем, после исключения «мнимых» объектов, внесения данных о реальных, согласных или несогласных, отношениях в каждом конкретном разрезе, получаем топологическую модель взаимоотношений геологических тел. В этой модели отсутствует информация о форме и размерах геологических тел, их дислокациях, точном положении в координатной системе, параллельности или непараллельности их границ, прямолинейности или криволинейности, выпуклости или вогнутости, угловатости или гладкости границ — другими словами, обо всех метрических, аффинных, проективных и дифференциальных свойствах и отношениях. Построение геологической карты по данным такой модели можно представить как пополнение ее отсутствующей геометрической информацией нетопологического характера.

Таков один из путей дальнейшего усложнения и дополнения модели Вернера, связанный с геологическим картированием.

Еще более несомненно, что на результатах, полученных стратиграфией, а следовательно, и на модели Вернера, строятся палеогеография и историческая геология. Стратиграфические понятия и модели используются во всех других геологических дисциплинах, оперирующих геологическими временными характеристиками. И наконец, завершением любого исследования можно считать поиски полезных ископаемых, когда необходимы данные и стратиграфии, и тектоники, и геологического картирования, и палеогеографии, и исторической геологии. Математическая формулировка последних усложнений и дополнений модели Вернера — задача будущего, но так или иначе она может быть фундаментом единой науки — геологии нашего времени.

Любая однозначная последовательность действий может быть реализована на ЭВМ. Именно такова предложенная в предыдущем разделе последовательность логического вывода стратиграфических понятий. Конкретные региональные стратиграфические объекты можно строить путем обработки исходных данных некоторых описанных разрезов в соответствии со всеми условиями, содержащимися в цепи определений. Автоматическое прослеживание стратиграфических подразделений от разреза к разрезу делает технологией процедуру, требующую в настоящее время от геологов огромных затрат творческих усилий.

Все этапы обработки фактического материала вплоть до получения окончательного результата показаны на примере сопоставления неогеновых разрезов Усть-Камчатского района. Кроме иллюстративной роли, устькамчатский участок будет играть роль полигона для практической проверки эффективности разработанных методов. Так как принятые определения и последовательность логического вывода всех временных геологических понятий по замыслу должны были представлять собой формализацию, логикоматематическое уточнение традиционных геологических понятий и операций, то и машинная реализация логических процедур должна приводить к тому же результату, который дают традиционные методы в очевидных, бесспорных ситуациях.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Геологическое строение полигона

Устькамчатская серия выходит на поверхность непосредственно южнее нижнего течения р. Камчатки, в 20—30 км юго-западнее Усть-Камчатска. Здесь находится крупная антиклинальная складка, восточное крыло которой скрыто под рыхлыми отложениями прибрежной морской равнины. В ядре антиклинали в нескольких небольших обнажениях вскрыты подстилающие устькамчатскую серию песчаники, аргиллиты и зеленые полосчатые кремни березоваярской серии (видимая мощность 80 м). Западное крыло представляет собой пологую моноклираль с углами падения 5—30°.

Отложения устькамчатской серии в пределах западного крыла служили объектом специального изучения во время геолого-съёмочных и стратиграфических работ. В результате многолетних трудоемких полевых и камеральных исследований была осуществлена корреляция разрезов, построена геологическая карта. Вся работа проводилась традиционными геологическими методами, фактический материал — обычные полевые геологические описания.

Рассмотрим разрез устькамчатской серии (снизу вверх):

1. Конгломератовая толща, представленная преимущественно зелеными косослоистыми конгломератами 180 м
2. Песчано-аргиллитовая толща с остатками растений — кремнистые аргиллиты микрополосчатые, песчаники мелкозернистые тонкополосчатые 600—800 »
3. Пачка кремней и кремнистых аргиллитов 100 »
4. Два горизонта аргиллитов, различающихся между собой устойчивостью к выветриванию 90 »
5. Нижняя флишевая толща — отдельные песчано-аргиллитовые ритмы, аргиллитовые, олистолитовые, подводнооползневые горизонты 600—900 »
6. Угленосный горизонт — гравелиты, крупнозернистые песчаники, реже — кремнистые аргиллиты 70—175 »
7. Верхняя флишевая толща аналогична по составу нижней 70—150 »

Фактический материал

Приведенное описание геологического строения полигона предназначено только для информации и дает лишь необходимые представления о геологической обстановке. Никакие из полученных результатов не были использованы при обработке на ЭВМ. Единственным исходным фактическим материалом служили конкретные разрезы, в которых фиксировано распределение наблюдаемых признаков как литологических, так и палеонтологических: остатки флоры, фауны, микрофлоры, микрофауны. Ни одному из них не было отдано предпочтения.

Литологические признаки: 1) зеленый полосчатый кремень, 2) глыбовый конгломерат, 3) зеленый косослоистый конгломерат, 4) мощные (более 20 м) пачки зеленого косослоистого конгломерата, 5) конгломерат. Ясно, что перечисленные признаки не формируют взаимоисключающих классов. Один и тот же объект, например, может обладать одновременно признаками 2, 3, 4, 5. Более того, если какой-то объект обладает признаком 4, то он обязательно будет обладать и признаками 3 и 5. Для признаков 2 и 3 на данном эмпирическом множестве может оказаться, что реальные классы объектов, формируемые ими, не пересекаются — ни одна из пачек зеленых косослоистых конгломератов не является одновременно пачкой глыбовых конгломератов. Более того, на данном множестве объектов признаки 2 и 3 могут оказаться стратифицирующими — если все пачки глыбовых конгломератов в изученных разрезах будут всегда выше пачек зеленых косослоистых конгломератов, или наоборот. Так это или нет, покажет только обработка материала. Признаки же 3, 4 и 5 ни при каких обстоятельствах не могут быть стратифицирующими относительно друг друга. Но любой из них может оказаться стратифицирующим относительно, например, признака 1, других литологических, палеонтологических признаков. Какой из них — заранее неизвестно; также неясно, какой будет наиболее полезен при расчленении и корреляции. Признак 5 (конгломерат) не может иметь более узкого возрастного диапазона, чем признак 3 (зеленый косослоис-

тый конгломерат), но зато признак 3 не может иметь более широкого распространения, чем признак 5. Так как до обработки материала неизвестно, какой из них имеет больше возможности стать руководящим, необходимо сохранить и учесть оба признака.

Другие литологические признаки: 6) бурый рыхлый песчаник, 7) бурый рыхлый песчаник (прослой более 0,5 м), 8) песчаник черный тонкополосчатый, 9) аргиллит белесый микрополосчатый... 20) олистоциты, 21) подводнооползневые дислокации, 22) внутриформационные несогласия, 23) гравелит или крупнозернистый песчаник черный рыхлый, 24) известняк-ракушняк, 25) уголь.

В список литологических признаков не включены песчаник и аргиллит. Практически во всех описанных разрезах они распространены снизу доверху, значит, относительно любого другого признака они будут нестратифицирующими, никакой пользы для расчленения и корреляции не принесут, обрабатывать их, попусту перегружать машину ни к чему. Конечно, строго говоря, это может выясниться только после обработки материала, но результат в данном случае очевиден.

По той же причине в признаках 3 и 6 выделены более дробные подразделения: пачки зеленого косослоистого конгломерата мощностью более 20 м (а не 1 м и не 100 м) и прослой бурого рыхлого песчаника мощностью более 0,5 м. При описании разрезов, очевидно, такое выделение позволяет надеяться на какую-то пользу, а выделение пачек зеленого косослоистого конгломерата мощностью, например, более 1 м — не позволяет, так как зеленый косослоистый конгломерат везде, где он есть, образует пачки мощностью более 1 м.

Конечно, можно подойти к выделению признаков чисто механически, но тем самым мы неоправданно затрудним вычисление.

Палеонтологические признаки: флора — 26) минерализованные хвоинки (*Tsuga?*). Для нас неважно, действительно ли данное образование есть остатки именно *Tsuga* и даже действительно ли это хвоинки, а не что-то иное. Главное, что во всех случаях в нашем материале это всегда одно и то же, и всегда не то, что обозначено другими названиями — например, не конгломерат (5) и не устрица (92); 27) *Ulmus*, 28) *Alnus...*, 39) отпечатки листьев наземных растений; микрофлора, микрофауна — 40) *Arachnoidiscus*, 41) *Coscinodiscus*, 42) *Isthmia*, 43) *Thalassiosira*, 44) *Centrales*, 45) диатомеи, 46) спикеры губок; фауна — 47) *Yoldia nitida*, 48) *Y. nitida* (много). Находки двустворки *Yoldia nitida* встречаются как единичными экземплярами, так и массовыми скоплениями. Нельзя ли из этого факта извлечь какую-либо стратиграфическую пользу? С этой целью попробуем включить скопления раковин *Yoldia nitida* в качестве отдельного признака, 49) *Yoldia chehalisensis*, 50) *Y. chehalisensis* (много), 51) *Y. watasei*, 52) *Y. deformis...*, 60) *Yoldia*, 61) *Yoldia* (много), 62) *Nuculana tumiensis*, 63) *N. tumiensis* (много), 64) *N. crassa-*

telloides, 65) *N. robai*, 66) *N. alferovi*, 67) *N. alferovi* (много), 68) преобладание *N. alferovi* в комплексе органических остатков, 69) *Nuculana*, 70) *Nucula* ..., 94) *Cardita pacifera*, 95) *Cardita*, 96) *Cardiidae* ..., 135) *Dentalium*, 136) моллюски, 137) офиуры, 138) морские ежи, 139) морские ежи (много), 140) морские звезды, 141) иглокожие...

В отдельных описанных разрезах часто встречаются постоянные комбинации некоторых признаков: 147) *Nucula* (много) и *Thyasira* (много), 148) *Nuculana tumiensis* (много) и *Yoldia chehalisensis* (много), 149) морские ежи и много *Yoldia nitida*.

Распределение перечисленных 149-ти признаков фиксировалось в 15-ти послойно описанных разрезах (см. рис. 11).

Слоями будем считать произвольно выделенные интервалы разреза. Границы интервалов могут быть проведены или по смене литологических характеристик, или через равные промежутки — через 100 м, через 1 м, через 10 см, или любым другим образом. Необходимое требование — принятое разбиение разреза на интервалы нельзя изменять вплоть до конца всей процедуры синхронизации. Если некоторый признак фиксирован в интервале хотя бы в одной точке, будем считать его распространенным от нижней границы интервала до верхней. Поэтому слишком большие интервалы не выгодны, так как многие признаки, которые при более детальном разбиении следовали бы на разрезе один за другим, перейдут в разряд нестратифицирующих. Слишком узкие интервалы также не выгодны — их будет слишком много, что приведет к излишним вычислительным затратам. Кроме того, многие признаки в узких интервалах не имеют смысла: крупные окаменелости в сантиметровых интервалах, соотношения мощностей песчаных и аргиллитовых прослоев во флише, — в 10-сантиметровых и т. д.

Практически в качестве интервалов в разрезе выделяются или характерные по литологии пласты, или отдельные маломощные выходы при неполной обнаженности разреза. В случае полностью обнаженного мощного литологически недифференцированного разреза, например в монотонной толще флиша, выделялись примерно 10-метровые интервалы. Описать километровые мощности более детально потребовало бы слишком больших затрат дефицитного полевого времени.

Приведем в качестве примера фрагмент одного из описанных разрезов. Так как один и тот же признак часто повторяется в описании, удобнее заменить его длинное название номером. Такая замена создает некоторые удобства и для машинной обработки, хотя вводить в ЭВМ можно было бы и текстовые данные. Описание, как обычно, ведется снизу вверх. Нумерация слоев в каждом разрезе своя, независимая от нумерации в других разрезах.

Разрез I (береговой обрыв у дороги Хваленка — Горбуша, среднее течение р. Горбуши) представлен в следующей последовательности слоев (снизу вверх):

- 1) признаки 2, 3, 5, 6;
- 2) 3, 4, 5;
- 3) 2, 3, 4, 5, 6, 7, 27, 28, 30, 32, 39;
- 22) 15, 26, 47, 48, 49, 51, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 64, 65, 69, 72, 75, 76, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 90, 94, 95, 96, 98, 102, 109, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 125, 126, 127, 131, 132, 136;
- 23) 15, 55, 60, 136;
- 104) 17, 19, 47, 55, 56, 57, 60, 61, 66, 67, 68, 69, 70, 79, 95, 107, 132, 135, 142, 143, 144;
- 105) 17, 19, 21, 22;
- 106) 5, 23, 24, 79, 81, 84, 92, 93, 132, 134, 136, 146;
- 107) 17.

ПЕРЕБОРНЫЕ АЛГОРИТМЫ

Так как инструментом корреляции является геохронологическая шкала — наилучшая стратифицирующая последовательность среди всех, которые можно построить по данному фактическому материалу, предстоит перебрать все возможные последовательности, оценить каждую по сумме частот и выбрать наилучшую по этому критерию. Для построения последовательностей необходимо знать отношения между признаками. Чтобы установить отношения, нужны данные о распространении каждого признака в описанных разрезах.

Распространение признака будет определяться двумя его границами — нижней и верхней. Граница признака — множество точек, представляющих собой верхний (верхняя граница) и нижний (нижняя граница) пределы распространения этого признака в изученных разрезах. Точка понимается по Евклиду — «то, что не имеет частей». Если послойно описанный разрез разделен, например, на 107 слоев, это означает, что каждый такой слой представляет собой нечто целое, неделимое при принятой процедуре описания, не имеющее частей. Реальные размеры такой «точки» зависят от детальности описания. При маршрутном описании точкой (которую называют в полевой практике точкой наблюдения) может быть огромное обнажение, в котором не выделено верхней и нижней частей, находки органических остатков не привязаны к различным слоям этого обнажения.

Так как объемы обрабатываемой информации и в приводимом примере велики, и наши методические рекомендации также ориентированы на обработку массового материала, все операции программируются, вся обработка осуществляется на ЭВМ.

Ниже излагаются некоторые варианты переборных алгоритмов. Возможна и другая техническая реализация логических процедур.

Установление границ распространения признаков

На первом этапе обработки исходных данных анализируется распространение каждого признака по всем описанным разрезам.

Результатом является таблица, в которой каждый признак записан двумя строками чисел.

Распространение флиша (17), например, будет записано:

$$17 \left\{ \begin{array}{l} 107 \ 61 \ 3 \ 13 \ 13 \ 16 \ 6 \ 5 \ 3 \ 2 \ 4 \ 3 \ 4 \ 0 \ 0 \\ 27 \ 7 \ 2 \ 13 \ 13 \ 5 \ 5 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0. \end{array} \right.$$

Числа в нижней строке обозначают номер самого нижнего слоя, в котором фиксирован флиш в первом разрезе — 27, во втором разрезе — 7, в третьем — 2 и т. д.; числа в верхней строке — номер самого верхнего слоя, в котором фиксирован флиш в первом разрезе — 107, во втором — 61, в третьем — 3 и т. д. Если признак 17 не встречен, например, в 14-м и 15-м разрезах, его отсутствие обозначается нулями в обеих строках. Такой признак, как *Yoldia nitida* (47), будет записан двумя границами:

$$47 \left\{ \begin{array}{l} 104 \ 52 \ 3 \ 0 \ 0 \ 12 \ 5 \ 3 \ 3 \ 2 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 22 \ 6 \ 3 \ 0 \ 0 \ 5 \ 3 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0. \end{array} \right.$$

Как считает О. Б. Солдатов [12], этой информации о распространении признака достаточно для установления стратиграфических отношений между признаками и для всех дальнейших построений. Распространены двусторонки *Yoldia nitida* в первом разрезе во всех слоях между 23-м и 103-м или не найдены ни в одном из них, есть ли они хоть в каком-то из слоев с 6-го по 11-й в шестом разрезе — ни на какие дальнейшие выводы не повлияет.

Установление отношений между признаками

Каждый из 149 признаков сравнивается со всеми остальными. При этом номера слоев I-го признака в первом разрезе сравниваются с номерами слоев K-го признака в первом разрезе, номера во втором — с номерами во втором и т. д.

Если при сравнении I-го и K-го признаков выяснилось, что либо обе сравниваемые пары номеров нулевые, либо какая-то одна из них нулевая, то признаки I и K не имеют стратиграфических отношений. Например, признаки 45 (диатомеи) и 108 (*Limatula pilvoensis*) не имеют стратиграфических отношений:

$$45 \left\{ \begin{array}{l} 10 \ 0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \\ 10 \ 0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0. \end{array} \right.$$

$$108 \left\{ \begin{array}{l} 0 \ 3 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 3 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0. \end{array} \right.$$

В первом, четвертом, девятом и тринадцатом разрезах найдены диатомеи, но отсутствуют *Limatula pilvoensis*, во втором, третьем и седьмом разрезах присутствуют *Limatula pilvoensis*, но не обнаружены диатомеи и, наконец, в пятом, шестом, восьмом, десятом, одиннадцатом, двенадцатом, четырнадцатом и пятнадцатом разрезах не фиксировано ни того, ни другого признака.

Если при сравнении I-го и K-го признаков выяснилось, что везде, где сравниваемые пары цифр одновременно ненулевые, номер нижней границы I-го признака больше номера верхней границы K-го признака, то I-й признак выше K-го. Например, признак 47 (*Yoldia nitida*) выше признака 39 (отпечатки листьев наземных растений):

$$47 \begin{cases} 104 & 52 & 3 & 0 & 0 & 12 & 5 & 3 & 3 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 22 & 6 & 3 & 0 & 0 & 5 & 3 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{cases}$$

$$39 \begin{cases} 10 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{cases}$$

Одновременно являются ненулевыми только пары номеров в первом и седьмом разрезах, и в обоих нижняя граница признака 47 выше верхней границы признака 39.

Если хотя бы в одном из разрезов интервал вертикального распространения одного признака частично перекрывает интервал вертикального распространения другого признака, то эти признаки — нестратифицирующие относительно друг друга. Нестратифицирующими являются признаки 17 (флиш) и 136 (моллюски):

$$17 \begin{cases} 107 & 61 & 3 & 13 & 13 & 16 & 6 & 5 & 3 & 2 & 4 & 3 & 4 & 0 & 0 \\ 27 & 7 & 2 & 13 & 13 & 5 & 5 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{cases}$$

$$136 \begin{cases} 106 & 52 & 3 & 13 & 12 & 13 & 5 & 4 & 3 & 2 & 4 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 19 & 1 & 1 & 11 & 12 & 3 & 3 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{cases}$$

Анализируя данные первого же разреза, можно сделать вывод: вертикальный диапазон флиша 27—107, а моллюсков 19—106. Такие же отношения перекрытия (в частности, совпадения, включения) вертикального распространения флиша и моллюсков фиксируются в разрезах 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12.

Если K-й признак в одном разрезе выше I-го, а в другом — наоборот, I-й выше K-го, то признаки I и K — также нестратифицирующие относительно друг друга. Таковы, например, признаки 66 (*Nuculana alferovi*) и 117 (*Taras*):

$$66 \begin{cases} 104 & 52 & 0 & 0 & 0 & 13 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 24 & 50 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{cases}$$

$$117 \begin{cases} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{cases}$$

В шестом разрезе 66-й признак выше 117-го, а в восьмом — наоборот. В других разрезах между ними нет стратиграфических отношений.

В результате проведенных сравнений устанавливаются стратиграфические отношения признаков. Можно построить матрицу отношений, в которой будет 149 строк и столько же столбцов. В i-й строке матрицы ставится 0 на пересечении с k-м столбцом, если

признаки I и K не имеют стратиграфических отношений, 1 — если I выше K, 2 — если I ниже K, и 3 — если признаки I и K — нестратифицирующие относительно друг друга. Главная диагональ заполняется нулями.

В соответствии с определением стратиграфических отношений, данным в первом разделе, если на пересечении i -й строки с k -м столбцом стоит 0 или 3, то и на пересечении k -й строки с i -м столбцом стоит тот же знак 0 или 3; если на пересечении i -й строки с k -м столбцом стоит 1 или 2, то на пересечении k -й строки с i -м столбцом стоит символ противоположного отношения 2 или 1. Таким образом, уже треугольник под (над) главной диагональю содержит всю информацию о стратиграфических отношениях признаков.

• Сбраковка материала

Наши первые программы построения матрицы и шкалы были написаны на языке АЛГОЛ (программист Н. Ф. Арцимович). Обработка многих массивов исходных данных по этим программам показала, что построение матрицы отношений происходит быстро, а вот осуществление полного перебора всех возможных последовательностей требует значительных затрат машинного времени.

С увеличением размерности матрицы время счета, как правило, увеличивается. Но увеличение это нельзя описать ни линейной, ни какой иной зависимостью от количества признаков. Гораздо большее значение, чем количество признаков, имеют их взаимоотношения друг с другом, т. е. структура массива исходных данных. Сколько бы мы ни вводили в матрицу строк с одними тройками и нулями (соответствующих признакам, не являющимся стратифицирующими относительно какого-либо другого), время счета почти не будет возрастать. С другой стороны, если в материале есть только один признак А, пригодный в качестве начала шкалы, и добавится еще один признак В, распространенный совершенно так же, как и А, очевидно, что время счета возрастет ровно вдвое — все те последовательности, которые строились начиная с А, будут строиться и начиная с В. В общем случае сильно отражается на времени счета добавление признаков, полностью эквивалентных какому-то другому, признаков, стратифицирующих относительно большого числа других. Имеет значение не только, какой признак добавляется, но и к какому массиву.

Необходимо найти какие-то резервы для экономии машинного времени. Прежде всего можно сократить исходный массив признаков. Как считает Е. И. Гончарова, признаки, встреченные в единственном разрезе, не принесут никакой пользы для синхронизации. Смысл синхронизации состоит в том, чтобы по сходству какого-то признака сравнить друг с другом слои хотя бы двух разных разрезов. Если же признак встречен в единственном разрезе, по нему нельзя произвести никакого сравнения. Допустим, по наличию такого признака в разрезе выделено некоторое стратиграфи-

ческое подразделение. Оно не может быть прослежено за пределы разреза. В стратиграфической практике считается преждевременным его выделение. Выделять стоит только такие стратиграфические подразделения, которые прошли проверку на прослеживаемость. Предлагает выбрасывать признаки, распространенные в единственном разрезе, и М. П. Рубель [48]. Так как их отбраковка затрагивает существо синхронизации, а не только экономию машинного времени, очевидно, вычислительные трудности сыграли в данном случае положительную роль: заставили обратить внимание на эту неотъемлемую особенность синхронизации.

Из 149 признаков, фиксированных в устькамчатском материале, выявлено 37 распространенных в единственном разрезе. Так, зеленые полосчатые кремни (1) встречены только в четырнадцатом разрезе, отпечатки листьев *Populus* (12) — только в первом, моллюски *Trominina* cf. *umbelliformis* (124) — только во втором и т. д. Для дальнейших построений остаются 112 признаков, но и они понадобятся не все.

Е. И. Гончаровой отмечено, что если признак I распространен во всех тех и только тех разрезах, где распространен K, и если к тому же вертикальное распространение I и K во всех разрезах полностью совпадает, что их отношения со всеми остальными признаками будут одинаковыми. Если построена последовательность с участием I, то точно такая же последовательность будет построена и с K вместо I, и наоборот.

Эту идею можно развить дальше. Если признак K распространен во всех тех и только тех разрезах, где распространен признак I, и его вертикальный диапазон во всех разрезах включает вертикальный диапазон признака I, то K будет иметь стратиграфические отношения с теми и только с теми признаками, что и I, причем эти отношения будут такими же или худшими: вместо «полезных» отношений «выше — ниже» могут появиться отношения нестратифицирования. Если с участием признака K может быть построена последовательность, то она может быть построена и с участием K. Обратное будет верно не всегда.

Отбраковка признаков K, имеющих такое же распространение, что и I, и вертикальный диапазон, включающий вертикальный диапазон признака I, была проведена на устькамчатском материале. Включающими считались вертикальные диапазоны и более широкие, чем данный, и идентичные ему. На этом этапе был исключен еще 31 признак. Например, признаки 41 (*Coscinodiscus*) и 44 (*Centrales*) оказались распространенными совершенно одинаково:

$$44 \left\{ \begin{array}{l} 10\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 2\ 0\ 0 \\ 10\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 2\ 0\ 0. \end{array} \right.$$

$$41 \left\{ \begin{array}{l} 10\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 2\ 0\ 0 \\ 10\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 2\ 0\ 0. \end{array} \right.$$

Принято произвольное решение, исключен признак с большим номером — *Centrales* (44).

Из признаков 9 (аргиллит белесый тонкополосчатый) и 11 (кремень черный стекловатый), имеющих идентичное распространение, 9-й признак имеет в нескольких разрезах более широкое вертикальное распространение, чем 11-й, а в одном — совпадающее.

$$9 \begin{cases} 17 & 0 & 0 & 10 & 8 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{cases}$$

$$11 \begin{cases} 17 & 0 & 0 & 10 & 8 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 16 & 0 & 0 & 10 & 8 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{cases}$$

По оставшемуся 81-у признаку была построена матрица. Анализируя строки этой матрицы, можно выявить и другие признаки К, не лучшие, чем I, сверх выявленных ранее. Если признаки I и К являются нестратифицирующими относительно друг друга или не имеют между собой стратиграфических отношений, а со всеми остальными признаками, по которым построена матрица, имеют одинаковые отношения, ясно, что один из них можно не учитывать при переборе: любой, если их частоты одинаковые, или имеющий меньшую частоту, если их частоты неодинаковые. Если же признак К с некоторыми из этих остальных имеет худшие отношения, чем признак I, что в матрице устанавливается по наличию троек в k-й строке на пересечении с теми столбцами, где в i-й строке единицы, двойки или нули, то (при условии равной или меньшей частоты) признак К можно не учитывать при построении шкалы. Путем сравнения каждой строки матрицы со всеми остальными была проведена последняя отбраковка, в результате которой были исключены еще 19 признаков. После сравнения двух признаков: 15 (аргиллит серый крепкий с конкрециями) и 26 (минерализованные хвоинки — *Tsuga?*) — первый из них был оставлен для дальнейшей обработки, а второй выброшен:

$$15 \begin{cases} 23 & 4 & 1 & 11 & 11 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 19 & 1 & 1 & 11 & 9 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{cases}$$

$$26 \begin{cases} 22 & 3 & 1 & 7 & 11 & 1 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{cases}$$

Остается 62 признака для дальнейшей обработки, которая начинается с построения матрицы отношений 62×62 .

Построение шкалы

Для каждого признака подсчитывается его частота — количество разрезов, в которых встречен данный признак.

Далее предстоит построить из номеров строк матрицы отношений все возможные стратифицирующие последовательности, т. е. такие ряды, чтобы строка матрицы, соответствующая любому члену ряда, кроме первого, имела элемент 1 на пересечении со столб-

цом, соответствующим предыдущему члену ряда, и элементы 0 или 1 на пересечении со столбцами, соответствующими всем остальным предшествующим членам ряда. Это условие означает, что в каждом ряду каждый признак выше предыдущего и либо выше всех остальных предшествующих, либо не имеет с некоторыми из них стратиграфических отношений. Для каждой последовательности подсчитывается сумма частот всех признаков, входящих в эту последовательность. В качестве геохронологической шкалы выбирается последовательность с наибольшей суммой.

Построение последовательностей начинается с поиска признаков, каждый из которых может служить началом одной из них; наиболее подходящими для этого являются, конечно, признаки, залегающие ниже всех остальных (в матрице им соответствуют строки, содержащие только двойки). Однако таких строк может не оказаться. Может не оказаться в некотором исходном материале и признаков, расположенных ниже всех тех, с которыми они имеют стратиграфические отношения (т. е. признаков, которым соответствуют строки матрицы только с двойками и нулями). В качестве начала стратифицирующей последовательности резонно выбрать такой признак, который хотя бы не имеет отношений «выше» ни с одним из других. В матрице ему соответствует строка без единиц. Однако и таких признаков может не оказаться [12, 28]. Поэтому следует найти строки с минимальным количеством единиц. Каждый найденный признак будет служить началом какой-либо стратифицирующей последовательности.

Первый из найденных признаков (допустим, имеющий наименьший среди них порядковый номер) будет началом первой строящейся последовательности. Пусть им будет K . В качестве второго члена пригоден любой признак S , имеющий отношение «выше» с K . Но если имеется другой признак P , которому соответствует в матрице строка с символом 1 на пересечении с k -м столбцом и с символом 2 на пересечении с s -м столбцом, последовательность K, S может быть расставлена: K, P, S . При каждом наращивании последовательности следует искать непосредственное ее продолжение, такое, чтобы она не могла быть расставлена никакими из имеющихся признаков. В противном случае, очевидно, последовательность не может иметь наибольшей суммы частот, т. е. не может быть геохронологической шкалой [12].

Но если в процессе достроения последовательности A, B, C найдены три возможных непосредственных ее продолжения L, Y, X , можно построить сразу три последовательности: 1) A, B, C, L , 2) A, B, C, Y и 3) A, B, C, X . Первая последовательность будет достраиваться, а две другие запоминаются. После того как достроена до конца первая последовательность, достраиваются до конца по порядку вторая и третья.

Приведем последовательность процедур алгоритма «Частокол» (при разработке учтены рекомендации Е. И. Гончаровой, В. Н. Долбнина, Н. В. Каретниковой):

1) подсчитывается количество единиц в каждой строке матри-

цы и находятся строки с минимальным количеством единиц. Они будут первыми членами строящихся последовательностей, остальные строки матрицы заносятся в список V подлежащих просмотру: далее процедура вторая;

2) все возможные i -е продолжения данной последовательности, кроме первого из них, заносятся в массив P ; с первым из i -х продолжений выполняется процедура третья;

3) найденным признаком достраивается текущая последовательность; список V подлежащих просмотру строк перегруппируется; для дальнейшего достроения последовательности следует просматривать только первые V_i строк, имеющих 0 или 1 на пересечении со столбцом, соответствующим последнему члену ряда, определенному предыдущей процедурой. Те признаки из V_i , которым соответствуют строки, имеющие 1 на пересечении со столбцом, соответствующим последнему члену ряда, фиксируются, кроме того, отдельным списком S ; далее процедура четвертая;

4) анализ списка S : выбираются такие признаки, у которых в соответствующих им строках матрицы нет единиц на пересечении со столбцами, соответствующими другим признакам списка S ; найденные признаки пригодны в качестве непосредственных i -х продолжений последовательности; если таких признаков нет, выполняется процедура пятая, если они есть — процедура вторая;

5) подсчитывается сумма частот последовательности; первая достроенная до конца последовательность будет первым эталоном; каждая следующая сравнивается по сумме частот с эталоном. Если ее сумма больше, чем у эталона, эта последовательность принимается за новый эталон (в противном случае сохраняется старый); далее — шестая процедура;

6) анализ массива P : если среди i -х продолжений остался хотя бы один элемент, выполняется процедура седьмая, если нет — процедура восьмая;

7) из достроенной последовательности отбрасывается последний член; с последним из признаков, хранящихся в массиве P под номером i , выполняется процедура третья; количество номеров массива P сокращается на единицу;

8) если в массиве P есть $(i-1)$ -е продолжения, из них берется последнее для дальнейшего выполнения процедуры третьей, а количество номеров массива P сокращается на единицу. Список V_i строк, подлежащих просмотру, расширяется до V_{i-1} ; если $(i-1)$ -х продолжений нет, переходим к $(i-2)$ -м и т. д. до тех пор, пока в массиве P не останется больше ни одного элемента, тогда задача решена, последний хранящийся эталон будет геохронологической шкалой.

По изложенному алгоритму Н. В. Каретникова написала программу на языке ФОРТРАН-4. Матрица отношений, построенная по 62 признакам устькамчатского материала, обработана на машине ЕС-1020 за 40 мин. Получена шкала (табл. 1). Общее число всех достроенных до конца последовательностей, среди которых выбрана наилучшая, — 13 376.

Программа построения шкалы — только часть единого программного комплекса (программист Н. В. Каретникова). После ввода в обработку данных первичного послойного описания каждого разреза автоматически устанавливается горизонтальное и вертикальное распространение каждого признака, производится отбраковка (первый, второй, третий этапы), строится матрица, по ней шкала. Результаты всех упомянутых операций распечатываются для контроля, анализа и осмысления геологом.

Установление возрастных диапазонов, синхронизация, идентификация

Каждый не попавший в геохронологическую шкалу признак попробуем вставить в шкалу вместо одного или нескольких руководящих признаков. Признак 17, например флиш, образует стратифицирующую последовательность: 3, 38, 11, 15, 52, 17 — с первым, вторым, третьим, четвертым, пятым членами. Его диапазон, в соответствии с определением, сформулированным в первом разделе, (6, 11). Признак 110 (*Crenella*) образует последовательность 3, 38, 11, 110, 148, 20, 68, 23, 54; он расположен между третьим и седьмым членами шкалы, его диапазон (4, 6).

Для автоматического установления возрастных диапазонов [12] следует построить прямоугольную матрицу $l \times m$, где l — число всех признаков, m — число руководящих, столбцы матрицы расположить в порядке нумерации членов шкалы слева направо от 1 до m .

Просматриваются строки прямоугольной матрицы, начиная с первой:

1) просматривается строка слева направо. Если первые ($k-2$) элемента в строке 0 или 1, на $(k-1)$ -м месте элемент 1, на k -м месте 0 или 3, то строке присваивается индекс $i-k$ и проверяется выполнение условия 2. В противном случае также проверяется выполнение условия 2, а строке присваивается индекс $i-1$;

2) просматривается строка матрицы справа налево. Если первые ($k-2$) элемента в строке 0 или 2, на $(k-1)$ -м месте элемент 2, на k -м месте 0 или 3, то строке присваивается второй индекс $j-m-k$. В противном случае строке присваивается второй индекс $j-m$. Таким образом, все признаки получают по два индекса. Приводим результат (табл. 2) в том виде, как он получен на распечатке ЭВМ.

В списке не учтены признаки, распространенные в единственном разрезе, как совершенно бесполезные для корреляции.

Далее можно перейти к установлению возраста каждого слоя.

В 30-м слое первого разреза, например, встречены совместно три признака — флиш (17) с возрастным диапазоном (6, 11), *Crenella* (110) с диапазоном (4, 6), моллюски (136) с диапазоном (4, 11). Возраст 30-го слоя, определенный как область пересечения или общая часть возрастных диапазонов всех присутствующих здесь признаков — (6, 6).

Возрастные диапазоны признаков

№ признака	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Возрастной диапазон	1	1	11	2	2	2	3	2	3	11	11	11	4	8
№ признака	17	18	19	20	21	22	23	24	26	27	28	29	33	34
Возрастной диапазон	11	11	9	8	11	11	10	11	4	2	2	2	2	2
№ признака	35	38	39	41	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
Возрастной диапазон	2	2	2	11	11	11	11	11	8	11	11	11	5	11
№ признака	54	55	56	57	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
Возрастной диапазон	11	11	11	9	11	11	11	11	7	9	7	9	9	9
№ признака	69	70	71	72	74	75	78	79	81	84	85	86	87	88
Возрастной диапазон	11	11	11	11	9	9	9	11	11	11	9	9	6	4
№ признака	89	91	92	95	96	100	101	102	104	105	107	108	109	110
Возрастной диапазон	8	9	11	11	11	11	11	11	8	8	9	4	6	6
№ признака	111	114	116	117	118	119	121	122	125	126	128	132	133	135
Возрастной диапазон	8	9	9	11	11	9	8	9	6	11	8	11	9	9
№ признака	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149
Возрастной диапазон	11	6	9	7	7	9	9	11	9	9	11	8	7	6
	4	6	6	6	3	6	7	7	7	9	10	8	7	6

Проделав те же процедуры со списками признаков по каждому слою всех разрезов, получим следующий результат (табл. 3) в том виде, как он получен на распечатке ЭВМ.

Прежде всего обращают на себя внимание нули в слоях 32, 36, 38, 39, 51 разреза I, в слое 6 разреза VI, в слое I разреза XIV.

Выясним причину отказов в датировке. В 32-м слое разреза I не существует области пересечения возрастных диапазонов всех присутствующих здесь признаков. Признак 125 — *Trominina* имеет диапазон (4, 6), а у таких признаков, как *Nucula* (70), *Thyasira tigilana* (104), *Thyasira* (107), *Liocyma* (111), *Cuspidaria* (116), *Patella* (128), *Turritella* (133), *Dentalium* (135), Brachiopoda (143), возрастные диапазоны только начинаются с седьмого подразделения геохронологической шкалы и заканчиваются в восьмом — одиннадцатом.

Необходимо исключить противоречие, приводящее к отказу в датировке. Как говорилось ранее [28], мы имеем право произвольно поднимать верхнюю границу возрастного диапазона любого признака или опускать нижнюю границу: если признак A донеогенный, то, естественно, можно считать его и дочетвертичным. В данном случае мы можем или поднять верхнюю границу возрастного диапазона признака 125 до 7, или опустить нижние границы признаков 70, 104, 107, 111, 116, 128, 133, 135, 143 до 6. Первый вариант отразится на датировке слоев в двух разрезах (I, II), где распространен 125-й признак, второй вариант — на датировке в семи разрезах (I, II, VI, VIII, IX, X, XI), где распространены перечисленные девять признаков. Принимаем решение расширить диапазон признака 125 (*Trominina*) до (4, 7). Слой 32 разреза I получает возрастной индекс (7, 7). Проверяем, изменилась ли датировка других слоев, где встречены брюхоногие моллюски рода *Trominina* (22-й слой разреза I, 3-й слой разреза II). Изменений не произошло.

После проведения аналогичных процедур слои 36, 38, 39 разреза I получают датировку (7, 7), слой 51 разреза I и 6 разреза VI — датировку (8, 8). Возрастной диапазон признака 63 (*Nuculana tumiensis*) расширен до (4, 7), 87 (*Palliolum* много) — до (7, 8), 109 (*Limatula*) — до (4,7), 137 (офиуры) — до (6, 7). Из-за расширения диапазона 63-го признака менее определенной стала датировка слоя 52 разреза I, где также фиксированы скопления *Nuculana tumiensis* — (7,8). Других изменений нет.

По иной причине не датирован слой I разреза XIV. Здесь указан лишь признак 1 (зеленые полосчатые кремни), не встреченный более ни в одном другом разрезе и потому отбракованный на самом первом этапе как бесполезный для корреляции. Стратиграфическое подразделение, если бы оно было выделено в этом разрезе, не могло бы быть прослежено. Поэтому, в соответствии с принятыми в стратиграфии правилами, его выделение признано необоснованным при имеющемся фактическом материале.

При датировке типичны такие ситуации. Слой 97-й I разреза датирован (7, 11), а вышележащий 98-й слой — (9, 9).

Датировка слоев

№ слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Возраст	1	1	1	2	2	1	2	2	3	2	3	3	2	3	2	
№ слоя	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Возраст	3	3	11	4	4	4	4	4	5	8	8	6	11	6	6	8
№ слоя	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
Возраст	0	11	9	9	0	11	0	0	8	8	7	7	7	7	9	7
№ слоя	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
Возраст	8	11	9	0	7	11	11	9	11	11	11	11	11	11	11	8
№ слоя	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
Возраст	8	9	8	8	8	8	8	9	11	9	11	8	11	11	11	8
№ слоя	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
Возраст	8	8	9	8	8	8	8	11	8	8	8	8	8	8	8	8
№ слоя	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	1			
Возраст	11	11	9	9	9	9	9	9	9	9	10	11	4			
№ слоя	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Возраст	4	8	5	8	6	11	11	8	8	11	11	9	9	11	11	11
Возраст	4	5	5	6	6	5	6	5	6	6	6	7	6	6	6	6

№ сля	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
Возраст	8 6	9 6	9 6	7 7	8 8	11 6	8 7	8 8	8 7	11 6	11 6	11 6	11 6	11 6	11 6	11 6	
№ сля	33	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	
Возраст	11 6	8 5	11 6	11 6	8 7	9 6	11 6	8 7	11 7	8 6	8 7	11 6	8 8	11 6	11 6	9 9	
№ сля	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	Паpес III						
Возраст	9 9	11 6	11 6	11 6	11 6	11 7	11 6	11 6	10 10	11 6	Паpес IV						
№ сля	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Паpес V					
Возраст	2 1	2 1	1 1	2 1	2 2	2 1	2 1	3 3	4 4	8 5	7 6	Паpес VI					
№ сля	6	7	8	9	10	11	12	13	1	2	3	Паpес VII					
Возраст	3 1	3 1	3 4	4 4	4 4	4 4	8 5	7 6	3 3	3 3	4 4	Паpес VIII					
№ сля	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	Паpес IX					
Возраст	8 8	8 8	8 8	8 8	9 9	11 7	10 10	11 6	2 2	3 3	4 4	Паpес X					
№ сля	Паpес VIII			1	2	3	4	5	1	2	3	Паpес XI		1	2	3	4
Возраст	8 6			9 9	10 10	11 7	10 10	11 11	10 10	11 11	10 10	Паpес XII		10 10	11 11	11 11	11 7
№ сля	Паpес XII			1	2	3	4	5	Паpес XIII			1	2	Паpес XIV			
Возраст	11 6			10 10	11 6	10 10	11 6	10 10	11 6	0 0	1 1	Паpес XV		2 1	Паpес XVI		

Примем посылку: если два слоя имеют стратиграфические отношения, то любой более молодой слой выше более древнего и любой более древний слой ниже более молодого. Она играет роль «закона Стено наоборот» — моложе значит выше. Ее введение вызывает интуитивные возражения (разве недостаточно прямого закона Стено?). Однако принятая посылка вполне конструктивна. В самом деле, модель Вернера строится на основе отношений порядка и непрерывности. Для установления отношения непрерывности возрастные характеристики используются (формулировка Циттеля, условия 3—4 предыдущего раздела). Для предсказания стратиграфического порядка возрастные характеристики не применялись — не было соответствующего утверждения. «Закон Стено наоборот» восполняет этот пробел.

Представим себе, что есть две точки а и в, о которых мы знаем, что а моложе в; их стратиграфические отношения неизвестны. Воспользуемся принятой посылкой: как бы ни проходила граница между телами, включающими а и в, мы признаем допустимыми только такие варианты ее проведения, при которых тело с признаком а оказывается выше тела с признаком в. Например, если а расположено западнее в, то граница должна иметь западное падение.

Из принятой посылки следует: если в некотором разрезе есть слой, индексируемый (i, j), то любой нижележащий слой не может иметь индексы больше j и любой вышележащий слой не может иметь индексы меньше i.

В разрезе I имеем:

98) (9, 9);
97) (7, 11).

Но слой 97-ой не может относиться к 10-му или 11-му стратиграфическому подразделению, так как в этом случае получилось бы, что более молодой 97-й лежит ниже более древнего 98-го, чего,

I		II	
107	10—11	61	10—11
106	10	60	10
98—105	9	53—59	9—10
96—97	8—9	50—52	9
51—95	8	49	8—9
48—50	7—8	24—48	8
32—47	7	15—23	7
31	6—7	9—14	6—7
27—30	6	7—8	6
25—26	5—6	5—6	5
24	5	1—4	4
19—23	4		
18	3—4		
16—17	3		
10—15	2		
7—9	1—2		
1—6	1		

согласно принятой посылке, не может быть. Сократим возрастной диапазон 97-го слоя до (7, 9). Однако он не может относиться и к 7-му стратиграфическому подразделению, так как тогда получилось бы, что более древний 97-й слой лежит выше более молодого 83-го слоя (см. табл. 3), имеющего датировку (8, 8). Окончательно получаем 97 (8, 9).

Таким же образом везде, где это возможно, сократим возрастные диапазоны всех слоев. На примере разрезов I и II продемонстрируем полученный результат — см. схему:

Слева от линии разреза — номера слоев, справа — номера стратиграфических подразделений.

Все ли в этой схеме необходимо для идентификации, для прослеживания от разреза к разрезу стратиграфических подразделений?

В разрезе II слой 52 имеет возрастной индекс 9, слой 60 — индекс 10, а слои с 53-го по 59-й — индексы 9—10. Но в соответствии с моделью Вернера (см. первый раздел) на основании только датировки слоев 52 и 60 мы знаем, что граница между 9-м и 10-м стратиграфическими подразделениями пройдет где-то выше 52-го и ниже 60-го слоев, т. е. любой слой с 53-го по 59-й может попасть как в 9-е, так и в 10-е стратиграфическое подразделения. Индексация (9, 10) для слоев 53—59 не противоречит этому выводу, но и ничего не добавляет к нему, не дает никакого ответа на вопрос: где же именно пройдет граница? Уберем со схемы синхронизации индексы, бесполезные для идентификации — получаем схему:

IX	X	XI	VIII	XIII	I	XII							
2—3 1	11 1	2 1	11 10	2—4 1	11 10	5 4 2—3 1	10—11 10 9 6—8	4 2—3 1	11—11 10 6—10	107 106 98—105 51—95 32—47 27—30 24 19—23 16—17 10—15 1—6	10—11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1	3 2 1	10—11 10 6—10 VII 6—11 6 5—6 4 3 2
						VI							
16 15 13 6—12 5 4 3 1—2	10—11 10 9 8 6 5—6 4 3	V		IV									
		13 12 9—11 8 6—7 1—5	6—7 5—6 4 3 2—3 1—2	13 12 11 10 7—9 1—5	6—7 5—6 4 3 2 1								
						XV							
						1—2	1						
						XIV							
						3 2	1—2 1						
						II							
						61 60 50—52 24—48 15—23 7—8 5—6 1—4	10—11 10 8 6 7 6 5 4	III					
								3 2 1	7 6—7 4				

Слева от линии разреза — номера слоев, справа — номера стратиграфических подразделений.

Модель Вернера предоставляет возможности для дальнейших уточнений схемы синхронизации. Стратиграфические подразделения 6—9 во всех разрезах, где однозначно устанавливается именно их присутствие, представлены литологическим набором флишевой формации: ритмичным переслаиванием песчаников и аргиллитов, иногда с присутствием грубообломочной фракции в подошвах ритмов, отдельными пачками рыхлых аргиллитов, подводнооползневыми горизонтами. Иначе говоря, стратиграфические подразделе-

ления 6—9 позволяют проследить от разреза к разрезу единое геологическое тело — нижнюю флишевую толщу.

Стратиграфическое подразделение 10 во всех разрезах, где однозначно установлено его присутствие, литологически совершенно непохоже на флишевую толщу и представлено неслоистыми гравелитами с включением массивных кремнистых аргиллитов, спонголитов, известняков-ракушняков, углей. Стратиграфическое подразделение 10 позволяет проследить также единое геологическое тело — угленосную толщу.

Для слоев 53—59 разреза II, 14 разреза VI, 1 разреза XII и 1 разреза XIII схема синхронизации не дает однозначного ответа, к какому стратиграфическому подразделению они относятся — к 10-му или более древним — 9-му в разрезах II и VI, 6—9-му в разрезах XII и XIII. Так как во всех перечисленных слоях отложения представлены флишем, то решение об их отнесении к 10-му подразделению означало бы признание фациальной изменчивости угленосной толщи. Фациальная изменчивость есть отклонение от исходной, простейшей модели Вернера, а для установления отклонения необходимо обоснование. Решение о фациальных переходах всегда принимается вынужденно. Только если бы было однозначно установлено, что перечисленные пачки флиша в разрезах II, VI, XII и XIII относятся к стратиграфическому подразделению 10, пришлось бы принимать решение о наличии флиша в качестве одной из фаций этого подразделения. Но так как вопрос по данным схемы синхронизации остается открытым, то мы решаем его на основании модели Вернера — перечисленные слои не относятся к 10-му подразделению, они относятся к 9-му подразделению в разрезах II и VI и к какому-то из подразделений от 6-го до 9-го в разрезах XII и XIII. На том же основании слои 107 разреза I, 61 разреза II, 16 разреза VI, 5 разреза VIII, 3 разреза XII и 4 разреза XIII относим к 11-му стратиграфическому подразделению, включающему единое геологическое тело — верхнюю надугленосную флишевую толщу.

Если по схеме синхронизации нельзя однозначно установить, присутствует ли в VI разрезе 7-е стратиграфическое подразделение, то в соответствии с моделью Вернера мы проводим это подразделение в этом разрезе где-то между 6-м и 8-м подразделениями (рис. 11).

Любые варианты идентификации, не нарушающие возрастного порядка, равноправны (см. рис. 11). В дальнейшем будет показано, что такая неоднозначность проведения границ в метрическом пространстве — вовсе не недостаток, а достоинство стратиграфических схем.

Итак, после чисто механического выполнения формальных расчетных операций получены некоторые результаты. Они практически полностью совпадают с имевшимися ранее, полученными традиционными геологическими методами, что подтверждает четкий геологический смысл всех принятых формулировок определений и посылок. Первое стратиграфическое подразделение соответствует

конгломератовой толще, в описанных разрезах оно выделяется с помощью модели и алгоритма там же, где была ранее зафиксирована эта толща. Второе подразделение соответствует песчано-аргиллитовой толще с остатками растительности, третье — пачке кремней и кремнистых аргиллитов, четвертое — нижнему аргиллитовому горизонту, пятое — верхнему аргиллитовому горизонту,

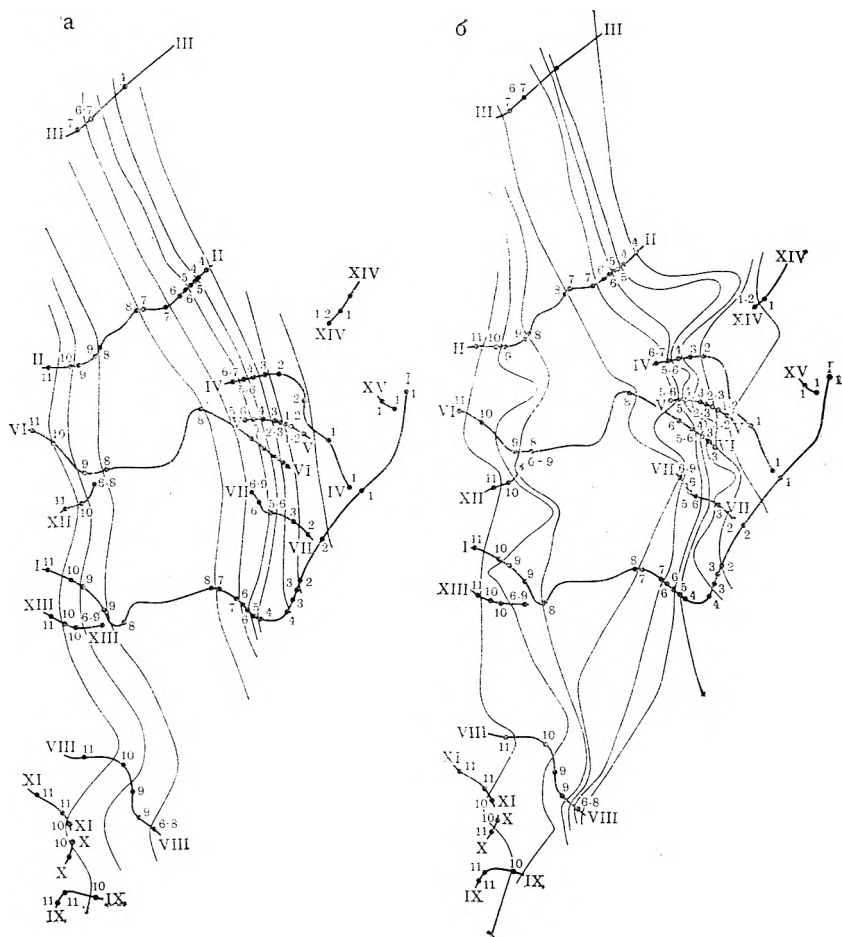


Рис. 11. Равноправные варианты (а и б) проведения границ стратиграфических подразделений.

Арабскими цифрами обозначены номера стратиграфических подразделений

шестое, седьмое, восьмое и девятое представляют собой стратиграфически различные горизонты нижней флишевой толщи, десятое соответствует угленосному горизонту и одиннадцатое — верхней флишевой толще.

Конечно, совпадение с имеющимися результатами можно расценить и по-другому: применяемая методика не дала ничего нового.

Но в данном случае такой задачи и не ставилось. Так как предложенная методика по замыслу должна быть логическим уточнением традиционных геологических методов, совпадение результатов на эталонном участке говорит лишь о решении поставленной задачи.

Нельзя сводить все и к чисто региональным достижениям. Естественно, для корреляции только устькамчатских неогеновых разрезов строить модели, определять понятия, разрабатывать алгоритмы и писать программы не имело бы смысла. Но имеющиеся программы пригодны и для обработки любых других материалов. Они позволят заменить трудоемкие усилия высококвалифицированных специалистов работой лаборантов и операторов ЭВМ. Результаты будут получены однозначные, объективные, многократно воспроизводимые, контролируемые, в них не будет и следа интуитивного, не поддающегося анализу элемента. В запутанных, спорных ситуациях, которых так много в стратиграфии, они дадут возможность выбрать единственное, самое правильное решение. И, наконец, в ситуации с большим объемом исходных данных, где корреляция не очевидна, автоматические методы позволят скоррелировать, проследить слои от скважины к скважине.

Синхронизация по границам

Предположим, нас не устраивает детальность полученной схемы синхронизации. Конечно, можно изучить разрезы более детально, собрать дополнительные коллекции окаменелостей, проанализировать разрезы на микрофауну и содержания некоторых химических элементов в породах всех слоев описанных разрезов и т. д. Но все ли возможности, заложенные в имеющемся фактическом материале, использованы?

Представим простейшую ситуацию (рис. 12). В двух разрезах I и II фиксировано распределение признаков А и В, нестратифицирующих один относительно другого. Последовательности, шкалы не строятся, синхронизация по предложенной методике невозможна. Ясно, что комплексирование признаков, совместное использование комплексных и единичных признаков дало бы возможность построить шкалу: единичный признак А, комплексный признак (одновременное присутствие, сонахождение), единичный признак А. В. Дальнейшая синхронизация очевидна. Такой прием используется в «species range method», как называет его вслед за М. К. Элиасом Л. Ш. Давиташвили [36], а также при синхронизации с помощью анализа фаунистических и флористических комплексов (Д. Л. Степанов, 1958 г.) [36]. Если признаков много, возможно их комплексирование по два, по три и т. д., затем все имеющиеся единичные и полученные комплексные признаки следует обработать совместно, построить шкалу, провести синхронизацию. Однако напрашивающееся решение выглядит прямолинейным, громоздким, к тому же трудно реализуемым технически, так как резко возрастает число обрабатываемых признаков.

Рациональнее другой подход. Возможности образования комп-

лексного признака АВ из двух единичных А и В полностью определяются поведением границ этих единичных признаков: если интервалы их распространения в разрезах перекрываются, то верхняя граница признака А должна быть выше нижней границы признака В. Столь же очевидно, что возможности образования любого комплексного признака из трех, четырех и т. д. признаков также определяются только взаимоотношениями границ составляющих его единичных признаков. Не будем поэтому проводить никакого комплексирования, введем в обработку отдельные границы признаков так же, как вводили ранее сами признаки. Среди границ также возможно выявление стратифицирующих относительно друг друга, из них можно строить стратифицирующие последовательности, шкалы и т. д. Использование границ позволит получить все, что дали бы любые самые замысловатые и громоздкие комплексы. После их обработки уже можно говорить, что все возможности данного фактического материала исчерпаны. Более того, можно схематизировать имеющееся описание разрезов. Если в данном слое данного разреза не фиксировано никакой границы, значит, в нем не происходит никакой смены признаков, и по данному материалу этот слой в отдельности никакими методами не может быть сопоставлен со слоями других разрезов. Его можно выбросить из описания, он несет полезной информации не больше, чем пропуск в описании разреза.

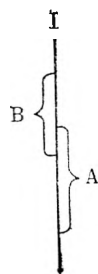


Рис. 12. Нестратифицирующие единичные признаки А и В

Синхронизация по границам довольно обычна в геологической практике. Производятся сопоставления, например, по первому появлению в разрезах известняков, по исчезновению глауконитовых песчаников, по подошве зоны *Monograptus uniformis*, по кровле зоны *Monograptus transgrediens*.

Запишем распространение границ в устькамчатском районе. Распространение, например, нижней границы флиша 17н в 15-ти изученных разрезах будет записано строкой из 15 цифр — 27, 10, 2, 13, 13, 5, 5, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 0, 0; верхняя граница флиша 17в — 107, 61, 2, 13, 13, 16, 6, 5, 3, 2, 4, 3, 4, 0, 0. Аналогично запишем другие границы.

Процедура сравнения границ имеет некоторые отличия от процедуры сравнения признаков.

Допустим, есть какая-то граница J, расположенная в середине литологически однообразной аргиллитовой толщи, постоянно ниже кровли аргиллитов I (рис. 13). Именно такие отношения и фиксированы в разрезах I, II, III. В разрезе IV кровля аргиллитовой толщи не обнаружена, и самый верхний слой, в котором отмечены аргиллиты (по определению, это и будет одна из точек верхней границы аргиллитов I), может совпасть с точкой границы J. Последует вывод о нестратифицировании. Примеры таких ситуаций можно привести и по устькамчатскому материалу. Необходимо

как-то исключить такие «ненастоящие» стратиграфические отношения.

Введем понятие видимой кровли и видимой подошвы. Если верхняя граница некоторого признака в данном разрезе представляет собой одновременно самый верхний описанный слой этого разреза, будем называть ее видимой кровлей признака в этом раз-

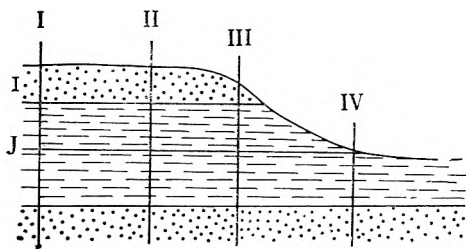


Рис. 13. Геологический профиль

резе. Аналогично вводится понятие видимой подошвы. Если палеонтологическое описание произведено не по всему разрезу, то видимая кровля и подошва для палеонтологических признаков не будут совпадать в данном разрезе с видимой кровлей и подошвой литологических признаков.

Примем посылку: видимую кровлю признака можно поднимать, видимую подошву — опускать. Посылка вынуждает вводить дальнейшие изменения в процедуру построения квадратной матрицы отношений между границами. Изменения таковы:

1) если в некотором разрезе номер границы I больше номера границы J и при этом I — видимая подошва или J — видимая кровля, не будем учитывать этот разрез при установлении отношений между I и J. В самом деле, мы можем, не используя введенную посылку, считать в данном разрезе «I выше J», но можем, используя ее, считать как «I нестратифицирующая относительно J», так и «I ниже J». Другими словами, отношения могут быть любыми, они ничему не противоречат и потому равносильны отсутствию отношений по данному разрезу;

2) то же в симметричной ситуации: в данном разрезе номер I меньше номера J и к тому же J — видимая подошва или I — видимая кровля;

3) то же самое и на тех же основаниях, если в данном разрезе две видимые одноименные (обе кровли или обе подошвы) границы I и J имеют один и тот же номер;

4) если в данном разрезе две границы I и J имеют одинаковые номера и при этом только одна из них, I — видимая, то будем считать в данном разрезе I выше J, если I — видимая кровля, и I ниже J, если I — видимая подошва;

5) если в данном разрезе совпадают номера двух видимых разноименных границ, будем считать видимую кровлю залегающей выше видимой подошвы.

Далее синхронизация производится по разработанной методике без изменений.

Возможно, однако, нам необходимо получить более детальные схемы сопоставления не всех имеющихся разрезов, а лишь какой-то их части, к тому же попадающей лишь в некоторый диапазон

уже построенной шкалы. Например, мы намерены детализировать схемы сопоставления в пределах нижней флишевой толщи и верхнего аргиллитового горизонта (подразделения 5—9).

Возможно [28], в этом частичном материале есть стратифицирующие признаки (и границы), которые перестают быть стратифицирующими при выходе за пределы данного материала. Введем в обработку только те части тех разрезов, которые попали в 5—9 стратиграфические подразделения. Построим геохронологическую шкалу, применимую только в названных пределах, попытаемся с ее помощью детализировать синхронизацию. Полученный результат — шкала: 52, 149, 148, 20, 68 — показывает, что в частичном материале отсутствуют дополнительные стратифицирующие признаки. Однако для многих других массивов исходных данных этот прием может оказаться полезным.

Критерии оценки синхронизации

Сумма частот всех признаков (или границ), вошедших в геохронологическую шкалу, позволяет оценивать, строго говоря, качество только шкалы, а не синхронизации. При введении этого критерия оценки подразумевалось, что наилучшая стратифицирующая последовательность обеспечит и наилучшую синхронизацию. Однако это не всегда так. Кроме тех стратиграфических подразделений, которые выделены в разрезах по присутствию руководящих признаков, подразделения выделяются и по неруководящим признакам, имеющим единичный возрастной диапазон, по совокупности неруководящих признаков, имеющей единичную область пересечения возрастных диапазонов. Допустим, есть одна последовательность с суммой частот 40; кроме того, неруководящие признаки, возрастные диапазоны которых установлены с ее помощью, позволяют выделить еще три подразделения, не содержащие членов этой последовательности, в I разрезе, и еще пять во II разрезе и т. д., всего 30. Общая сумма — 70. Другая последовательность имеет собственную сумму частот 45, но формирует плохие неруководящие признаки, добавляющие к этой сумме всего 15, итого 60. Получается, что наилучшую синхронизацию обеспечивает не наилучшая последовательность. Следовало бы переопределить понятие шкалы, привести его в более строгое соответствие с назначенными целями: геохронологическая шкала — стратифицирующая последовательность, обеспечивающая синхронизацию с наибольшей суммой частот стратиграфических подразделений.

Однако технически такой критерий оценки нереализуем — ведь с каждой из стратифицирующих последовательностей пришлось бы проводить до конца трудоемкую процедуру установления возрастных диапазонов неруководящих признаков и областей их пересечения по каждому слою в каждом разрезе, индексацию слоев, подсчет суммы частот выделенных стратиграфических подразделений. На практике все равно неизбежен возврат к той же посылке: наилучшая последовательность обеспечивает наилучшую синхро-

низацию. Пусть только эта посылка будет явной. По-видимому, она будет выполняться в большинстве реальных ситуаций.

Сумма частот стратиграфических подразделений имеет то преимущество в качестве критерия оценки синхронизации, что формулируется не в терминах конкретного алгоритма, метода, даже теории. По этому показателю можно оценить результаты, полученные с помощью различных предложенных нами алгоритмов, любых других алгоритмов, результаты, полученные вручную и даже наугад, по принципу «мне кажется», для специалиста-знатока не столь уж и непозволительному. Техническая нереализуемость (уточним — при использовании переборных алгоритмов) — это всего лишь трудности данного, начального этапа формализации традиционных методов стратиграфии.

Существенное другое. Принятый критерий не отражает устойчивости полученного результата, устойчивости структуры, на основе которой этот результат получен. Ясно, что есть большая разница, на основе единственного признака индексировано подразделение в данном разрезе или на основе многих взаимно эквивалентных признаков с одним и тем же единичным возрастным диапазоном. В первом случае успех полностью зависит от малейших случайностей обнаружения — не обнаружения признака, во втором случае результат многократно продублирован, уверенно устанавливается при самых различных обстоятельствах. Можно предложить другой критерий — сумма частот всех признаков с единичными возрастными диапазонами или сумма частот всех признаков, для каждого из которых установлены отношения возрастного порядка или эквивалентности к любому другому. Конечно, новый критерий усложняет решение, зато полученная система становится богаче, разнообразнее, устойчивее.

Возможен и иной путь введения геологически осмысленных критериев оценки. Традиционные требования к руководящим, зональным, ортохронологическим, архистратиграфическим признакам — они должны быть членами последовательности, иметь максимально широкое горизонтальное и максимально узкое вертикальное распространение — можно реализовать по-другому [29—31].

Чем шире распространен признак по изучаемой территории, тем с большим количеством других признаков он будет иметь стратиграфические отношения, тем больше ненулевых символов будет в соответствующей ему строке квадратной матрицы. Устанавливается связь и между вертикальным распространением признака и характером его стратиграфических взаимоотношений с другими признаками. Пусть в каком-то одном разрезе есть несколько признаков, различающихся своим вертикальным распространением: признак А распространен снизу доверху, В — только в верхней половине разреза, С — только в нижней половине, D, E, F, G занимают соответственно первую, вторую, третью и четвертую четверти разреза. Легко видеть, что каждый из признаков D, E, F, G имеет отношения «выше — ниже» с четырьмя признаками, В и

С — с тремя; признак А не имеет отношений «выше — ниже» ни с одним из признаков. Обнаруживается полезная закономерность: чем уже вертикальный диапазон признака, тем большее количество единиц и двоек содержит соответствующая ему строка матрицы.

Таким образом, признакам, имеющим наибольшее горизонтальное и наименьшее вертикальное распространение, будут соответствовать в матрице строки, в которых содержится наибольшее количество ненулевых элементов (причем среди них имеется наибольшее количество единиц и двоек).

Построив стратифицирующую последовательность, подсчитаем общее количество единиц и двоек у всех ее признаков. Последовательность, превосходящая по этому показателю все остальные, может быть выбрана в качестве геохронологической шкалы. Этот критерий оценки реализован на

устьямчатском материале, получена шкала, отличающаяся от частотной: 4, 38, 11, 13, 15, 52, 149, 148, 20, 145, 146, 101.

Проанализируем наиболее типичную ситуацию, когда два критерия оценки дадут разные результаты (рис. 14). По наличию признаков А, В, С, D, E, F, G выделены соответствующие стратиграфические подразделения. Кроме руководящих, есть еще 100 признаков, «проходящих по разрезу» и распространенных в двух нижних подразделениях А и В и в двух верхних F и G. В подразделении D есть признак R, распространенный только в разрезах IV, V, VI. Подсчитаем, относительно какого количества признаков будут стратифицирующими D и R. D ниже E, F, G и выше А, В, С, общее количество единиц и двоек равно 6. Относительно 100 «проходящих по разрезу» D является нестратифицирующим, так как в разрезах I, II, III D ниже их, а в разрезах IV, V, VI — выше. Признак R не имеет отношений с E, F, G, зато он выше А, В, С и 100 признаков в подразделениях А и В. Так как признак R не фиксирован в разрезах I, II, III, относительно этой сотни «проходящих по разрезу» он не может быть нестратифицирующим. Его сумма единиц и двоек 103. В качестве шкалы будет избрана последовательность А, В, С, R с суммой единиц и двоек, равной 115. У последовательности А, В, С, D, E, F, G сумма составляет всего 27, поэтому такая шкала не построится, подразделения E, F, G не будут выделены.

Е. И. Гончарова модифицировала критерий «количество единиц и двоек». Показатель, названный ею обобщенным весом, вычисляется так: если отношения «ниже» данного признака I с некоторым K фиксированы в двух разрезах — прибавляем 2 к показателю, если отношения «выше» с L фиксированы в восьми разрезах — при-

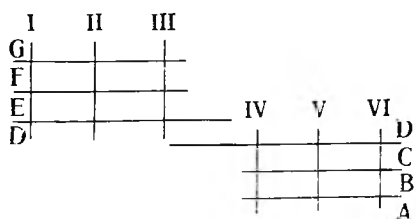


Рис. 14. Одно стратиграфическое подразделение распространено во всех разрезах

бавляем еще 8 и т. д. Для Усть-Камчатского района получена геохронологическая шкала по этому критерию: 3, 38, 11, 13, 15, 52, 149, 148, 20, 68, 146, 54. Обобщенный вес также чувствителен, хотя и менее, чем число единиц и двоек, к ситуациям, подобным изображенной на рис. 14.

Но тогда возникает вопрос: а зачем о таких показателях вообще упоминать в публикациях, не лучше ли списать их по статье «издержки производства»? Этого делать нельзя.

Четыре критерия оценки — сумма частот стратиграфических подразделений, сумма частот признаков с единичными возрастными диапазонами, обобщенный вес, количество единиц и двоек — составляет ряд, на одном краю которого — показатель, определяемый только структурой полученного объекта — результата (схемы синхронизации) и не зависящий от структуры исходного материала (множества признаков с фиксированными на нем стратиграфическими отношениями), на другом краю — показатель, определяемый только структурой материала и не зависящий от структуры результата. В промежуточных показателях различным образом учтены и частоты выделяемых подразделений, и взаимоотношения признаков.

Для последнего показателя в особенности и для двух промежуточных в меньшей степени всегда можно поставить вопрос — сколько признаков и в каком месте следует добавить или убавить, чтобы сделать наилучшим по этому показателю любой произвольный наперед заданный результат? С другой стороны, всегда можно смоделировать ситуацию, в которой заведомо наилучший результат получит сколь угодно низкую оценку.

Но эта чувствительность к характеру исходного материала одновременно является и достоинством предложенных показателей. Ведь мы практически ничего не знаем о структурах реальных массивов, это совершенно неисследованная область геологического знания. Что на этих массивах выполняется всегда, а чего никогда не бывает, что характерно, типично, а чем можно пренебречь и какова плата за пренебрежение? При исследовании таких проблем показатели, чувствительные к характеру материала, незаменимы.

Кроме того, в какой-то, возможно даже и широкой, но четко ограниченной сфере применения эти показатели будут пригодны и для оценки синхронизации. Проблема лишь в том, чтобы уметь выявить по наблюдаемым данным принадлежность к этой сфере, для этого следует сначала описать ее, а для описания необходимы отсутствующие пока однозначный язык и теория. И снова круг замыкается на приобретении знания о структурах реальных массивов исходных данных.

Алгоритм «лестница»

Плата за незнание структуры обрабатываемого материала может выражаться не только в часах машинного времени на реализацию переборных алгоритмов. Можно расплачиваться и ошибками, риском в применении непереборных алгоритмов, в которых экономия времени достигается за счет использования посылок, по необходимости не слишком ясных.

Из всех разработанных нами алгоритмов самый простой предложен Е. И. Гончаровой. Вводится еще одна числовая характеристика признака: ранг — количество слоев в данном разрезе от нижней до верхней границы признака. Если в каком-то из разрезов признак отсутствует, его ранг здесь принимается равным общему количеству слоев данного разреза. Геологический смысл характеристики очевиден. Синхронизируя разрезы по какому-то признаку, мы отождествляем все слои, заключенные между нижней и верхней границами, разделяя их по возрасту от выше- и нижележащих. Чем больше слоев между границами, тем ниже избирательность признака; если признак фиксирован в разрезе снизу доверху, он не позволяет разделить здесь по возрасту пласты. Точно так же нельзя по этому признаку установить никаких возрастных разбиений в разрезе, где его нет. Поэтому и принимается отсутствие признака равноправным его вертикальному распространению снизу доверху.

Для каждого признака подсчитаем сумму рангов по всем разрезам. Условным началом шкалы L выбираем любой из признаков, распространенных в единственном слое во всех разрезах, где они встречены, и имеющий наибольшую среди таких признаков частоту. Все остальные признаки расположим в ряд в порядке возрастания их суммы рангов. Если у нескольких признаков сумма рангов одна и та же, то первым среди них ставим имеющий наибольшую частоту; дальнейшее размещение в порядке ее уменьшения.

Просматривая признаки ряда, начиная с первого, находим признак F , являющийся стратифицирующим относительно L . Он будет членом отстраиваемой стратифицирующей последовательности: первым, если он ниже L , и вторым, если наоборот. Имеем двучленную шкалу F, L . Снова просматриваем признаки ряда, начиная с первого, ищем возможность пополнить шкалу. Если признак K выше I -го члена построенной шкалы, выше и не имеет стратиграфических отношений с предыдущими членами и к тому же ниже $I+1$ -го члена, ниже или не имеет стратиграфических отношений с последующими членами, то он займет место в шкале между I и $I+1$. Соответственно изменяется нумерация признаков шкалы. Если K выше самого верхнего признака шкалы и выше или не имеет стратиграфических отношений с остальными, он займет место в конце шкалы. Если он ниже самого нижнего и ниже или не имеет стратиграфических отношений с остальными, он будет пер-

вым в шкале, а номера прежних членов увеличатся на единицу. Исчерпав все возможности достроения, получаем шкалу в окончательном варианте. В дальнейшем она используется для синхронизации, как обычно.

Алгоритм так прост, что его лучше применять вручную. На обработку материала вручную требуется меньше времени, чем на подготовку исходных данных для ЭВМ.

Результаты успешного применения алгоритма опубликованы [11]. В дальнейшем были получены и другие положительные результаты, но для некоторых массивов выяснилось, что наилучшая шкала строится не всегда. Можно было бы привести конкретные результаты удачного и неудачного применения алгоритма, но вряд ли это стоит делать. Главное ведь в нахождении общих характеристик всех тех ситуаций, где алгоритм работает хорошо, и их отличий от других ситуаций, где его применение нельзя рекомендовать. Такое ограничение можно будет сформулировать на языке будущей теории синхронизации, основанной на знании структуры обрабатываемых массивов. Анализ проб и ошибок будет необходим при построении теории.

«Параллельные» и «косые» признаки

В основе синхронизации должна лежать идеальная модель структуры — совокупности взаимоотношений между признаками в массиве фактического материала. Если недостаток однозначных данных не позволяет эмпирически обнаружить эту структуру, следует попробовать путь эвристики. Попытаемся наглядно представить себе, что в предполагаемой модели приемлемо, а что кажется неестественным, аномальным. Конечно, наглядный образ здесь не так правомерен, как в вернеровской модели идентификации: если там достаточно было представлять непрерывные геологические тела, то здесь материал дискретный, состоящий из отдельных точек, между которыми непрерывная пространственная связь не обязательна.

В модель хорошо вписываются как признаки с узким вертикальным диапазоном, образующие длинные стратифицирующие последовательности (они дают хорошие руководящие «штучные» признаки), так и признаки с широким диапазоном, но «параллельные» друг другу (они позволяют формировать хорошие руководящие комплексные признаки). Не полезны для синхронизации, вносят лишь путаницу в построения, вызывают интуитивное возражение «косые» признаки, имеющие узкий вертикальный диапазон в каждом разрезе, но «скользящие по возрасту» от разреза к разрезу.

Попробуем построить: алгоритм выявления и исключения таких «косых» признаков. Сначала представим систему «параллельных» признаков (рис. 15 а). Подсчитаем в этой системе для каждого признака его обобщенный вес V_0 . Признак А — стратифицирующий относительно В, отношение «А выше В» фиксировано в трех разрезах, в обобщенный вес $V_0(A)$ идет первая цифра — 3. Отно-

нительно С признак А тоже стратифицирующий, отношение «А выше С» фиксировано в трех разрезах, увеличиваем обобщенный вес $V_0(A) = 3 + 3$. Других стратифицирующих относительно А признаков нет. Окончательный результат $V_0(A) = 6$. В является стратифицирующим относительно А, отношение «В ниже А» фиксировано в трех разрезах, В — также стратифицирующий относительно С, причем «В выше С» фиксировано тоже в трех разрезах $V_0(B) = 3 + 3 = 6$. Аналогично $V_0(C) = 6$.

Введем другой показатель — единичный вес V_e . Будем вычислять его по каждому разрезу в отдельности, затем суммируем полученные величины для каждого признака по всем разрезам. В разрезе I признак А выше В и выше С. В единичный вес $V_e(A)$ входит первая цифра 2. При этом не обращаем внимания, каковы отношения признака А с В и С по другим разрезам, они могут быть там нестратифицирующими, быть выше, ниже, на подсчете единичных весов по разрезу I это не отразится. В разрезе II (на другие не обращаем внимания) А тоже выше двух признаков В и С, в разрезе III — тоже выше двух. Окончательный подсчет $V_e(A) = 2 + 2 + 2 = 6$. Для остальных признаков подсчет даст те же результаты: $V_e(B) = 6$, $V_e(C) = 6$.

Хотя для всех признаков в данном примере получилось, что $V_0 = V_e$, это не всегда так. Усложним ситуацию, введем «косой» признак X (рис. 15 б). Подсчитаем обобщенные и единичные веса каждого признака. А является стратифицирующим относительно В, отношения «А выше В» фиксированы в трех разрезах, А — также стратифицирующий относительно С, при этом «А выше С» наблюдалось в трех разрезах, $V_0(A) = 3 + 3 = 6$. Признак X — нестратифицирующий относительно А, поэтому он не увеличивает $V_0(A)$. На тех же основаниях $V_0(B) = 6$, $V_0(C) = 6$, $V_0(X) = 0$. Подсчитываем единичные веса. В разрезе I А выше В, С, X, в $V_e(A)$ идет первая цифра 3; в разрезе II А выше В, X, С — пополняем $V_e(A)$ еще цифрой 3; в разрезе III А ниже X, выше В и С — прибавляем еще 3, итого $V_e(A) = 3 + 3 + 3 = 9$. В разрезе I В ниже А и выше С и X, в разрезе II ниже А и выше С, в разрезе III ниже X и А, выше С — итого $V_e(B) = 3 + 2 + 2 = 8$. Аналогично $V_e(C) = 3 + 3 + 3 = 9$, $V_e(X) = 3 + 2 + 3 = 8$.

Ни для одного из признаков обобщенный вес в данном случае не равен единичному. Вычисляем их разность:

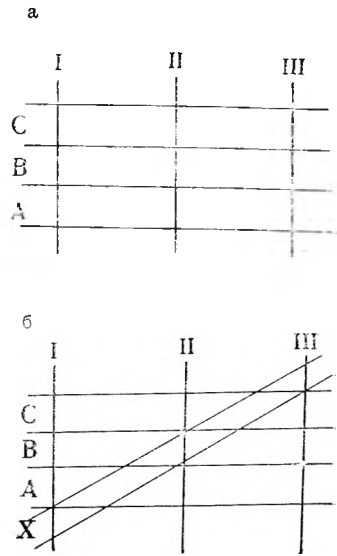


Рис. 15. Система параллельных признаков А, В, С (а) и система А, В, С, X, содержащая косой признак (б)

$$R_A = V_e(A) - V_o(A) = 9 - 6 = 3,$$

$$R_B = V_e(B) - V_o(B) = 8 - 6 = 2,$$

$$R_C = V_e(C) - V_o(C) = 9 - 6 = 3,$$

$$R_X = V_e(X) - V_o(X) = 8 - 0 = 8.$$

«Косой» признак X был оценен наиболее высоким показателем. Можно было бы принять величину R в качестве критерия для отбраковки «косых» признаков, для выявления более «косых» и менее «косых». Однако и для самого идеального признака ясно — чем шире он будет распространен на изучаемой территории, тем чаще будет встречаться с признаками, вообще нестратифицирующими относительно него, но в одном разрезе расположенными выше, в другом — ниже него, т. е. «косыми», тем больший вклад они внесут в формирование разности его единичного и обобщенного веса. В то же время очень «косые», но мало распространенные признаки будут оценены малой разностью. В результате хорошие признаки будут выброшены, а плохие останутся.

Необходима какая-то удельная величина, отнесенная к распространенности признака. Показатель

$$\frac{R_i}{C_i} = \frac{V_e(I) - V_o(I)}{C_i}$$

разность единичного и обобщенного веса, деленная на частоту признака I, была бы некоторой аналогией углу пересечения. Чем большую разность на данном количестве разрезов имеет признак, чем меньшее количество разрезов необходимо ему для того, чтобы получить такую оценку тем под большим «углом» пересекает он «параллельные» линии истинной структуры, тем он более «косой».

Но и этот показатель недостаточен. Возможно, что во многих разрезах, где фиксирован данный признак I, не встречено ни одного другого признака; на формирование его обобщенного веса, единичного веса, разности R_i такие разрезы никакого влияния не окажут, и пусть этот признак будет хоть самым «косым» среди всех, его удельный показатель будет неоправданно улучшен только за счет увеличения знаменателя C_i . Дело не просто в количестве разрезов, большое значение имеет, какие это разрезы, много ли в них фиксировано признаков. Если много — это сразу скажется на формировании разности R; у плохих признаков обобщенный

вес мало возрастет по мере роста единичного веса, отношение $\frac{R}{V_e}$

возрастет резко; у хороших признаков почти одинаково возрастут V_e и V_o , отношение $\frac{R}{V_e}$ уменьшится. Разрезы с малым количеством признаков внесут малый вклад и в V_e , и в V_o , и в R, соответ-

ственно их роль в изменении $\frac{R}{V_e}$ будет малой, как это и требуется.

Поэтому примем показатель $k = \frac{R}{V_e} = \frac{V_e - V_o}{V_e}$ единственным для выявления и отбраковки «косых» признаков. Этот показатель может меняться от 0 до 1.

Для некоторого фактического материала вычислим сумму единичного веса всех признаков и сравним ее с суммой обобщенного

веса. Если они не будут равны, можно утверждать, что в данном множестве признаков есть «косые». Примем посылку: если в данном массиве фактического материала суммы обобщенного и единичного веса не равны, то наихудший признак — «косой». Наихудшим будем считать признак с максимальным K .

Для нахождения системы «параллельных» признаков выбросим наихудший. Так как его исключение неодинаково отразится на изменении обобщенного и единичного веса оставшихся признаков, необходимо снова пересчитать все показатели на массиве фактического материала без этого признака. Чтобы не делать заново все громоздкие подсчеты, сравним выброшенный признак со всеми оставшимися. Подсчитаем, какой вклад был им внесен в величину обобщенного и единичного веса каждого оставшегося, вычтем этот вклад и вычислим снова $K = \frac{V_e - V_0}{V_e}$. Найдем наихудший в этом массиве, выбросим его, снова пересчитаем коэффициенты, найдем наихудший и т. д. вплоть до того момента, когда у всех оставшихся будет $V_e = V_0$ и $K = 0$.

После выбрасывания из исходного материала всех «косых» признаков синхронизация становится практически очевидной. Можно применить на полученном рафинированном множестве алгоритмы построения матрицы, шкалы, нахождения возрастных диапазонов и т. д. Перебор становится легко осуществимым, проблем не возникает.

Как и все внутренние показатели, полностью определяемые структурой исходного материала, величины R , $\frac{R}{C}$, $K = \frac{R}{V_e}$ имеют особенность (недостаток или достоинство — зависит от характера решаемой задачи) — выявляют самую сильную структуру и подавляют более слабую. Представим такую ситуацию: есть возрастная последовательность $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$ и «фациальная» последовательность A, B, C, D , «скользящая» относительно возрастной. Если набор «фациальных» признаков образует богатую, взаимосвязанную внутренне согласованную систему с многочисленными другими признаками, кроме A, B, C, D , то «косыми», нарушающими наиболее сильную структуру, при таком положении окажутся возрастные признаки $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$. Всегда ли это недостаток? Вряд ли.

Часто оказывается, что поведение некоторых осадочных полезных ископаемых, зависящих от фациальных взаимоотношений, в хронологической координатной системе трудно описать, для этого необходимо выявлять сложные закономерности возрастного скольжения полезных компонентов. Столь же трудно выявить и закономерности возрастного скольжения «фациальных» признаков, особенно если хронологическая система бедна и слаба, а «фациальная» богата и сильна. Если же поведение «фациальных» признаков и полезных ископаемых определяется одними и теми же закономерностями, использование «фациальной» координатной системы вместо хронологической резко упрощает решение поисково-разведочных задач.

Но и для построения хронологической системы выявление мощной «фациальной» системы может оказаться полезным. Выявленную систему следует просто исключить, а хронологическую искать в полученном остатке, где без мощных деформаций слабая структура имеет большие возможности на выявление.

Непересекающиеся границы

Требование о сокращении множества признаков вплоть до уравнивания сумм единичного и обобщенного веса недостаточно радикально. Оно не запрещает таких взаимоотношений (рис. 16), плохо укладываемых в идеальный образ структуры. Нетрудно убедиться, что в изображенной системе признаков при любом количестве и расположении разрезов и сум-

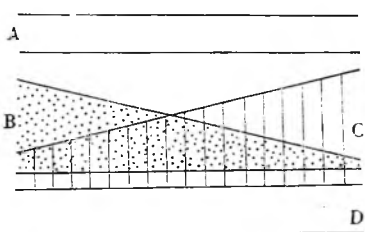


Рис. 16. Пересекающиеся границы во множестве «параллельных» признаков

ма единичного веса на всем множестве будет равной сумме обобщенного веса, и для каждого признака в отдельности $V_e = V_0$, $R = 0$, $K = 0$. В то же время пересечение верхних границ признаков В и С выглядит неестественным, аномальным, требующим запрета. В воображаемой идеальной структуре границы не должны пересекаться.

Если оперировать границами, а не признаками, можно исключить пересечение и с помощью алгоритма, изложенного в предыдущем разделе. У

верхних границ В и С единичного веса будут больше обобщенного, какая-то одна из них будет наихудшей и выброшена из множества, в результате получим систему непересекающихся границ.

Но можно пойти и по другому пути. Введем понятие об отношениях пересечения и непересечения двух границ. Если границы I и J имеют стратиграфические отношения не менее чем в двух разрезах и если к тому же эти отношения одинаковы во всех разрезах (или точки границы I везде выше точек границы J, или точки I везде ниже точек J, или точки I везде совпадают с точками J), границы назовем взаимно непересекающимися. Если же эти отношения различны в разных разрезах (в одних разрезах точки одной границы выше точек другой, а в других разрезах — наоборот или же в одних разрезах точки разных границ совпадают, а в других находятся в отношениях «выше — ниже» друг с другом), то такие границы будем считать взаимно пересекающимися.

Исключим «ненастоящие» пересечения границ, одна из которых является видимой (см. рис. 13): если две границы пересекаются, но эти пересечения можно устранить поднятием видимой кровли вверх или опусканием видимой подошвы вниз, то такие границы будем считать непересекающимися.

Примем посылку: если в совокупности границ существуют пе-

рассечения, то наихудшая граница не является элементом системы непересекающихся границ.

Построен алгоритм, основанный на применении критерия «наибольшее количество пересечений» для выявления наихудшей границы. Алгоритм апробирован на материале разрезов I—VIII, пересекающих верхний аргиллитовый горизонт и нижнюю флишевую

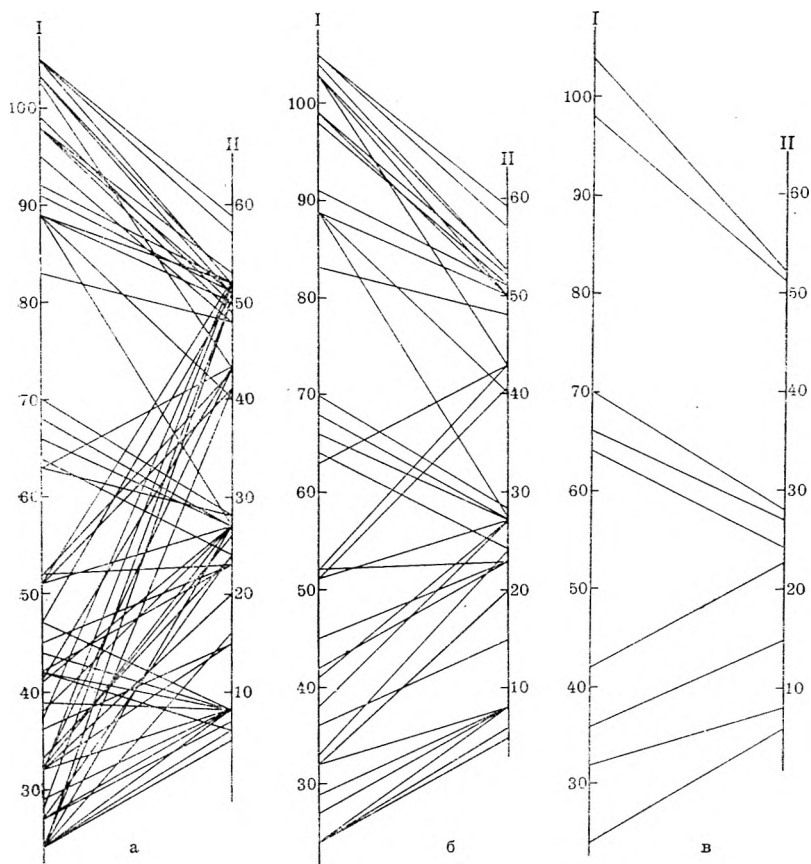


Рис. 17. Положение границ в разрезах I и II:

а) исходный массив — 144 границы, б) промежуточный результат — 72 границы, в) окончательный результат — 29 непересекающихся границ, из которых несовпадающими являются только 9

толщ Усть-Камчатского полигона. Исходный массив — 144 границы (рис. 17). Сравнивая каждую границу со всеми остальными, подсчитаем для нее число пересечений. Получив эти числа для всех границ, находим наихудшую по числу пересечений. Если границ, имеющих наибольшее число, несколько, наихудшей среди них считаем распространенную в наименьшем количестве разрезов.

На изученном массиве наихудшей оказалась граница 91в (24, 52, 0, 0, 0, 0, 0, 0) — верхняя граница распространения рода *Later-nula*. Она пересеклась со 127 другими границами. Выбрасываем ее, остается 143 границы. Так как удаление выброшенной границы неодинаково повлияло на число пересечений у оставшихся границ, необходимо пересчитать пересечения на новом массиве из 143 границ. Можно было бы сделать этот подсчет заново, сравнивая каждую из 143 границ со всеми 142 остальными. Однако можно предложить более экономную процедуру. Если выброшенная граница имела пересечения с оставшейся границей I, то ее выбрасывание приведет к уменьшению пересечений у границы I, на единицу. Если выброшенная граница не имела пересечений с границей J, то число пересечений у J не изменится. Поэтому, выбросив наихудшую границу, сравниваем ее со всеми оставшимися, у всех тех, с которыми она пересекается, уменьшаем число пересечений на единицу, а у тех, с которыми она не пересекается, число оставляем прежним.

Наихудшей в массиве 143 границ оказалась 85н (32, 52, 0, 0, 0, 5, 5, 1в) — нижняя граница распространения вида *Palliolium peckhami*, 111 пересечений. Выбрасываем ее, подсчитываем число пересечений у каждой границы в массиве из 142 границ, находим наихудшую, выбрасываем ее и т. д. вплоть до получения такого массива, в котором ни одна из границ не будет иметь ни одного пересечения. Окончательный результат — 29 непересекающихся границ; некоторые из них совпадают. Положение их в разрезах I и II показано на рис. 17. На том же рисунке показан и промежуточный результат, когда в массиве осталось 72 границы.

Можно, однако, представить ситуацию, когда критерий «наибольшее количество пересечений» подведет. Чем шире распространена граница по изучаемой территории, тем чаще она встречается совместно с секущими границами, тем больше пересечений набирает она сама. С другой стороны, самая плохая граница, если она не имеет широкого распространения, не может иметь и большого количества пересечений.

По аналогии с предыдущим алгоритмом выявления «косых» признаков можно предложить показатель Р, равный частному от деления числа пересечений на сумму «число пересечений + число непересечений». Знаменатель здесь можно определить и другими словами — количество границ, имеющих стратиграфические отношения с данной не менее чем в двух разрезах.

Не хуже, по-видимому, будет работать и другой показатель Т, в числителе которого будет сумма частот всех границ, не пересекающихся с данной, а в знаменателе — сумма частот всех границ, имеющих стратиграфические отношения с данной не менее чем в двух разрезах. Но если какая-то точка принадлежит одновременно двум разным границам, незачем, по-видимому, считать ее дважды. Показатель можно изменить. Пусть в числителе критерия S будет общее количество всех разных точек, принадлежащих границам, не пересекающимся с данной, а в знаменателе — общее

количество всех разных точек, принадлежащих границам, имеющим стратиграфические отношения с данной не менее чем в двух разрезах.

В полученном множестве непересекающихся границ синхронизация практически очевидна. Каждую границу можно считать изохронной. Чтобы установить единый порядок во всех разрезах, построить единые для всего изучаемого пространства стратиграфические подразделения, следует множество непересекающихся границ обработать по имеющимся переборным алгоритмам, что не будет уже представлять собой никаких трудностей.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

При всех дальнейших действиях будем так же пользоваться понятием идеального (теоретического, модельного) объекта, как при построении стратиграфической схемы мы пользовались понятием вернеровского согласного комплекса. Расширим понятие согласных и несогласных отношений, согласия и несогласия. Общая идея такова: согласные отношения — норма (введем их в идеальную модель), несогласные — отклонения от нормы (они будут вводиться как усложнения и дополнения модели). Понятия нормы, эталона могут существовать не только в топологических моделях геологического пространства, но и в дифференциальных, проективных, аффинных и метрических. И в этих моделях нормой будем считать наиболее распространенную ситуацию, напрашивающуюся, интуитивно наиболее приемлемую схему, простейшую и самую удобную в качестве фундамента для наложения дополнений и усложнений. Практически ее никогда не приходится придумывать. Обычно она давно найдена и применяется в геологической практике, дело лишь за явной формулировкой и логическим совершенствованием.

Понятия согласия и несогласия неравноправны при использовании. Если имеются данные в пользу нормы — мы исходим в дальнейших построениях из идеальной модели, если же в пользу аномалии, отклонения от нормы — мы вынуждены в построениях основываться на понятии несогласия. Но если данных нет или их не хватает для обоснованного выбора между согласием и несогласием, мы всегда строим, исходя из предположения о норме. В этом нет никакого произвола или априорного предпочтения. Просто это решение продиктовано не данными по конкретному исследуемому участку, а многочисленными данными предыдущих лет и десятилетий геологической практики, суммированными в понятии «геологический опыт».

Что же следует утвердить в качестве нормы и аномалии, согласия и несогласия в дифференциальных моделях?

Достаточно очевидно, что не все явления, которые геолог называет несогласиями, подпадают под определение, справедливое в рамках топологических моделей. Проанализируем такой пример (рис. 18).

Каждое из подразделений А, В и С соприкасается только с двумя смежными в шкале подразделениями, что в топологической модели является согласным отношением. И тем не менее здесь надо выделять разлом К, как того требует здравый смысл. Разлом К может быть выделен в рамках дифференциальных моделей. Нормой для каждого тела из слоистого комплекса можно признать

соприкосновение его с любым другим телом по гладкой поверхности. Наличие точек излома в контакте — это отклонение от нормы, поэтому можно сформулировать такое определение: поверхность несогласия есть такая поверхность, все наблюдаемые точки которой являются точками излома. Наблюдаемыми в данном случае будут точки, характер поверхности в окрестностях которых установлен непосредственными наблюдениями. Определения, аналогичного предложенному, в геологической литературе найти не удалось.

В рамках дифференциальных моделей возможны и другие виды несогласий. Допустим, в каком-то конкретном участке установлено, что поверхности слоистых тел эквивалентны друг другу относительно некоторых частных видов дифференциальных преобразований, например, эквидистантны.

Точки одной поверхности расположены на одинаковом расстоянии по нормали от другой поверхности. Хотя геолог сплошь и рядом использует такие исходные посылки, формулировку их удается найти редко. Например, В. М. Омельянович пишет о «правиле нормали», т. е. о сохранении «нормальных расстояний между основными стратиграфическими горизонтами на небольших участках протяжением 8—10 км» [29, с. 47].

Если у поверхности — кровли не все точки расположены на одинаковом расстоянии от поверхности — подошвы, то она будет представлять собой отклонение от данной нормы, будет неэквивалентной прочим поверхностям относительно тех же дифференциальных преобразований. Возможно, что на данном участке эталон нормы создается криволинейными поверхностями (области развития складчатых толщ). Тогда любая плоская граница есть граница несогласия, что отражено в известном афоризме: любая прямая линия на карте должна внушать сомнение.

Возможно, что эталон нормы создается дифференциальной эквивалентностью выпуклых (лежащих целиком под касательными плоскостями) поверхностей. Тогда вогнутая (лежащая целиком над касательными плоскостями) поверхность будет границей несогласия, а соприкосновение тел по этой границе — несогласным отношением или несогласным залеганием.

Понятие нормы в дифференциальной модели, конечно, не дает инструмента для однозначного проведения границы между скоррелированными стратиграфическими подразделениями в метрическом пространстве, оно означает лишь требование: как бы ни проходила граница, она должна быть гладкой поверхностью или если кровля более молодого стратиграфического подразделения образует в данном месте антиклинальный перегиб, то и подошва данного подразделения должна образовывать здесь антиклинальный перегиб.

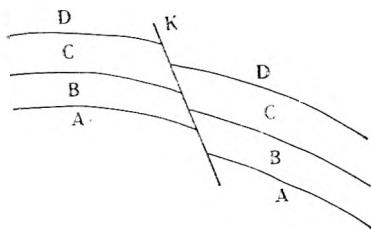


Рис. 18. Несогласие в дифференциальной модели — негладкие граничные поверхности

Проективные свойства геологических тел практически не использовались в геологии до самого последнего времени. В 1963 г. Т. Б. Хейтсом [43] была предложена идея перспективной (проективной) корреляции. Эта идея была сразу же подхвачена и в настоящее время применяется довольно широко [9, 13, 29, 39].

Модель Хейтса

Происхождение понятия нормы, эталона в проективной модели хорошо иллюстрируется рассуждениями Т. Б. Хейтса. При своих многочисленных и неоспоримых различиях все осадочные бассейны имеют одну общую черту: в центре каждого из них или на некотором расстоянии от него накапливаются осадки наибольшей мощности, в направлении к береговой линии мощности уменьшаются, причем таково поведение и всего осадочного выполнения, и каждого отдельного пласта. Если очень преувеличивать эту особенность, можно представить бассейн в виде трехгранной осадочной призмы; в поперечном разрезе получится треугольник, двойной клин или одиночный клин, если изучена только одна сторона бассейна. Плоские изохронные границы сходятся к береговой линии. Если изохронные прямые линии на поперечном профиле пересечены вертикальными скважинами, то получается картина, которая в геометрии называется перспективой.

Конечно, можно возражать, что на самом деле все гораздо сложнее и что нельзя так жестоко схематизировать. А почему, собственно, нельзя? Треугольный осадочный бассейн похож на свой природный прототип ничуть не меньше, чем шестиугольная модель рынка сбыта — на реальную конфигурацию рынка, и не меньше, чем согласный комплекс вернеровских «луковичных лепестков» — на любое закартированное множество геологических тел, сплошь и рядом нарушенных разломами, размывами, опрокидываниями. Конечно, треугольный бассейн — тоже карикатура на действительность, но для модели это никак нельзя считать недостатком. Более того — это неотъемлемая характеристика модели. Вопрос может ставиться только так: а что мы от этого получим? Получим ли мы метод решения какой-то задачи и хороший ли это будет метод, насколько следствия из модели будут подтверждаться наблюдениями?

Т. Б. Хейтс считает себя обязанным указать на необходимость предварительного анализа осадочной и структурной истории исследуемого бассейна, прежде чем решить, применима ли к нему проективная модель. Среди условий применимости перечисляются: примерно одинаковая степень эрозии на несогласиях, отсутствие разломов в коррелируемых разрезах, одинаковые углы падения пластов [«sections... have strata dipping to the same amount» — 43, с. 538]. Подчеркивается, что чем ближе расположены разрезы друг к другу, тем более вероятно, что они имели одинаковую оса-

дочную и структурную историю; в общем если расстояние между разрезами не превышает десяти миль, они, наверное, могут быть поставлены в проективную связь. Но даже если эти условия выполняются и непольностью, методика способна преодолеть «незначительные противоречия». [«Even where the aforementioned prerequisites are not entirely fulfilled, it was found that technique of perspective correlation will overcome slight discrepancies»—43, с. 558—559]. Приводятся примеры небольшой подгонки данных под модель, подправления отметок глубины отдельных границ в скважинах.

Однако преодолеваются не только «легкие противоречия». Модель срывает и в ситуациях, ей как будто бы противопоказанных. Абсолютно невозможной кажется на первый взгляд перспективная корреляция рифовых карбонатных образований с обломочными — ведь скорость роста рифов может в 100 раз превышать скорость механического осадконакопления. И все же разрезы, пересекающие рифы, достаточно хорошо коррелируются на основе проективной модели с нерифовыми.

Легко выявляются и исключаются разломы и размывы.

В чем же дело? С одной стороны, сам автор приводит примеры положительных результатов применения методики за пределами им же ограниченной сферы применимости, с другой стороны, предварительные условия, которые надо выяснить до использования модели, практически невыполнимы — ведь выяснять геологическую (осадочную и структурную) историю до корреляции значит попасть в логический круг, использовать средства взаимы из будущих результатов! Да и к тому же разная история не очень изменяет перспективную картину соотношения мощностей в центре и на краю осадочного бассейна. Как бы ни деформировались слои после своего отложения, мощности их не меняются. Изменится действительное положение граничных поверхностей пластов и толщ, изохронных поверхностей, но это никак не учитывается в модели. Учитывается лишь соотношение мощностей в сопоставляемых разрезах, а соединяются отметки одной скважины с отметками другой «мнимыми временными коррелятивами» (phantom time-correlative), принятыми в модели за прямые и плоскости. И сходится мнимые линии в мнимой вершине (phantom vertex), которая не только не оставалась неподвижной во время всех внезапных изменений «структурной истории», но даже и в «осадочной истории» вряд ли существовала.

Проливает свет на эту несообразность малозначительная фраза, на которой внимание читателя совсем не акцентируется: «... два разреза перспективны, если они не нарушены и имеют одинаковую осадочную историю. Обращая эту процедуру, можно предположить, что два разреза перспективны» [«... two sections... are perspective related providing they are undisturbed and have same depositional history. Reversing the procedure, the assumption can be made that two sections are perspective, — выделено Т. Б. Хейтсом — Ю. С. — 43, с. 566—567]. Весь секрет именно в обращении

процедуры с историей. Мы просто предполагаем без всяких предварительных условий, что два разреза перспективны. Но как же тогда ограничить сферу применения перспективной корреляции, как выяснить, можно ли применять ее в данной конкретной ситуации? Да никак. Всякая модель, формирующая понятие о норме (как нормально движение по инерции, как нормальны вернеровские непрерывные тела, тянущиеся в одинаковом порядке без всяких латеральных ограничений, как нормальна гладкость слоистых тел), применяется до тех пор, пока не вступит в противоречие с фактами. Предварительные условия и ограничения не нужны. А все эти непонятные осадочные и структурные «истории» свидетельствуют о том, что в современной геологии, по-видимому, мало разработать великолепную модель и дать безукоризненные подтверждения ее целесообразности и эффективности, необходимо добавить к ней хотя бы какое-то историческое («истинно научное!») оправдание.

Несогласия

Обнаружения противоречия между моделью и фактами еще недостаточно для заключения о непригодности модели. Никакая модель не в состоянии удовлетворительно приблизить действительность без поправок, усложнений и дополнений. Как говорит А. Пуанкаре, максимум, на что мы можем рассчитывать, — это чтобы таких поправок было поменьше. Нормальным, согласным отношением нескольких прямолинейных границ в проективной модели считается их пересечение в одной и той же точке S — вершине или вертексе. Частный случай согласия — параллельность границ; в проективном пространстве все параллельные прямые пересекаются в одной, бесконечно удаленной точке. Множество слоев, заключенных между согласными границами, есть проективно согласный комплекс. Согласие в данном случае означает одинаковую закономерность пространственного изменения мощностей для любого слоя из комплекса: если слой A_I в разрезе I вдвое мощнее одновозрастного ему слоя A_{II} в разрезе II, то и слой B_I тоже вдвое мощнее B_{II} , C_I — вдвое мощнее C_{II} и т. д.

Если некоторая граница пересекается с набором взаимно согласных границ не в точке S — общей вершине всего согласного комплекса, то эта граница несогласна относительно данного комплекса. Она может иметь общую вершину с некоторым набором других границ, тогда она образует согласный комплекс с ними. Относительно друг друга эти комплексы будут несогласными (рис. 19).

Так вот, если говорить о соотношении модели и действительности, то проективная модель перестает быть эффективным инструментом корреляции только тогда, когда таких отдельных согласных комплексов слишком много, когда множество границ в каждом согласном комплексе слишком мало, в пределе когда каждая пара границ пересекается в своей точке, не совпадающей с други-

ми, т. е. когда несогласий, поправок модели становится слишком много.

Такая оценка пригодности проективной модели есть частный случай общенаучного принципа. Гелиоцентрическая модель Коперника, например, одержала победу над птоломеевой геоцентрической совсем не потому, что лучше соответствовала наблюдаемой

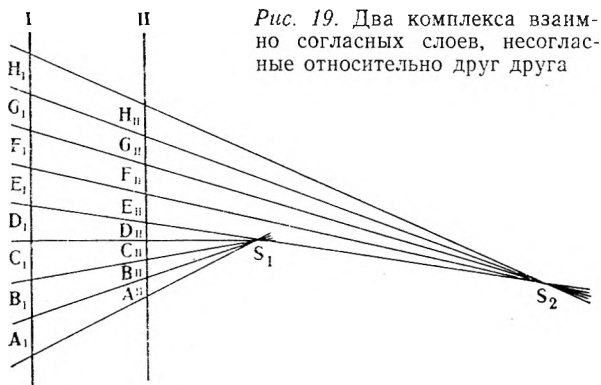


Рис. 19. Два комплекса взаимно согласных слоев, несогласные относительно друг друга

действительности. Как раз наоборот — гелиоцентрическая схема, построенная самим Коперником, хуже подтверждалась фактами (вспомним, что планетные орбиты у него были круговыми, а не эллиптическими), с меньшей точностью позволяла рассчитывать положение светил. Однако в птоломеевой схеме в последний период ее существования ради достижения точного соответствия наблюдениям, как сказал Н. Винер, нагромождали эпицикл на эпицикл, поправку на поправку, пока все это «латаное» сооружение не рухнуло под собственной тяжестью.

Модель Хейтса обычно удается заставить работать, лишь слегка подправив введением небольшого числа несогласий.

Так же как и в топологической и дифференциальной моделях, в проективной модели несогласия могут быть тектоническими и стратиграфическими, разломами и размывами.

Например (см. рис. 19), между комплексом взаимно согласных слоев А, В, С, D и таким же комплексом Е, F, G, H фиксируется отношение стратиграфического несогласия — пространственные закономерности изменения мощностей в этих пачках различны. Так же, как и в топологической и дифференциальной моделях, стратиграфические несогласия могут быть резко выраженными, сопровождаться диагностическими признаками размыва — неровной поверхностью, конгломератами, — но могут и не иметь отчетливого выражения. Как в топологической модели многочисленны факты выпадения из разреза нескольких зон, горизонтов при сохранении постепенных переходов по вертикали между всеми литологическими разностями, как в дифференциальной модели часто отмечаются факты инверсии структуры — антиклинали по одному гори-

зонту соответствует синклиналь в ниже- или вышележащих горизонтах — тоже без выраженной поверхности размыва, так и в проективной модели возможна постепенная перестройка от одного плана распределения мощностей к другому. Несогласия такого типа называют рассеянными [24]. Существа дела это не меняет, отношения друг к другу пачек с разными закономерностями

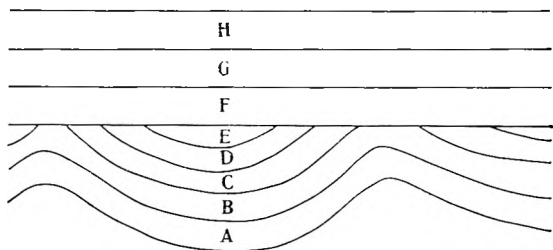


Рис. 20. Согласие в топологической модели на участке контакта Е—F и несогласие в проективной модели

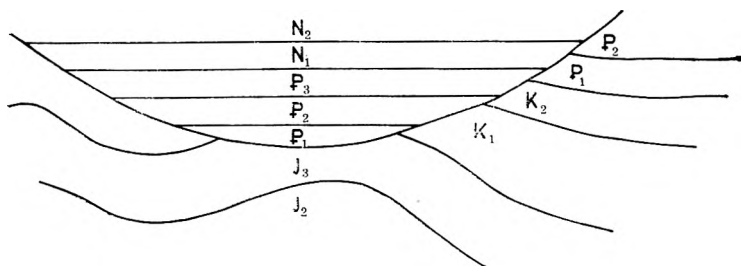


Рис. 21. «Скользящее» стратиграфическое несогласие. По В. И. Синюкову (1978 г.)

пространственного поведения мощностей остаются несогласными. Поверхность несогласия может быть проведена где-то в середине пачки с переходными характеристиками мощностей, если одну часть пачки можно хоть с натяжкой подогнуть под проективную модель верхнего согласного комплекса, а вторую под модель нижнего комплекса; если такая подгонка окажется недопустимой, эта пачка может быть выделена в отдельный комплекс, ограниченный несогласиями.

Конкретное стратиграфическое отношение может представлять собой одновременно согласие в топологической и несогласие в дифференциальной и проективной моделях или несогласие и в топологической, и в дифференциальной и в проективной моделях и т. д. Зачастую между разными типами несогласий отмечаются характерные пространственные связи. Например, по данным рис. 20, может быть построена геохронологическая шкала А, В, С, D, Е, F, G, H. На всех отрезках, где подошва стратиграфического под-

разделения F налагает на не соседствующие с ним в шкале подразделения В, С, D, фиксируется по определению несогласие в вернеровской топологической модели. Соприкосновение же E с F есть, по определению, согласное отношение в топологической модели, так как E соседствует с F в геохронологической шкале. Но именно на отрезке контакта E—F в проективной модели будет зафиксировано несогласие, так как мощности подразделения F постоянны, а мощности E меняются за счет срезания подошвой F. Даже если мощности подразделения F и не будут постоянными, совпадение закономерностей их пространственного изменения с закономерностями срезания мощностей подразделения E возможно лишь при условии почти невероятной случайности.

Общее отличие тектонических несогласий от стратиграфических, независимо от того, в какой модели рассматривать это понятие, в топологической, дифференциальной, проективной, аффинной или метрической: возможность восстановления нормы путем движения тел и границ с одной стороны поверхности несогласия относительно тел и границ с другой стороны — для тектонических несогласий и невозможность такого восстановления — для стратиграфических несогласий. Величина смещения, необходимая для восстановления несогласий, обычно называется амплитудой данного разлома. Например, можно восстановить вернеровские свойства пространства, совместив одноименные границы по обе стороны разлома (см. рис. 10 в, д); таким же образом можно восстановить гладкость границ (см. рис. 18). Тектонические несогласия в проективной модели ничем не отличаются в этом смысле от несогласий в топологической и дифференциальной моделях. Если смещением вдоль поверхности несогласия удастся сделать все мнимые прямолинейные границы пересекающимися в одной и той же точке, другими словами, если разные блоки по ту и другую сторону поверхности несогласия удастся представить латеральными частями некоторой пачки с едиными закономерностями пространственной изменчивости мощностей, — значит, анализируемое несогласие является тектоническим разломом.

Характерной чертой тектонических несогласий является то, что одно и то же смещение восстанавливает норму одновременно в топологической, дифференциальной и проективной моделях (так же, кстати, как и в аффинной и метрической). Из этого можно вывести полезные и эффективные следствия.

Стратиграфическое несогласие связано (в историко-геологической интерпретации) с постепенным распространением трансгрессии в некотором бассейне — «скользящее несогласие» показано на рис. 21. Если рассматривать только правую половину рисунка, несогласие в топологической модели можно принять за тектоническое, так как можно добиться совмещения одноименных стратиграфических подразделений. Но если к понятию согласия предъявить требование, чтобы по разные стороны поверхности несогласия совпадали и закономерности пространственного поведения мощностей, фаций, конфигурация граничных поверхностей (в аффинной и мет-

рической моделях), то отнесение данного несогласия к тектоническим становится невыносимым. Эту особенность можно использовать и при перспективной корреляции. Исключив тектоническое несогласие в топологической модели, построенной раньше, чем проективная, путем совмещения одноименных границ, мы можем быть уверенными, что устранили несогласие и в проективной модели, к построению которой даже и не приступали. Коррелировать же, имея дело с согласными отношениями, значительно легче.

Объяснение причин различия между стратиграфическими и тектоническими несогласиями находится в историко-геологических построениях. Поклонники историзма объясняют происхождение тектонических несогласий разрывом сплошности слоев и смещением их частей относительно друг друга вдоль трещины. Обе разрозненные части при этом сохраняются; при стратиграфическом же несогласии происходит размыв, частичное уничтожение слоя по одну сторону от несогласия. Различение стратиграфических и тектонических несогласий имеет большой практический смысл. Если прослеживаемое тело, например пласт угля, утыкается в поверхность несогласия и пропадает сразу за этой поверхностью, понятно, что вопрос о том, есть ли смысл искать его по ту сторону, возникает сам собой.

Геологу может показаться странным серьезное обсуждение различия того, что никогда не рассматривалось совместно, не объединялось и не смешивалось друг с другом. Это верно лишь отчасти. Если тектонические и стратиграфические несогласия действительно никогда не рассматривались совместно и не объединялись в одном понятии (их даже изучают разные геологические дисциплины: структурная геология и тектоника — одни, стратиграфия и литология — другие), то давать гарантию против смешивания этих несогласий друг с другом по меньшей мере неосторожно. Конечно, диагностические признаки разломов и размывов слишком различны: поверхность трещины, брекчии и милониты не спутаешь с неровной поверхностью размыва и базальными конгломератами, но ведь бывают несогласия и без отчетливого морфологического выражения. Кроме того, возможно отсутствие наблюдений в месте расположения поверхности несогласия: при бурении с неполным отбором керна, при картировании в условиях неполной обнаженности и т. д. Ясно, что в таких ситуациях сомнения, какому именно типу несогласия обязана полученная картина распределения фактического материала, возникают сплошь и рядом. Наконец, бывает и такое: трещины и брекчирование без смещения картируемых границ, неровные поверхности и конгломераты без срезания одной толщи или части ее мощности другой толщиной. Тут уж возникает другой вопрос: существуют ли в таких условиях несогласия? Для этого надо сначала однозначно определить, а что это такое. Так вот, «разломы» без смещения, «размывы» без срезания никак не мешают коррелировать, картировать, оконтурировать прослеживаемые тела. Конечно, это не значит, что они не представляют никакого интереса для геологии. Они часто бывают рудовмещающими.

рудоконтролирующими. Но такие явления надо и назвать как-то по-другому, отнести их к другому классу, чтобы не путать с картировочными понятиями.

Методика перспективной корреляции

Т. Б. Хейтс разработал методику попарной корреляции разрезов скважин на основе проективной модели. Ключевым моментом является нахождение вершины *S*. Эта точка лежит на пересечении двух корреляционных прямых линий. Так как каждая прямая определяется двумя точками, в данном случае — двумя изохронными отметками глубин в разных скважинах, то для перспективной корреляции необходимо иметь по крайней мере две пары каким-то образом синхронизированных отметок. Имея вершину, можно скоррелировать какое угодно количество пар отметок: любая прямая, проведенная через вершину, пересечет разрезы в точках, которые на основе проективной модели будут считаться изохронными.

Легко видеть, что перспективная корреляция не может быть признана первичной, имеющей дело только с исходным фактическим материалом. Это лишь детализация какой-то ранее принятой синхронизации, ее распространение на другие, нескоррелированные части разрезов (рис. 22). В качестве первоначальных коррелятивов Т. Б. Хейтс предлагает использовать руководящие ископаемые и определения абсолютного возраста, но по приводимым им примерам видно, что приемлемы и иные первичные коррелятивы, в частности, реперы на каротажных кривых.

Понятно, что в той системе методов, которая предлагается в данной книге, самым естественным решением будет считать исходной корреляцию на основе модели Вернера. Модель Хейтса компенсирует ее недостаточную полноту и детальность, позволяет дополнить схему, показывающую только отношение вертикальной и латеральной последовательности геологических тел (мощности в модели Вернера не учитывались), закономерностями пространственного поведения мощностей. Во многих случаях становится ненужной погоня за все большей и большей детальностью синхронизации в рамках модели Вернера; получив там лишь грубую первоначальную схему, мы будем дорабатывать ее в рамках следующей, менее фундаментальной модели.

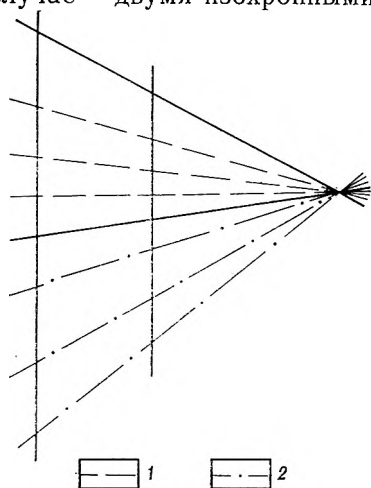


Рис. 22. Детализация имеющейся схемы корреляции (1) и распространение корреляции на нескоррелированные части разрезов (2) путем использования проективной модели

Инвариантом в модели Хейтса является равенство перспективных отношений (см. рис. 19):

$$\frac{A_I}{A_{II}} = \frac{B_I}{B_{II}} = \frac{C_I}{C_{II}}.$$

Какова величина самого отношения — безразлично, лишь бы сохранялось равенство. Поэтому разрезы I и II могут перемещаться в пространстве как угодно, лишь бы не нарушалась их параллельность. Можно сближать их, удалять, перемещать вверх — вниз относительно друг друга. Наконец, можно произвольно менять их масштаб — один разрез построить в масштабе 1:100, а другой 1:1000, оба разреза независимо от их реального размера изобразить на бумаге отрезками равной длины и т. д. Положение точки S при этом будет значительно меняться. Но корреляция останется прежней: если в разрезе I фиксировать какую-то точку M, то при любых указанных преобразованиях прямая, проходящая через M и S, будет пересекать разрез II в одной и той же точке K. Такая свобода в графическом построении предоставляет большие удобства. Как пишет Т. Б. Хейтс, изменением масштабов всегда можно добиться, чтобы корреляционные прямые пересекались в пределах машинописного листа бумаги.

Методику перспективной корреляции можно упростить, освободив ее от излишних ограничений. Т. Б. Хейтс пользуется разрезами скважин, где границы слоев наносятся по их отметкам глубины. Другими словами, в разрезе изображаются вертикальные мощности слоев. Но так как сама модель описывает закономерности пространственного поведения истинных (нормальных) мощностей, а вертикальные мощности представляют собой одинаковые искажения истинных мощностей лишь при одинаковых углах падения слоев, неизбежно ограничение перспективной корреляции лишь разрезами с одинаковыми падениями. Если разрез строится не по отметкам глубины, а по последовательности слоев в их истинной мощности, ограничение становится ненужным. По Т. Б. Хейтсу, коррелируемые разрезы не должны быть пересечены разломами. Но если в разрезе устранить все тектонические несогласия, переместив слои и границы в топологической модели вдоль поверхности разлома до совпадения одноименных тел и границ, то отпадают и эти ограничения.

Можно применять методику перспективной корреляции к сопоставлению сразу многих разрезов.

Предположим, на местности есть некоторая прямая линия профиля, на которой расположены скважины. Изобразим вертикальную плоскость, проходящую через все скважины (рис. 23). Сохраним измеренные на местности расстояния между скважинами, отложив их на чертеже в удобном масштабе. Вертикальный масштаб примем одинаковым для всех скважин или, если это неудобно (слишком далеко расположена вершина S), будем деформировать его пропорционально: 1) выберем любую произвольную прямую линию корреляции, например, соединим прямой линией все точки,

расположенные в видимом низу каждого разреза, 2) проведем прямые, параллельные полученной, через одинаковые в каждом разрезе интервалы мощностей, 3) будем равномерно сжимать или растягивать каждый разрез таким образом, чтобы проведенные линии, оставаясь прямыми, пересеклись в одной точке в пределах чертежа. Теперь у разрезов остается только одна степень свободы — их можно лишь сдвигать вверх — вниз.

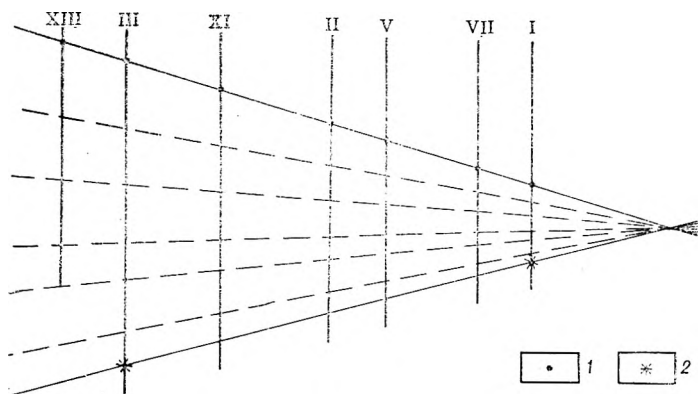


Рис. 23. Перспективная корреляция разрезов бурового профиля
1 — точки одного возрастного уровня; 2 — точки другого возрастного уровня

При таком расположении разрезов не обязательно иметь в каждом из них пару отметок, синхронизированных с парой отметок какого-то другого разреза. Достаточно иметь пары изохронных отметок только в двух любых разрезах (назовем их базовыми), в остальных достаточно и по одной отметке. Четыре временных репера в базовых разрезах позволяют построить вершину (см. рис. 23). Положение остальных разрезов фиксируем окончательно, насадив их по имеющейся отметке на соответствующую корреляционную прямую. Разрезы, таким образом, лишаются последней своей степени свободы, заняв точное положение в построенной проективной модели. Корреляционные прямые, проходящие через вершину S , позволяют сопоставить любой точке любого разреза синхронную ей точку в любом другом разрезе. Перспективная корреляция при фиксированном положении множества разрезов дает возможность сопоставлять разрезы, расположенные не только между базовыми, т. е. осуществлять не только интерполяцию, но и экстраполяцию.

Перспективная корреляция сразу многих разрезов избавляет от возможной неассоциативности попарной корреляции: если мы имеем скважины X , Y , Z , то при попарном сопоставлении X и Y можем найти изохронные отметки x_1 и y_1 , при сопоставлении Y и Z — изохронные отметки y_1 и z_1 , откуда должно следовать, что x_1 изохронно z_1 , но при прямом сопоставлении разрезов Z и X может

оказаться, что x_1 изохронна какой-то отметке z_1 , не совпадающей с z_1 .

Расплата за страховку против неассоциативности выражается в большей громоздкости и гораздо большей жесткости построений— ведь приходится согласовывать взаимоотношения не между парами, а между множествами точек. Появляется опасность, что несколько синхронизированных отметок не лягут на одну прямую; любое случайное отклонение, малейшая неточность в фиксации положения границ в разрезах приведут к появлению большого числа несогласий, в результате пространственная закономерность изменения мощностей может вообще не выявиться.

С излишней жесткостью построения попробуем бороться путем использования той самой особенности исходной вернеровской модели, поставляющей первичные изохронные коррелятивы, которая в рамках этой модели выглядела недостатком. Речь идет о том, что топологическая модель не давала однозначного ответа на вопрос, где точно проходит изохронная граница I-го и (I+1)-го стратиграфических подразделений. Она свидетельствовала лишь: в каждом разрезе где-то между самой верхней точкой I-го возраста и самой нижней точкой (I+1)-го возраста и где-то между разрезами, лишь бы она в пределах всего исследуемого участка не пересекалась с другими изохронными границами, была непрерывной и не перегибалась через вертикаль. Корреляционная прямая в проективной модели непрерывна, не перегибается через вертикаль, а пересечение всех прямых проективно согласного комплекса в вершине S тоже нельзя считать противоречием: ведь и в проективной модели не предполагается, что мы где-то в изучаемом участке найдем точку, где мощности всех слоев одновременно сходят на нет; подразумевается, что если это и произойдет, то где-то за пределами изучаемого участка, в мнимой, несуществующей точке мифической береговой линии, вряд ли реально существовавшей и в прошлом. Таким образом, поведение корреляционной прямой между разрезами удовлетворяет требованиям вернеровской модели. Но вернеровская модель предоставляет ей значительное преимущество; изохронная прямолинейная граница между I-м и (I+1)-м подразделениями может свободно перемещаться в каждом разрезе между

самой верхней точкой I-го возраста и самой нижней точкой (I+1)-го возраста (рис. 24). Проективная модель обретает так

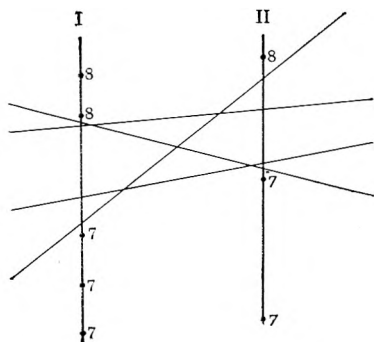


Рис. 24. Равноправные варианты проведения корреляционных прямых — изохронных границ между стратиграфическими подразделениями 7 и 8

недостававшую ей гибкость: положение прямой определяется теперь не точками, а некоторыми интервалами в разрезах; естественно, всю свободу в перемещении прямых следует использовать для нахождения одной вершины S . Другими словами, будем искать такие допустимые вернеровской моделью ограничения стратиграфических подразделений в разрезах, чтобы пространственные закономерности изменения их мощностей подчинялись модели Хейтса.

Опасность появления большого количества несогласий исчезает, но если уж никакими допустимыми перемещениями корреляционных прямых не удастся свести все их пересечения в одну точку, проективное несогласие все-таки приходится вводить. Возможна и другая крайность — свобода перемещения корреляционных прямых так велика, что может быть найдено несколько точек S , не нарушающих требования ни вернеровской, ни хейтсовской модели. Эти точки могут занимать некоторую область проективного пространства. Решение задачи перспективной корреляции в этом случае неоднозначно. Такой ли уж это большой недостаток? По-видимому, нет. Как мы могли убедиться, свобода в проведении границ, предоставляемая вернеровской моделью, была с пользой применена в модели Хейтса. А на проективной модели построения тоже не заканчиваются. Должны последовать еще аффинная и метрическая модели. Так что остаток свободы в выборе положения границ надо признать не только не лишним, а даже желательным.

АФФИННЫЕ МОДЕЛИ

Модель Вернера дает возможность по исходным данным описаний разрезов строить схему, отражающую вертикальную последовательность стратиграфических подразделений и латеральную последовательность фаций в этих подразделениях. Модель Хейтса пополняет полученную схему информацией о закономерностях пространственного поведения мощностей построенных подразделений. И ни одна из них не дает ответа на вопрос, как же ведут себя границы подразделений в пространстве, какова их конфигурация? С другой стороны, остается большой класс геологических данных, не использованных в упомянутых моделях. Речь идет об элементах залегания слоев и слоистых толщ. Именно эти данные и применяются в аффинных моделях именно на поставленный вопрос и должны отвечать эти модели.

Эталон нормы в аффинной модели общеизвестен: пластовые поверхности параллельны друг другу. Отношением параллельности определяется согласное залегание (по Э. Брюкнеру, А. И. Косыгину, А. Н. Мазаровичу, Ф. Х. Лахи, А. К. Башарину, «Геологическому словарю»), согласное напластование (по И. Леваковскому, Б. фон Котту, Ч. Лайелю, Ф. Ю. Левинсон-Лессингу), согласное пластование (по Д. И. Мушкетову), сходное напластование (по П. де Жуванселю) [24]. Так как для криволинейных поверхностей отношения параллельности не имеют смысла, подобные определения можно принять лишь для кусочно-плоских приближений дей-

ствительных пластовых поверхностей. В какой области криволинейную поверхность без ущерба для решения задачи можно считать плоскостью, определяется конкретными условиями задачи и исходными данными. На практике сфера применимости таких приближений оказывается чрезвычайно широкой, о чем свидетельствует постоянное использование отношения согласного (в данном

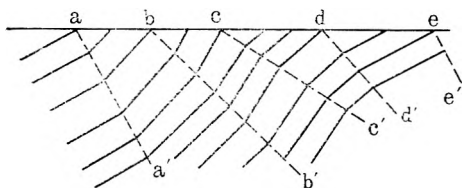


Рис. 25. Отношения параллельности и их использование при структурно-геологических построениях. По В. Н. Веберу [6]

аффинном смысле) залегания. Например, при проведении границ картируемых стратиграфических подразделений необходимы данные об элементах залегания пластов. Элементы залегания внутри подразделения «параллельны внешнему пределу своему» (И. П. Энгельман, 1837 г.) [29, с. 48], что и позволяет применять их для проведения границ. Несогласной в данном

случае будет поверхность, непараллельная анализируемым взаимно параллельным поверхностям.

Четкий алгоритм действий в рамках аффинных моделей излагает В. Н. Вебер [6]. На карту или профиль наносятся замеренные элементы залегания и наблюдаемые в обнажениях границы. Если углы падения (при построении профиля) меняются, можно условно принять, что падение от одного замера до другого остается неизменным. В точках замера a, b, c, d, e проводят перпендикуляры aa', bb', cc', dd', ee' к пласту, а между перпендикулярами пластовые границы проводятся параллельно имеющемуся в этом секторе элементу залегания (рис. 25). Если нет противопоказаний, мы всегда должны исходить из предположения о норме в аффинной модели, т. е. параллельности пластовых границ. Более того, «...мы можем выравнивать падения, можем даже несколько переставлять точки выходов на разрезе, потому что материалом для составления скелета разреза служили случайные замеры залегания в случайных обнажениях, попавшихся на маршруте. Все эти произвольные поправки делаются в угоду положения о параллельности пластов...» [6, с. 130].

Требования аффинной модели о сохранении параллельности границ могут войти в противоречие с требованием проективной модели о сохранении закономерностей площадного изменения мощностей. В. Н. Вебер [6] считает, что в случае изменения углов падения от места к месту мощности должны меняться, если сохранять параллельность кровли и подошвы: при расходящихся падениях в глубину мощности увеличиваются, при сходящихся — наоборот (см. рис. 25). Это изменение может не соответствовать полученному в рамках проективной модели. В устранении возникших противоречий существенную помощь может оказать имеющийся в проективной модели остаток свободы в выборе положения

границ стратиграфических подразделений, интервал неоднозначности решения задачи перспективной корреляции.

Но возможно, что и этот «люфт» не помогает устранить противоречие. Какую норму сохранять — проективную или аффинную? Попробуем сохранить обе. В модель Хейтса вводим ограничения: полученные закономерности пространственного изменения справедливны лишь для мощностей, замеренных в одинаковых частях складок — или только в ядрах, или только на крыльях; возможна и большая детализация отдельных частей складок. Таким образом, вводится генетическая поправка: закономерное площадное изменение мощностей, сформировавшееся в «осадочной истории», не сохранялось в «структурной истории». Конкретизируя эту поправку, часто говорят о раздувании мощностей слоев в замках и сокращении в крыльях и т. д.

В аффинных моделях необязательно оперировать только плоскостями и отношением параллельности. Так же как и при проективной корреляции, всегда можно подобрать такие проектирования пучком параллельных линий (в комбинации с поворотами и переносами), при которых из кровли будет получаться подошва, или же построить такую аффинную координатную систему, в которой граничные поверхности будут вести себя закономерно. Тогда поверхности, эквивалентные друг другу относительно данного аффинного преобразования, или поверхности, подчиняющиеся выявленной закономерности, будут по определению согласными, неэквивалентные или неподчиняющиеся — несогласными.

Аффинные преобразования широко используются в горной геометрии. Известны и алгоритмы аффинных построений в геологии — растяжения, сжатия фигуры вдоль оси, к оси, к плоскости, иногда в комбинации с поворотами и переносами [9, 13, 39 и др.].

МЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Окончательное решение задачи геологического картирования достигается в рамках метрических моделей. В самом деле, геологическая карта должна предоставлять информацию о расстояниях между интересующими нас точками, о размерах геологических тел, их ориентировке, точном положении в координатной географической системе, углах, площадях, объемах и т. д. Все эти характеристики изменяются при любых геометрических преобразованиях, кроме метрических. Единственное, что их не искажает, — параллельные переносы и повороты. Да и то относительно поворотов необходима оговорка — направление меридиана должно быть жестко закреплено в геологической ситуации, допускаются повороты геологической модели только вместе с осью север — юг.

При математическом решении задачи проведения границ в метрическом пространстве часто ограничиваются исходной информацией только о положении некоторых точек одной и той же границы. Задача построения границы по заданным точкам сводится к интерполяции, к вычислению положения промежуточных точек

границы. Другими словами, используются только результаты, представленные топологической моделью, схемой синхронизации, — ведь прежде, чем интерполировать, надо знать, что заданные точки принадлежат одной и той же границе. Никакие дифференциальные, проективные, аффинные характеристики при таком подходе не используются.

Соответственно, многозначным получается и решение задачи интерполяции, хотя по ка-



Рис. 26. Неоднозначность интерполяции: любые линии, проходящие через точки А, В, С, приемлемы

ким-то (обычно не упоминаемым) соображениям из всех возможных решений чаще всего выбирают только одно. Многозначность интерполяции очевидна на простейшем примере (рис. 26): дано положение трех точек А, В, С, требуется построить линию, проходящую через эти точки. Обычно говорят: изображенные на рисунке три точки задают единственную линию —

прямую. Однако в качестве решения поставленной задачи годятся и любые другие линии, проходящие через А, В, С, — как изображенные на рис. 26, так и бесчисленное множество других линий. Задача может быть решена однозначно только после принятия дополнительных предположений, ограничивающих множество допустимых решений. Например, можно исходить из предположения, что все промежуточные точки находятся на прямой (линейная интерполяция), но можно сформулировать и другие предположения — о параболе, гиперболе, синусоиде и т. д. (нелинейная интерполяция). При построении структурных карт в изолиниях вручную практически всегда используют линейную интерполяцию — отметки промежуточных точек рассчитывают исходя из их положения на отрезке прямой между двумя заданными точками, затем углы между отрезками как-то (как именно — неизвестно) сглаживают, из чего можно сделать вывод о стремлении к соблюдению нормы в дифференциальной модели. Обоснование выбора линейной интерполяции сводится, по-видимому, к вычислительной простоте. Более сложные предположения при работе вручную практически нереализуемы. Но принятые упрощения приводят к нежелательным деформациям: неоправданно сгущаются изолинии вдоль линии бурового профиля, на структурной карте появляются явно привнесенные, не от фактического материала, а от метода, «ступеньки» [26].

При машинной обработке данных жесткие ограничения в вычислительной сложности устраняются, выбор приемлемых методов становится богатым. В настоящее время в геологии для интерполяции используются алгебраические и тригонометрические полиномы, гармонические и экспоненциальные функции.

При выборе интерполирующих функций геологи фактически всегда соблюдают ограничения П. К. Соболевского, хотя обычно их явную формулировку не приводят. Эти ограничения утверждают конечность, однозначность, непрерывность и гладкость функции [33]. Первое из них гласит, что значения функции z (высоты, абсолютной отметки) от любых аргументов x и y должны быть конечными; существование бесконечно высоких поднятий и бесконечно глубоких прогибов поверхности, заданной соответствующей функцией, не предполагается. Однозначность нужно понимать как отсутствие точек, где одному значению аргумента соответствовало бы более одного значения функции; другими словами, поверхность, заданная интерполирующей функцией с таким ограничением, не может иметь вертикальных и опрокинутых залеганий. Непрерывная интерполирующая функция может построить только поверхность без разломов. У гладких поверхностей отсутствуют точки излома, где терпит разрыв с конечным скачком первая производная. Поверхность, удовлетворяющую перечисленным требованиям, П. К. Соболевский назвал топографической.

И все-таки после наложения перечисленных ограничений множество возможных интерполирующих функций остается бесконечно большим. Например, все изображенные на рис. 26 линии отвечают принятым условиям. Проблема выбора единственной функции остается чрезвычайно острой. У В. И. Аронова можно найти пример геологического обоснования выбора интерполирующей функции для построения структурных карт: «Рассмотрение некоторых разрезов и карт показывает, что иногда изменение различных поверхностей с глубиной вполне аналогично поведению гармонических функций. К таким явлениям относятся, например, выполаживание структурных поверхностей с уменьшением глубины и увеличение мощности осадков на крыльях» [2, с. 125].

В большинстве случаев ясно только то, что различные способы интерполяции дадут в чем-то различные результаты. В чем заключаются эти различия, каковы характерные особенности поверхностей, построенных некоторым способом, в какой геологической ситуации и до каких пределов применим способ, где он будет более приемлем, где менее, а где и почему окажется совсем неприемлемым — неясно. Более того, типичные черты и различия результатов, полученных разными способами интерполяции, желательно было бы изложить без премудрой математической символики, на языке, понятном геологу, допускающем наглядно-образные представления (речь-то идет о геометрии поверхностей, которых геолог перевидал на своем веку столько, что у него давно сложился устойчивый образ нормы, эталона конфигураций, причем не один, а скорее всего целый набор образов — отдельно для платформенных, геосинклинальных, орогенных структур, карбонатных, сланцевых, вулканогенных толщ и т. д.).

Ярким примером выявления особенностей разных методов интерполяции, допускающего наглядно-образные представления, является вывод Р. М. Бембеля и Р. М. Горбачевой [3] о том, что

использование уравнений Лапласа приводит к построению практически вокруг каждой заданной точки антиклиналей и синклиналей. Понятно, что поверхность с таким обилием архитектурных излишеств не может соответствовать никакому из эталонов.

Обычно же обсуждаемые отличия одного способа интерполяции от другого не имеют геологической специфики. В качестве достоинств и недостатков какой-либо интерполирующей функции упоминаются объем вычислений и его зависимость от количества заданных точек, удобство решения на ЭВМ, чувствительность метода к неравномерному распределению заданных точек и «краевым эффектам», точность, погрешность, сходимость. Короче говоря, анализируются чисто технические стороны интерполяции, имеющие такое же отношение к геологии, как и к геофизике, геохимии, географии, экономике и сопромату, причем некоторые из них относятся не к самой интерполяции, а к близкой задаче — аппроксимации (приближению) функций.

Аппроксимация может рассматриваться в двух вариантах. Первый вариант — это приближение только заданных значений, тогда в качестве аппроксимирующей приемлема и функция, проходящая не точно через заданные точки, а через какие-то их ближайшие окрестности. С такой же задачей нередко сталкиваются и в геологии, если в заданных значениях допускается ошибка. Для решения такой задачи часто применяются сглаживающие поверхности, поверхности тренда. В геологии это называют аппроксимацией, в математике — интерполяцией со сглаживанием.

Второй вариант аппроксимации — приближение некоторой аналитически заданной функции $f(x)$ другой функцией $\varphi(x)$, причем в заданных точках они должны точно совпадать. Например, окружность можно приблизить кусками кубической параболы; чем больше заданных точек, через которые должна пройти кривая $\varphi(x)$, чем больше отдельных кусков, тем меньше отклонения одной кривой от другой в любых промежуточных точках. Скорость приближения $\varphi(x)$ к $f(x)$ по мере увеличения числа заданных точек называется сходимостью; отклонения промежуточных точек аппроксимирующей кривой от аппроксимируемой отклонения аппроксимирующей кривой от заданных точек (в первом варианте) характеризуют точность и погрешность аппроксимации.

Можно было бы сказать, что аппроксимация во втором варианте не используется в геологическом картировании — ведь по заданным точкам мы строим неизвестную функцию $\varphi(x)$, а не приближаем какую-то известную $f(x)$. И все-таки сама постановка вопроса о том, что одна построенная $\varphi(x)$ может оказаться приемлемой, а другая — нет, заставляет задуматься: а нет ли до построения $\varphi(x)$ хотя бы на уровне подсознания какой-то уже существующей $f(x)$, сравнение с которой и позволяет оценить пригодность одной и непригодность другой построенной аппроксимирующей функции? Такой «предсуществующей» функцией $f(x)$ и будет норма, эталон всех метрических моделей данного класса, не сформулированный, однако, ни словами, ни математическими символами.

Особое место среди интерполирующих функций занимают сплайны. В настоящее время область их применения в естественных и технических науках очень широка. В практику геологического картирования, поисков и разведки сплайны внедрены в основном Западно-Сибирским научно-исследовательским геологоразведочным нефтяным институтом (А. М. Волковым и др.) — ЗапСибНИГНИ [3, 9, 39].

В течение многих лет чертежники использовали в качестве лекал тонкие рейки, проводя с их помощью плавные кривые через заданные точки. Эти рейки, или сплайны, закрепляют на месте, подвешивая к ним в некоторых местах свинцовые грузила. Изменяя положение точек, в которых подвешиваются грузила, можно добиться, чтобы сплайн проходил через заданные точки.

Математическим сплайном называют приближенное представление деформированной оси рейки кусками кубической параболы $A + Bx + Cx^2 + Dx^3$. Куски парабол состыкованы гладко, первая и вторая производные всюду непрерывны, третья производная может иметь разрыв с конечным скачком. Заданные точки, между которыми производится интерполяция, принимаются за точки стыка. Таким образом вводится одномерный сплайн. Двухмерный сплайн представляет собой обобщение введенных понятий на случай зависимости функции z от двух аргументов x и y , это некоторая поверхность в трехмерном пространстве x, y, z .

Преимуществом сплайна является его вычислительная простота, достигаемая за счет невысокой (третьей) степени интерполирующего полинома, а также его достаточная гладкость, отсутствие краевых эффектов, хорошие аппроксимирующие свойства. Однако главное, особенно для геологии, в другом: линия, построенная путем сплайн-интерполяции, часто обладает минимальной кривизной по сравнению с линиями, построенными любыми другими интерполирующими функциями. Это свойство сплайна выводится с использованием понятия второй производной. Поэтому проанализируем сначала структурно-геологический смысл производных y' , y'' от функции $y = f(x)$.

Первая производная $y' = \frac{dy}{dx}$, как известно, выражает скорость изменения значений y по мере возрастания значений x ; ее величина равна тангенсу угла между осью x и касательной к линии $y = f(x)$. Если плоскость чертежа представляет собою вертикальную плоскость профиля, пересекающую некоторую граничную поверхность слоя или стратиграфического подразделения, то линия $y = f(x)$ будет линией выхода данной границы на эту вертикальную плоскость (рис. 27). Угол, который составляет касательная с осью x , будет углом падения следа данной поверхности в плоскости x о y . На связь между первой производной и элементами залегания указывали А. М. Волков и др. [9, 39]. Если плоскость чертежа представляет собой горизонтальную плоскость карты, то ось x

может быть истолкована как направление с запада на восток, а ось y — как направление с юга на север (см. рис. 27). Тогда y' есть тангенс угла между осью x и направлением простираения, или тангенс угла между осью y и направлением падения поверхности.

Вторая производная $y'' = \frac{d^2y}{dx^2}$ выражает скорость изменения первой производной по мере возрастания значений x и, следова-

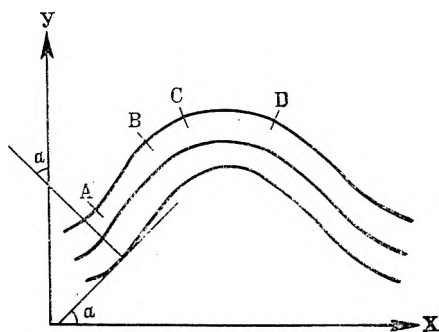


Рис. 27. Двухмерное пространство (x и y — горизонтальная и вертикальная оси: первая производная равна тангенсу угла падения α ; x и y — оси запад — восток и юг — север: первая производная равна тангенсу угла α — азимута падения)

тельно, прямо связана со скоростью изменения угла между касательной и осью x . Чем больше кривизна, тем быстрее меняется угол, тем больше вторая производная. Это легко себе представить наглядно (см. рис. 27) — на плавном, выпрямленном участке AB наклон касательной меняется медленно, на сильно искривленном участке CD — значительно быстрее.

В 1957 г. Дж. Холлидеем была доказана теорема: среди всех функций, заданных в некоторых точках отрезка ab и имеющих на этом отрезке непрерывную вторую производную, кубический сплайн, для которого $y''(a) = y''(b) = 0$, минимизирует интеграл от квадрата второй производной по отрезку ab .

Интеграл от квадрата второй производной часто дает хорошее приближение для интеграла от квадрата кривизны кривой $y = f(x)$ на отрезке ab , поэтому свойство сплайнов, сформулированное в теореме Холлидея, часто называют свойством минимальной кривизны. Физическая интерпретация сплайна — прогибание тяжелой балки, закрепленной в заданных точках, изгибание упругого стержня, закрепленного в заданных точках.

Однако линия сплайна не всегда будет обладать минимальной кривизной. Так как кривизна определяется скоростью изменения угла α , а вторая производная — скоростью изменения тангенса этого угла, то при малых α вторую производную можно считать пропорциональной кривизне, так как в этом случае изменение тангенса пропорционально изменению угла. При больших углах тангенс изменяется намного быстрее угла, пропорциональность нарушается, простая связь между второй производной и кривизной исчезает. Для тяжелых горизонтальных балок, не очень сильно прогибающихся (не более $\frac{\pi}{3}$), для упругих стержней, не слишком изогну-

тых, для платформенных структур с пологими падениями можно безо всякого риска считать, что интеграл от квадрата второй производной приближает интеграл от квадрата кривизны, можно без всяких оговорок называть поверхность сплайна поверхностью минимальной кривизны. Для геосинклинальных толщ с крутыми падениями, резкими изгибами сплайн-поверхность может не обладать свойством минимальной кривизны.

Из сказанного видно, что сплайн допускает наглядно-образное представление. С учетом сделанных замечаний, линия сплайна среди всех гладких линий будет иметь минимальные отклонения от ломаной, проведенной через заданные точки, поверхность сплайна будет наиболее плавной среди всех, проведенных через заданные точки. По-видимому, именно таков эталон нормы в метрической модели. Геолог никогда не нарисует ни одной «лишней» антиклинали или синклинали, если его к этому не вынудит наличие соответствующей экстремальной отметки в данном месте. Ничем не задокументированные осложнения складки обязательно будут срезаны в процессе построения [9]. Сплайн-интерполяция представляет собой оптимальный (или во всяком случае единственно возможный на настоящий момент) компромисс между интуитивным стремлением к линейной интерполяции и недопустимостью углов, при линейной интерполяции неизбежных. Привычка не рисовать лишних изгибов укоренилась настолько глубоко, что можно даже сказать: рука сама ведет именно такую линию. Не исключено, конечно, что в дальнейшем будет разработан другой аппарат, в сравнении с которым сплайн проиграет, но пока его нет; более того, нет и подсознательной неудовлетворенности, которая толкала бы на поиски такого аппарата.

К числу недостатков сплайна относится невозможность его использования для экстраполяции. Сплайн не дает общего аналитического выражения, описывающего поверхность или линию, в которое можно было бы подставить другие текущие значения: большие, чем самые большие из заданных, или меньшие, чем самые малые из заданных. Другими словами, сплайн не дает возможности для аналитического продолжения поверхности или линии за пределы изученного участка. В самом деле, если кусок параболы с одной стороны от крайней точки ограничен в своих расчетных возможностях первой же соседней точкой, как же его можно продолжать на достаточно большое расстояние в другую сторону от крайней точки?

Интерполяция с использованием топологических, дифференциальных, проективных и аффинных характеристик

Уже на заре использования математических методов и ЭВМ для метрической интерполяции стало ясно, что, учитывая только информацию о положении заданных точек, трудно построить структурную карту в изолиниях, которая бы не уступала карте, построенной вручную опытным геологом [26].

Естественно, возникло желание ввести эту информацию в алгоритмы машинного построения структурных карт. По В. И. Аронову [2] такая процедура называется интерполяцией с использованием косвенных данных, по А. М. Волкову и др. [9, 39] — интерполяцией с использованием априорной информации. К числу косвенных или априорных данных отнесены элементы залегания

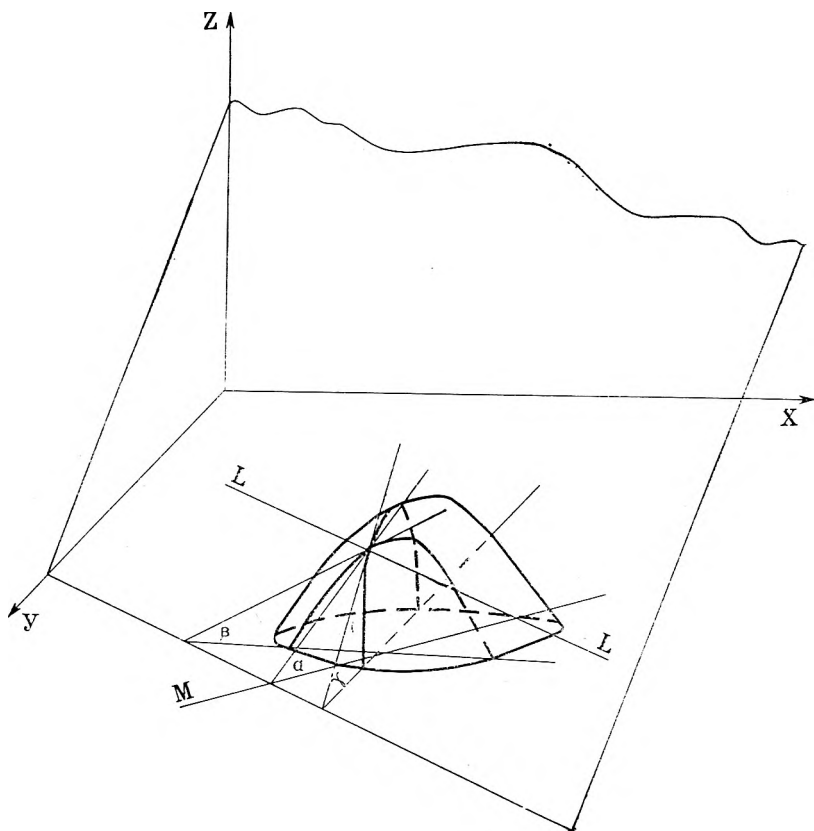


Рис. 28. Трехмерное пространство: связь между частными производными и элементами залегания $\left(\operatorname{tg} \beta = \frac{\partial z}{\partial x}, \operatorname{tg} \gamma = \frac{\partial z}{\partial y}, LL \text{ — линия простирания, } MM \text{ — направление падения, } \alpha \text{ — угол падения} \right)$

ния, сейсмические профили, конфигурации других, выше- или нижележащих граничных поверхностей толщ или стратиграфических подразделений.

А. М. Волковым и др. [9, 39] предложены принципы использования элементов залегания. Представим себе произвольное залегания

ние некоторой пластовой поверхности $z=f(x, y)$. В любой точке (рис. 28) частные производные $\frac{\partial z}{\partial x}$ и $\frac{\partial z}{\partial y}$ полностью определяют положение касательной плоскости. Горизонтальная прямая в этой плоскости есть линия простираения, угол касательной плоскости с горизонтальной координатной плоскостью — угол падения пласта в данной точке. Иначе говоря, две частные производные по данной пластовой поверхности в любой точке полностью определяют элементы залегания пласта в этой точке — азимут простираения, азимут падения и угол падения.

П. К. Соболевский [33] представляет это следующим образом: частные производные $\frac{\partial z}{\partial x}$ и $\frac{\partial z}{\partial y}$ всегда позволяют получить главный градиент $\frac{\partial z}{\partial n}$ в направлении наибольшего ската поверхности.

И наоборот, знание элементов залегания пластов в точке k полностью определяет первые производные в этой точке по линии геологической границы на профиле $y=f(x)$ или по поверхности в трехмерном пространстве $z=f(x, y)$. Данные о первой производной позволяют резко сократить возможные варианты интерполяции: интерполяционная линия должна выйти из точки в направлении, однозначно заданном касательной.

Привлечение для интерполяции отражающих сейсмических площадок, сейсмопрофилей, конфигурации выше- и нижележащих поверхностей осуществляется путем использования элементов залегания. Отражающие площадки — те же маленькие кусочки некоторых пластовых поверхностей, как и кусочки поверхности напластования, принимаемые за плоскость в точке замера элементов залегания. Зная конфигурацию линии или поверхности, можно всегда определить ее ориентировку в любой точке, вычислить ее первую производную. Если исходить из предположения, что в каждой точке n неизвестной поверхности N элементы залегания те же, что и в точке i неизвестной поверхности I , расположенной с n на одной и той же вертикальной прямой, можно по этим данным полностью построить поверхность N . Она будет иметь ту же форму, что и I . После этого достаточно задать положение какой-то одной ее точки p_j , чтобы однозначно фиксировать поверхность N в пространстве. Если расстояние точки p_j по вертикали от поверхности I равно S , можно говорить, что поверхность N получена путем переноса I в вертикальном направлении на величину S [9, 39]. При этом используется аффинное свойство параллельности касательных плоскостей к поверхностям I и N в соответствующих (расположенных на одной и той же вертикали) точках i и p . Но взаимное соответствие точек i и p может определяться не только их положением на одной вертикали. Если в районе отмечается смещение сводов по различным поверхностям, это можно представить как перенос в неvertикальном направлении. Тогда взаимно соответствующие точки i и p расположены на параллельных прямых, наклоненных нужным образом.

Различные пары взаимно соответствующих точек i и n могут располагаться и на не параллельных друг другу прямых. Так, линии переноса в случае концентрической складчатости можно представить сходящимися в некотором центре. Элементы залегания в соответствующих точках остаются одинаковыми. Но и это условие не обязательно. В районах развития диапировой, дисгармоничной, конседиментационной складчатости, где складки выполаживаются в направлении вверх или вниз, разумно предъявить примерно такое требование: для неизвестной поверхности N , отстоящей в своде структуры от известной I -ой, скажем, на 100 м вниз по вертикали, все первые производные в каждой точке n должны быть в два раза меньшими, чем производные в соответствующих точках i . Тогда антиклинали по поверхности I будет соответствовать антиклиналь по N (на перегибе складки первая производная равна нулю, и после деления на два это значение не изменится), но более пологая, так как на крыльях углы падения будут меньшими. Возможны преобразования первых производных в соответствующих точках i и n по любому закону — линейному или нелинейному, перенос от i к n по любой линии — прямой или кривой. Подобные преобразования позволяют строить любые нужные поверхности.

Если в предыдущем разделе была рассмотрена процедура построения поверхности по заданным точкам без учета других геологических данных, то в данном разделе — процедура построения поверхности по элементам залегания и известной конфигурации других поверхностей без учета положения заданных точек. Но часто возникает и более сложная задача — «натянуть данную поверхность на имеющиеся отметки» [2]. Для ее решения А. М. Волковым и др. [9, 32] предложен оригинальный прием. Вводится интеграл I_1 от квадрата разности первых производных двух поверхностей. Если значения производных в соответствующих точках равны, то каждая разность равна нулю, и интеграл тоже обращается в нуль. Если форма поверхностей различна, разности ненулевые, и интеграл есть тоже какое-то число. Составляется сумма I_1 и I_2 — интеграла от квадрата второй производной строящейся поверхности. Второй интеграл отражает кривизну поверхности. Строится поверхность, минимизирующая сумму $I_1 + I_2$. Первый интеграл берется с весом ρ_1 , второй — с весом ρ_2 , изменяющимися от нуля до единицы, причем $\rho_1 + \rho_2 = 1$. Если $\rho_1 = 0$, а $\rho_2 = 1$, то строится только по заданным отметкам, без учета эталонной конфигурации, интерполирующая поверхность сплайна, удовлетворяющая требованию минимума кривизны. Если $\rho_2 = 0$, а $\rho_1 = 1$, ситуация противоположная — строится поверхность заданной конфигурации без учета положения имеющихся отметок. Меняя веса, можно добиться удовлетворительного компромисса между наибольшим соответствием избранной форме и наименьшей кривизной самой поверхности. При этом могут вводиться допустимые и недопустимые отклонения поверхности от заданных отметок.

Если мы имеем конфигурацию какой-либо одной граничной поверхности, то знание закономерностей площадного распределения

мощностей, предоставляемое моделью Хейтса, позволяет построить любую другую поверхность и без всяких производных. Нет ничего проще по каждой точке известной поверхности I — кровле некоторого стратиграфического подразделения — построить соответствующую точку неизвестной поверхности N — подошвы этого подразделения, отложив от I по направлению нормали к поверхности I величину истинной мощности подразделения в данном месте, как это делает любой геолог, даже и не слишком опытный.

При построении поверхности можно учитывать имеющиеся дифференциальные характеристики. Например, мы можем не знать ни точную конфигурацию границ, ни элементы их залегания, ни распределение мощностей, но располагать данными о положении свода антиклинали. Тогда при построении функции вводится условие о равенстве первой производной нулю в данной точке. Таким же образом можно учитывать положение точек, где равна нулю вторая производная (это выпрямленные участки кривой, или точки перегиба, как их называют в математике. Не путать с антиклинальным и синклинальным перегибами, где в нуль обращается первая производная!). Есть и другие особые точки — гиперболические или седловые точки с отрицательной гауссовой кривизной, параболические точки с нулевой гауссовой кривизной. Положение таких точек иногда бывает известно; тогда необходимо и возможно учесть их в качестве условий, накладываемых на интерполирующую функцию.

Следует учитывать и имеющиеся топологические характеристики. Например, при построении поверхности N известны некоторые точки более молодой или более древней поверхности. Можно наложить ограничения: искомая функция не должна проходить через эти точки «чужих» поверхностей, ее значение z_1 в точке (x_1, y_1) должно быть большим (или меньшим), чем некоторое заданное c ; наконец, можно задать интервал значений z в точке (x_1, y_1) , ограниченный снизу и сверху, и т. д.

Предложены ограничения на угол падения [9, 39]. Во многих платформенных областях пластовые поверхности имеют очень пологий наклон, и превышение некоторого предельного угла естественно считать недопустимым. Это ограничение легко вводится как верхняя граница значений первой производной. Таким же образом можно ограничить и вторую производную, и тем самым допустимую кривизну поверхности.

В результате набирается так много «косвенных» или «априорных» данных, которые следует учитывать при интерполяции, что неизбежны ситуации, когда интерполирующая функция, удовлетворяющая всем предъявленным требованиям, не построится. Если ни одно из условий отменить нельзя, приходим к выводу о несогласии в метрической модели. Если одна заданная отметка не может быть соединена с другой заданной отметкой непрерывной линией допустимого угла падения, надо вычислять амплитуду и положение разлома, вносящего разрыв с необходимым смещением в кон-

фигурацию линии. Если для проведения гладкой поверхности через заданные точки ее приходится недопустимо изгибать, необходимо внести разлом, снимающий избыточное изгибание.

Роль «косвенных» или «априорных» данных в метрической интерполяции так велика, что правильнее говорить не об их учете при построениях в метрическом пространстве, а о подчинении им всех метрических построений, так как топологические, дифференциальные, проективные и аффинные модели более фундаментальны и предшествуют метрическим в последовательности построения.

Обзорные разделы обычно предваряют изложение оригинальных результатов, поэтому естественно сразу ответить на вопрос — почему в этой книге сделано наоборот? Обычная цель обзоров — установить место конкретного исследования в какой-то более общей научной системе. В предлагаемой работе построена система моделей и основанных на них методов стратиграфической корреляции; при анализе любого конкретного метода, разработанного другими авторами, попытаемся выяснить, может ли он быть включен в построенную систему, совместимы ли его исходные посылы с постулатами моделей Вернера, Хейтса, сплайновой модели, каково геологическое обоснование метода.

Анализ будет касаться в основном математических методов. Традиционные методы были проанализированы ранее [28, 36]. Математические методы легче поддаются анализу, чем традиционные: расплывчатость понятий, отсутствие явных формулировок операций и исходных посылок в них отмечаются гораздо реже; с другой стороны, они гораздо больше нуждаются в тщательном разборе: сложные математические выкладки сплошь да рядом маскируют полное отсутствие геологического обоснования.

КОРРЕЛЯЦИЯ ПО ДОСТАТОЧНОМУ СХОДСТВУ

В основе метода лежит вычисление функции правдоподобия V гипотезы H_0 о том, что множество сравниваемых объектов однородно, или, то же самое, что сравниваемые выборки принадлежат одной и той же генеральной совокупности. Если величина V , имеющая в данном случае смысл меры различия сравниваемых объектов, превышает допустимое значение, объекты рассматриваются как несопоставимые, если V меньше допустимого, они объединяются в одну генеральную совокупность.

Перед Г. Л. Кирилловой [15] стояла задача определить возрастные соотношения двух немых толщ хр. Джагды (юг Дальнего Востока) — ланской и курнальской, очень близких по литологическому составу. По геохимическим, минералогическим и петрографическим признакам между толщами устанавливались некоторые различия. Являются ли эти различия значимыми?

По каждой толще была составлена выборка — коллекция образцов. В выборке вычислялось математическое ожидание (арифметическое среднее) содержаний отдельных элементов, а также выборочная дисперсия, характеризующая разброс значений вокруг среднего. Из этих исходных показателей обеих выборок по формулам математической статистики был вычислен один числовой

критерий Стьюдента t . Его значение было сравнено с табличным, вычисленным теоретически для допустимых колебаний измеряемых величин в однородной совокупности объектов при заданной вероятности (в данном случае была принята вероятность 95 %, или уровень значимости 0,05) и заданном числе степеней свободы (в данном случае определяемом суммарным количеством образцов в обеих выборках).

Фактически полученный критерий t по такому элементу, как N_i , превышал допустимое табличное значение, по Z_p и Z_g — тоже. По аналогичному показателю Фишера F различия между выборками при тех же вероятности и числе степеней свободы также были признаны значимыми для M_g , C_g , Z_g . «Итак, полученные данные не позволяют нам сопоставлять эти толщи, логичнее считать их разновозрастными» [15, с. 148].

Д. А. Родионов [27] сравнивает выборки не по отдельным свойствам, как в предыдущем случае, а по комплексу свойств. По исходным данным — математическим ожиданиям и дисперсиям всех свойств — вычисляется критерий V_k . Он сравнивается с табличным значением критерия Пирсона χ^2 , характеризующего теоретически рассчитанные колебания измеряемых величин в однородной совокупности при заданном уровне значимости (чаще всего принимается тот же уровень $q=0,05$) и заданном числе степеней свободы (в данном случае равном числу независимых свойств m). Парно сопоставляя слои двух коррелируемых разрезов, Д. А. Родионов предлагает для любой пары вычислять критерий V_k , и если все значения V_k больше или равны $\chi^2_{\text{таб}}$, то разрезы рассматриваются как несопоставимые. Если же для некоторых пар сходство выборок достаточно для отнесения их к одному и тому же однородному множеству, из них выбирается, как синхронная, пара с наибольшим сходством.

Несмотря на математическую безупречность проанализированных методов, по своей геологической обоснованности они соответствуют уровню развития нашей науки, существовавшему по крайней мере до работ А. Грессли и А. Г. Вернера, когда еще не было известно о фациальной изменчивости по простиранию. Не учитывались фации разве что только в работах Г. Агриколы и Н. Стено в XVI—XVII в.

Откуда следует, что однородное множество, генеральная совокупность объединяет разновозрастные слои разных разрезов, а не одинаковые разновозрастные фации? Чрезвычайно распространенная ситуация, когда разновозрастные толщи разнофациальны и, следовательно, резко различны по комплексу свойств, а однофациальные, сходные по комплексу свойств, разновозрастны, не только не обсуждается при геологическом обосновании метода, но даже не упоминается. Лучше сказать, что геологического обоснования статистических методов стратиграфической корреляции вообще нет.

Неприемлемо предположение о равноправии всех признаков в комплексе, из которого выводится равный вклад каждого призна-

ка в общий коэффициент сходства или различия. Именно при синхронизации роль признаков бывает резко различной, и несходство по двум руководящим, зональным, ортохронологическим признакам часто «перевешивает» совпадение по сотне «проходящих по разрезу» признаков, имеющих широкий стратиграфический диапазон.

При статистическом анализе часто исходят из предположения о нормальном распределении некоторой величины, что означает большое число независимых случайных причин, каждая из которых играет примерно одинаковую роль в формировании этого распределения. Геологическая, или естественнонаучная вообще, приемлемость такой гипотезы бывает очевидной далеко не всегда.

Кроме того, не ясна вообще применимость в данной геологической ситуации статистических характеристик. Введены они 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 промысловом 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? [27, с. 93]. Вряд ли могут принести большую пользу столь неясные характеристики.

В последнее время в стратиграфию внедряются методы непараметрической статистики. Если ранее проанализированные статистические приемы основаны на предположениях о нормальности распределения изучаемых случайных величин и их независимости — слишком жестких, трудно выполнимых условиях, то непараметрическая статистика не стеснена ни тем, ни другим ограничениями. Таков основной аргумент инициаторов ее применения. Но геологическое существо подхода никак не затрагивается заменой одного математического аппарата другим, более совершенным и имеющим более широкую сферу приложения. Обоснования, почему

сходство должно считаться возрастным, а не фаціальным, нет, как и прежде, поэтому все ранее высказанные возражения остаются в силе.

КОРРЕЛЯЦИЯ ПО НАИБОЛЬШЕМУ СХОДСТВУ

Зарождение метода относится, по-видимому, к эпохе П. Деге и Ч. Лайеля. В 1831—1833 г. они впервые выделили в кайнозойских отложениях Западной Европы четыре «зоологических эпохи» [20]. Одну из них, содержащую 3 % видов, аналогичных ныне живущим, Ч. Лайель назвал эоценом, вторую, содержащую «менее 18 %» современных видов — миоценом, третью (49 %) — плиоценом и четвертую (96 %) — плейстоценом.

Установление в пластах разных разрезов одинакового процента ныне живущих форм, по идее Ч. Лайеля, должно служить основанием для отнесения этих пластов к одной и той же эпохе, т. е. для их синхронизации.

В дальнейшем «статистический или процентный метод» [36] претерпел некоторые изменения. Если устанавливалось, что анализируемая фауна имеет с фауной какого-либо горизонта 30 % общих форм, с фауной другого горизонта — 20 % общих форм и т. д., ее датировали возрастом того горизонта, с которым она обнаруживала наибольшее сходство. Пласты одного и того же возраста коррелировались. Под горизонтами подразумевались интервалы геохронологической шкалы, процедура построения которой оставалась «за кадром». Именно таким способом датировались и синхронизировались друг с другом разрезы Камчатки, Сахалина [28, 36].

Та же методика применялась и для непосредственного сопоставления конкретных разрезов без их датировки, без использования геохронологических шкал и горизонтов. Пласты двух разрезов попарно сравнивались друг с другом, при каждом сравнении подсчитывался показатель схождения. Пласты, имеющие наибольший показатель, коррелировались. Именно таков ранее рассмотренный подход Д. А. Родионова, с той лишь разницей, что выбору наиболее сходной пары пластов предшествовала отбраковка пар, не обладающих достаточным сходством. Сути дела это почти не меняет, ясно, что пара, наиболее сходная среди достаточно сходных, остается таковой и среди всех. Исключение: если наибольшее сходство все же менее достаточного, корреляция не производится. Есть в методике Д. А. Родионова и другой оригинальный прием — последующая корреляция после выбора наиболее сходной пары производится с использованием понятия стратифицируемых тел: пласты, расположенные в одном из разрезов ниже одного из пластов выбранной пары, не сравниваются с пластами другого разреза, расположенными выше пласта данной пары. Сопоставление «крест — накрест», пересечение стратиграфических подразделений запрещается введением специального условия. Однако первая корреляция, предопределяющая все остальные действия и результаты,

производится без всякого использования понятия стратифицируемых, непересекающихся тел.

Остальные методы корреляции по наибольшему сходству равнозначны второму этапу в методике Д. А. Родионова, в них нет ни предварительной отбраковки пригодных пар, ни запрещения (по крайней мере, в явном виде) пересечений. Различаются между собой они лишь способами подсчета коэффициента сходства.

Трудности, противоречия в методике корреляции по наибольшему сходству не случайны и касаются не мелких технических подробностей. Они принципиальны и относятся ко всей методике в целом. Последовательность слоев и признаков при таком подходе никак не учитывается, каждый комплекс анализируется и сравнивается не во взаимосвязи со всеми другими комплексами данного разреза, а по отдельности, поэтому сходство двух комплексов фауны может быть фациальным, а не возрастным. Наиболее близкие фации в разных разрезах совсем не обязательно должны сохранять одинаковый порядок, в результате неизбежны корреляции «крест — накрест», тем более, что никаких специальных условий, запрещающих пересечения (исключая методику Д. А. Родионова), не вводится.

Неприемлема посылка об одинаковой роли любых таксонов в комплексе. Ведь время определяется по какому-то признаку (признакам). А что если именно этот признак как раз и не входит в преобладающее множество таксонов, одинаковых для сравниваемых комплексов? Если все сходство базируется на формах, «проходящих по разрезу», имеющих широкий возрастной диапазон?

На резко различное биостратиграфическое значение разных таксонов указывали К. Динер, Л. С. Либрович, В. Аркелл, О. Шиндевольф и многие другие. Выдвигая аналогичный аргумент, Дж. Елецкий заявлял, что невозможно изобрести какое-либо количественное выражение для оценки биостратиграфического значения таксонов. При этом он исходил из представлений об относительной природе биологического времени, задающего только понятия «раньше — позже», а не «насколько раньше», «насколько позже». Ответом на критику Дж. Елецкого послужили математические разработки А. Кокбейна, А. Мак Кеммона, Дж. Хейзела [45].

А. Кокбейн в 1966 г. предложил использовать информационную функцию Шеннона — Винера $H(x) = -\sum_i p(i) \log_2 p(i)$, где i — биостратиграфическая единица, например, зона, $p(i)$ — вероятность установления этой единицы. Если фанерозой делится на 250 зон и вероятность установления каждой зоны одинакова, то ископаемые органические остатки, по которым выделяются отдельные зоны, имеют $H(x) = \log_2 250 = 7,96$ бит. Для органических остатков, выделяющих одну зону из десяти, $H(x) = \log_2 10 = 3,32$ бит и т. д.

Дж. Хейзел в 1970 г. для оценки биостратиграфической значимости таксона ввел показатели: биостратиграфическое постоянство

во — относительное количество коллекций, содержащих данный таксон, от всего количества коллекций данного стратиграфического подразделения; биостратиграфическая достоверность — биостратиграфическое постоянство, деленное на сумму процентов данного таксона во всех стратиграфических подразделениях изучаемого района.

Для использования метода А. Кокбейна и метода Дж. Хейзела необходима ранее полученная шкала, в которой выделены зоны; она позволяет проследить на местности стратиграфические подразделения. Но именно в построении такой шкалы и состоит основная трудность. Принимая шкалу как нечто данное, мы решаем второстепенные, чисто технические вопросы. По сути дела, проблема сводится к распознаванию: задан эталонный набор объектов — зон, на основе которых вычисляется функция Шеннона для каждого вида, стратиграфических подразделений на местности, позволяющих оценить распространенность вида в каждом из них и степень предпочитания видом именно этого подразделения перед другими подразделениями. Зная такие количественные характеристики, мы можем оценить, насколько тяготеет любой новый предъявленный нам объект к одному из эталонных классов. Как и в старом процентном способе, каждый вид получает итоговую оценку: «миоценовый», «миоцен-плиоценовый», «преимущественно среднемиоценовый» и т. д. Соотношение видов и их оценок позволяет вычислить возраст комплекса, т. е. его положение в существующей шкале. Совпадение возрастов дает право на их корреляцию.

Но ведь, имея готовую шкалу, мы можем и без всяких математических вычислений установить возраст каждого комплекса путем нахождения областей пересечения возрастных диапазонов всех составляющих его признаков. По-видимому, нужда в математических разработках возникает в связи с тем, что разрешающая способность шкал во многих ситуациях оказывается недостаточной. Если для всех слоев разреза, которые нам надо по отдельности проследить на местности, шкала дает одинаковый возраст — миоцен, то иногда оказываются полезными и такие сведения, хотя данный вид имеет широкий возрастной диапазон — миоцен, но в среднем миоцене он встречается чаще, чем в раннем и позднем. И если заключение о возрасте в данном случае не является промежуточным звеном в цепи однозначного логического вывода, не способствует построению геологических объектов, пригодных для многих дальнейших целей, в том числе и для неизвестных в процессе построения, а нужно всего лишь для получения экономически оправданного решения конкретной практической задачи (бурить или не бурить?), статистические, количественные данные о предпочтении видом какой-либо части своего возрастного диапазона принесут большую пользу. Если вид в 90 % случаев встречается в среднем миоцене, другими фактами мы не располагаем, а выбирать между ранним и средним миоценом необходимо, конечно мы предпочтем средний миоцен. По крайней мере, можно надеяться, что из 100 пробуренных скважин 90 вскроют нужный

слои на предсказанной глубине. Но выделять средний миоцен на геологической карте на таких основаниях нецелесообразно. Средний миоцен удержится на ней лишь до первого противоречия. Разумнее будет показать нерасчлененный миоцен.

Р. Мак Кеммон в 1970 г. ввел показатель RBV — относительная биостратиграфическая ценность (relative biostratigraphic value) окаменелости:

$$RBV = \alpha (1 - \mu_v) + (1 - \alpha) \mu_h,$$

где α — мера фациальной независимости таксона; вычисляется как количество фациальных типов, в которых встречается таксон, деленное на общее количество фациальных типов;

μ_v — вертикальный диапазон (vertical range); устанавливается как максимальное среди всех разрезов значение стратиграфической мощности, занимаемое данным таксоном;

μ_h — латеральная устойчивость (lateral persistence), равна числу местонахождения (localities), в которых присутствует таксон, деленному на общее количество рассматриваемых местонахождений.

Как считают В. Хей и Дж. Саузем [45], Р. Мак Кеммон полностью опроверг аргументацию Дж. Елецкого, предложив объективный метод взвешивания относительного биостратиграфического значения каждого таксона в комплексе. Однако, как и в случае со сквозным диапазоном А. Чизэма и П. Дебу, вертикальный диапазон μ_v Р. Мак Кеммона по тем же причинам может быть предельно узким и у видов очень широкого возрастного диапазона. Этот важнейший показатель будет тогда лишь дезориентировать представление о биостратиграфической значимости. В случае же подсчета стратиграфической мощности по готовой эталонной схеме корреляции все опять сводится к использованию шкалы и экстраполяции ранее принятой корреляции.

КОРРЕЛЯЦИЯ ПО ОТЛИЧИТЕЛЬНЫМ ПРИЗНАКАМ

Основным недостатком методов корреляции по наибольшему сходству является игнорирование важнейших для стратиграфии фактов об изменении характеристик изучаемого пласта вверх и вниз по конкретному разрезу.

Стратиграфическое (а не фациальное) отождествление основывается на сходстве не любых признаков, а только тех, которые отличают данное стратиграфическое подразделение от выше- и нижележащих. Эта основная специфика стратиграфии учитывается при корреляции по отличительным признакам, главный недостаток метода корреляции по наибольшему сходству здесь преодолевается.

Эволюция математических методов стратиграфической корреляции, по-видимому, повторяет с 200-летним запозданием общее развитие стратиграфии — от сравнения по любым признакам к поискам отличительных признаков Г. Бронна.

Последовательность действий в рамках данной методики тако-

ва: формируются множества, два или более, взаимно одновозрастных объектов А и взаимно одновозрастных объектов В, причем между собой А и В разновозрастны. Как строятся А и В, как устанавливаются их взаимоотношения — не оговаривается, принимается как заданное, полученное по результатам предыдущих исследований. Далее находятся признаки, отличающие А от В, и используются для классификации новых объектов. Коррелируются друг с другом только пласты, отнесенные к одному классу. Существования других классов, более молодых, чем наиболее молодой из А и В, или более древних, чем наиболее древний из них, или занимающих промежуточное возрастное положение, не предполагается.

А. А. Валуйский и И. П. Жабрев [5], изучая нижнемеловые отложения Ейско-Березанского района Краснодарского края, получили обучающие выборки из 30 образцов аптской и 30 образцов альбской толщи, описанных 73 минералогическими признаками. «Причем для обучения были выбраны пласты преимущественно из тех частей разреза, стратификация которых производится достаточно уверенно» [5, с. 70]. На основании применения алгоритма распознавания выявлены признаки, наиболее информативные (в статистическом смысле) для различения апта от альба — содержание глауконита в легкой фракции, пирита, брукита и т. д. «Следует помнить, что признаки эти не являются «руководящими» (по аналогии с руководящими ископаемыми), т. е. само наличие того или иного признака не определяет принадлежности образца к какой-то толще; лишь совокупность признаков дает возможность отнести образец к какой-то из двух толщ, причем заранее должно быть известно, что он не принадлежит к какой-нибудь третьей толще» [5, с. 72]. Проверка полученных результатов на образцах известного возраста, не включенных в материал обучения (экзамен), дала 159 правильных ответов из 185, или 86 %.

Ю. С. Виницкий и др. [7] отмечают, что они не решают общую задачу стратиграфической корреляции, а рассматривают лишь частный случай, когда имеются надежные реперы и мощности пластов постоянны: «Тогда задача корреляции сводится к следующему: задано некоторое количество надежно скоррелированных скважин (т. е. по совокупности скважин выделен ряд пластов) — требуется по набору числовых характеристик пласта в обрабатываемой скважине выяснить его идентичность с одним из ранее выделенных пластов месторождения или же сделать вывод о том, что встречен новый пласт. С математической точки зрения задача корреляции разрезов скважин сводится к задаче распознавания» [7, с. 58].

Материал обучения по одному из месторождений Башкирии был разбит на пять классов с объемом от 16 до 18 объектов. Распознавание производилось по признакам геофизического каротажа — кажущееся сопротивление, собственная поляризация, гамма-каротаж, нейтронный гамма-каротаж, микроградиент-зонд, микропотенциал-зонд, кавернограммы, а также по геометрическим

характеристикам — мощность репера, отношение расстояния от кровли репера до кровли пачки к мощности пачки, всего 11 параметров. Для отнесения опознаваемого объекта к одному из классов вычислялось его расстояние в 11-мерном пространстве до всех классов, затем выбиралось минимальное. Если оно оказывалось допустимым, образец относился к ближайшему классу, если превышало допустимое, образец считался неопознанным или принадлежащим к новому классу. На материале экзамена по тому же месторождению (четыре скважины) установлено, что все реперы опознаны правильно; на другой площади, где предполагалось, что они также должны прослеживаться, без дополнительного обучения правильно опознаны четыре репера. Некоторые реперы опознаны неверно, что истолковано в пользу необходимости дополнительного обучения при переходе к новому месторождению.

Р. Даскам [40] для формирования образа (pattern detection) использует на начальном этапе некоторое количество разрезов, скоррелированных вручную; затем, по мере получения результатов автоматической корреляции, для идентификации исследуемого пласта привлекаются лишь скважины, непосредственно окружающие данную и скоррелированные между собой на ЭВМ. Формирование образа рассматривается как нахождение на материале обучения признаков, общих для всех эталонных образцов заданного класса. Подробно изложены методы разбиения на непересекающиеся области N -мерного признакового пространства, основанные на предположении, что образцы одного и того же класса (в данном случае — стратиграфического подразделения) должны быть близкими друг к другу по N свойствам. Введены предположения, отражающие специфику стратиграфии и сокращающие число векторов, с которыми необходимо сравнивать опознаваемый: 1) слои не слишком деформированы или развиты разломами, 2) последовательность фаций упорядочена, 3) между надежно установленными реперами отсутствуют стратиграфические перерывы, 4) если не имеется противоречащих данных, отождествляемые слои должны залегать на примерно одинаковой глубине, 5) общая мощность песчано-глинистого горизонта должна сохраняться: если в некотором направлении увеличиваются мощности песчаных слоев, то мощности глинистых слоев того же горизонта должны в этом направлении сокращаться.

В методике корреляции по отличительным признакам можно выделить два наиболее слабых момента:

1) используется готовая схема корреляции, основанная на готовой шкале. Но если эта шкала есть, то можно взять все ее признаки с их возрастными диапазонами и датировать каждый новый слой без всяких алгоритмов распознавания непосредственно по шкале, путем нахождения областей пересечения возрастных диапазонов всех найденных здесь признаков, тем более, что корреляция по отличительным признакам не увеличивает разрешающую способность шкалы, как в случае корреляции по наибольшему сходству;

2) анализируемый разрез может нарушить порядок, принятый в шкале и эталонной схеме корреляции, но он не учитывается при построении шкалы, на него лишь распространяется ранее найденный порядок. Таким образом вводится предположение: найденный порядок устойчив, он действителен и для данного нового разреза. Но это предположение неприемлемо без ограничений. Однако его можно конструктивно и с пользой применить в наших алгоритмах синхронизации. Перестраивать шкалу и пересчитывать все возрастные диапазоны с появлением каждого нового разреза неэкономно. Новые разрезы можно коррелировать, используя ранее найденные отличительные признаки, те, возрастной диапазон которых не выходит за пределы данного прослеживаемого подразделения, тем более, что процедура получения таких признаков в случае использования определений и алгоритмов (см. с. 29) однозначна, непротиворечива, основана на использовании только наблюдаемых данных. Для одного, двух, трех новых разрезов и т. д. можно применять найденные отличительные признаки, а когда новых разрезов станет больше десяти, следует организовать по всему имеющемуся на данный момент материалу перестроение шкалы и перепроверку синхронизации. Возможно и менее произвольное, более объективное выявление ситуации, когда перестроение шкалы необходимо. Если в данном анализируемом слое встречены признаки с разными, непересекающимися возрастными диапазонами или вышележащий объект будет датирован более древним возрастом, то такое обнаружение отказов и противоречий в датировке должно служить сигналом, командой к перестроению шкалы.

ВИЗУАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ КРИВЫХ

Такие недостатки корреляции по отличительным признакам, как оперирование априорно заданными разбиениями на классы, а не исходными данными, и использование не всей имеющейся в фактическом материале последовательности, а лишь тех ее частей, по которым было признано необходимым (или возможным) сформировать классы обучения, преодолеваются при визуальном сравнении кривых.

Началом применения метода можно считать корреляцию по каротажным кривым. Чисто механическое, без спекулятивных интерпретаций, выявление и прослеживание от диаграммы к диаграмме, от скважины к скважине характерных значений, точек, конфигураций оказалось настолько приемлемым для стратиграфов, что многие другие данные, обычно представляемые в форме, совсем не похожей на каротажные кривые, стали приводить к виду, допускающему применение метода визуального сравнения геометрического облика кривых.

Так произошло и с чисто качественными данными о литологическом составе пород по разрезу. А. Б. Вистелиус и М. А. Романова [8], столкнувшись с большими трудностями в расчленении и

корреляции монотонной, фациально неустойчивой, разбитой многочисленными нарушениями терригенной красноцветной толщи п-ова Челекен, перевели весь набор литологических данных в совокупность цифр. Глине, например, был приписан ранговый номер 1,4, глине песчанистой — 5,6, песку глинистому — 20,3, песку крупнозернистому — 42,0, конгломерату — 49,0. «Ранговые номера были выбраны так, что типичные компоненты пород, отложенные в более застойных условиях, имели меньшие ранговые номера, а типичные компоненты пород, отложенные в более мобильных условиях, имели большие номера» [8, с. 27]. Так как полученные по каждому конкретному разрезу кривые были очень зазубренными, имели слишком сложную конфигурацию, перед сопоставлением они сглаживались по 21-членной формуле Спенсера:

$$U'_0 = \frac{1}{350} \{60U_0 + 57(U_{-1} + U_1) + 47(U_{-2} + U_2) \dots - 5(U_{-8} + U_8) - (U_{-10} + U_{10})\}.$$

Для вычисления значения сглаженной кривой в данном интервале (U'_0) учитывалось значение исходной кривой в том же интервале (U_0) с максимальным весом — 60, значение кривой в интервалах непосредственно соседствующем сверху (U_1) и снизу (U_{-1}) с меньшим весом — 57 и т. д. вплоть до значений, замеренных в интервалах десятом сверху от данного (U_{10}) и десятом снизу (U_{-10}) — с минимальным весом, равным 1.

Сглаженные кривые по разным разрезам сравнивались друг с другом. В большинстве случаев обнаруживались участки кривых, имеющие отчетливое визуальное сходство. Эти участки сопоставлялись; если при таком сопоставлении выявлялись части одной кривой, расположенные целиком выше или целиком ниже другой сравниваемой кривой, общий разрез наращивался. Путем такого последовательного наращивания строился эталонный сводный разрез, и именно с ним сравнивались впоследствии другие конкретные разрезы. Метод функционального профилирования, названный так его авторами, проверялся на эталонных схемах сопоставления продуктивной толщи Апшерона, отложений татарского яруса Урала. Полученные результаты совпадали с теми, которые ранее были признаны правильными.

СКОЛЬЗЯЩАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ

При сопоставлении разрезов скважин по их каротажным диаграммам, т. е. именно в сфере зарождения и наиболее массового применения метода визуального сравнения кривых, давно возникли потребности в альтернативе рутинному ручному труду, дающему к тому же неоднозначные, субъективные результаты, зависящие от опыта исполнителя, его характера и личных привычек, в разработке объективной процедуры, реализуемой на ЭВМ. В 60-х и 70-х годах такие процедуры, отвечающие всем предъявленным требованиям, были созданы. Не сразу было замечено, что, устранив одни проблемы, они породили другие, заставившие вспомнить о

достоинствах, до того остававшихся в тени, методов визуального сравнения.

Разработанная методика математического сравнения кривых была названа «скользящей корреляцией» [8]. В американской стратиграфии принят тот же термин — *sliding correlation*. Суть скользящей корреляции в следующем.

Две сравниваемых кривых для считывания цифровых значений разбивают на одинаковые интервалы. Затем их располагают друг против друга в первой позиции — например, самый верхний интервал кривой X , $-x_n$ сопоставляется самому нижнему интервалу кривой Y , $-y_1$. Подсчитывают коэффициент сходства сопоставленных интервалов. На первом этапе скольжения подвижную кривую X перемещают на один интервал выше; теперь интервал x_n оказывается уже против y_2 , а x_{n-1} — против y_1 . Подсчитывают суммарный коэффициент сходства обеих пар сопоставленных интервалов и т. д. постепенно, пока вся кривая X не окажется целиком выше кривой Y . Взаиморасположение X и Y , при котором коэффициент сходства достигает максимума, указывает на достижение искомой корреляции.

Первая, как считают авторы, реализация на ЭВМ скользящей корреляции конкретных разрезов по их каротажным кривым принадлежит А. Рудману и Р. Блейкли [49]. На каждом этапе значения кривых в сопоставленных парах интервалов перемножались, подсчитывалась сумма таких произведений по всем парам. Совпадение высоких значений оценивается при этом более высоким баллом, чем совпадение малых значений. Поэтому значения обеих кривых нормировались, т. е. приводились к интервалу от 0 до 1.

Ту же формулу для вычисления коэффициентов сходства применял Дж. Робинсон [47]. Краевые эффекты минимизировались использованием «скользящего окна»: чтобы уменьшить количество позиций, при которых интервалы подвижной кривой не находят себе пары в неподвижной кривой (это сильно искажает значения коэффициентов сходства), передвигалась лишь часть меньшей кривой X — окно (*window*). В приведенном примере 240-метровое окно скользило вдоль 3600-метровой неподвижной диаграммы.

Дальнейшее развитие метод «скользящей корреляции» получает в работе А. Рудмана и Р. Блейкли [49]. Разрезы сопоставляются уже не по отдельным кривым, а по парам кривых — собственного потенциала и кажущегося сопротивления (*self-potential and resistivity logs*), по которым вычисляется один суммарный коэффициент сходства. Для его подсчета принимается другая, более сложная формула.

Не имеет себе равных по широте и глубине эмпирического обоснования методика «скользящей корреляции», разработанная А. Б. Вистелиусом и М. А. Романовой [8] (монография этих авторов была опубликована намного раньше любых других работ на ту же тему).

Скользящая корреляция применяется как вспомогательная методика для тех интервалов разреза, по которым функциональное

профилирование (см. с. 126) не дало удовлетворительного результата. Сравнимые разрезы X и Y делятся не на интервалы равной длины, как в большинстве вышеизложенных методов, а на слои. Строится график изменения мощности слоев по разрезу, как в коннексионных диаграммах Де Геера, ритмограммах Н. Б. Васоевича. По вертикали откладывается номер слоя от основания разреза, по горизонтали — мощность слоя. На каждом этапе график меньшей длины X смещается относительно графика большей длины Y на один слой, в каждой позиции подсчитывается коэффициент корреляции. Существует два варианта скользящей корреляции: 1) сопоставление звеньями (при допущении, что ни один из слоев не выклинивается при прослеживании до другого разреза) и 2) сопоставление блоками (когда предполагается выпадение слоев из какого-то разреза). Рассмотрим сначала первый, более простой вариант.

Как считают А. Б. Вистелиус и М. А. Романова, коэффициент корреляции должен достигать максимума в том положении, когда сопоставлены части единого слоя, протягивающегося от разреза к разрезу. Кроме того, чтобы исключить случайные совпадения, значение коэффициента корреляции должно быть статистически значимым с точки зрения его отношения к стандарту.

«Указанные положения будут справедливы в том случае, если мощности слоев из разреза x будут линейно связаны с мощностями тех же слоев в разрезе y , т. е. если удовлетворяется соотношение

$$y_i = L(x_i) + \xi,$$

где L — линейная функция и ξ — случайная компонента, такая, что даваемые ею величины, входящие в y , малы по сравнению с величинами, даваемыми компонентой $L(x_i)$ » [8, с. 43].

Сформулированное предположение о линейном законе пространственного изменения мощностей аналогично основной посылке модели Хейтса [43]. Считая это утверждение приемлемым по общегеологическим соображениям, А. Б. Вистелиус и М. А. Романова тем не менее подвергают его проверке.

В акчагыльских отложениях Апшерона были непрерывно прослежены на 250 м вкост простирания несколько слоев, в наиболее удаленных друг от друга концах обнажения составлены два разреза и обработаны методом скользящей корреляции. Наибольшее значение коэффициента корреляции $+0,97$ достигнуто в момент совмещения одних и тех же слоев. Тот же эксперимент с тем же результатом проводился при сопоставлении разрезов верхнемелового карбонатного флиша, вскрытого карьерами в районе г. Новороссийска. При любом скольжении одной последовательности относительно другой какое-то значение коэффициента корреляции будет наибольшим. В каком случае достигнутый максимум можно считать значимым? Вопрос, который не ставили перед собой другие исследователи, хотя непонятно, как, не получив на него ответа,

они могли считать критерием стратиграфического сопоставления максимальное значение коэффициентов сходства.

Для проведения эксперимента был взят сводный разрез красноцветной толщи Челекена, насчитывающий 1258 слоев. Относительно него скользили пачки конкретных разрезов, насчитывающим от 6 до 22 слоев. Вычислялись коэффициенты корреляции при скольжении каждой малой последовательностью вдоль большой снизу доверху. Так как для малых выборок распределения коэффициентов корреляции асимметричны, были вычислены по формуле Фишера величина

$$z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r},$$

имеющая нормальное распределение, и ее стандарт

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}.$$

Поделив показатель z на его стандарт, получили величину t . Анализ поведения значений t в данном эксперименте показал, что для пачки, например, из 8 слоев (разрез РА) в сводном разрезе насчитывается 68 пачек из 8 слоев, в которых последовательные значения мощностей столь близки друг к другу, что дают коэффициент корреляции с критерием t больше 3,125. Для пачки из 22 слоев (разрез Р) лишь в двух случаях значение t превышало 3,125. Результаты эксперимента интерпретируются его авторами следующим образом.

Если в каждом из сравниваемых разрезов между мощностями отдельных слоев не существует связи, «то значение $t > 3$ является очень редким и на него можно опираться, считая, что при t заметно больше трех на тысячу слоев может быть две или три пачки, случайно построенных аналогичным образом.

Если в сравниваемых пачках любые x_i и x_k связаны и соответственно y_1 с y_k , то значения оценок t должны быть резко повышены, и симптоматичными могут считаться только t больше пяти или шести» [8, с. 64—65].

«Итак, сопоставление разрезов с помощью корреляции звеньев при отсутствии связи между мощностями дает надежные результаты. К сожалению, этот случай редок. Все остальные случаи дают сопоставления, требующие дополнительного геологического контроля» [8, с. 65]. Из всех вариантов сопоставления с достаточно высоким значением t геолог сам должен выбрать положение истинной корреляции.

Методы скользящей корреляции при сопоставлении нечисловых последовательностей разрабатывались Дж. Харбухом и Д. Мерриамом [44]. Разрезы, описанные только по литологическим характеристикам, они предлагают записывать как последовательность символов, например, А, В, С, D..., где буквой А обозначен песчаник, В — аргиллит и т. д. При смещении одного разреза

относительно другого в каждой позиции подсчитывался коэффициент множественной корреляции (cross-association coefficient), вычисляемый как общее количество попарных совпадений символов, деленное на общее количество сравнений. Для приведения количественных данных к тому же виду их можно перевести в полуколичественные, например, содержание железа разделить на три градации: А — низкое, В — среднее, С — высокое и т. д. Разрезы могут быть описаны несколькими последовательностями символов: отдельно по литологии, по палеонтологии, по геохимии и любым другим признакам. В этом случае совпадения по символам разных последовательностей суммируются; суммируется и общее количество сравнений. В числе достоинств скользящей корреляции Дж. Харбух и Д. Мерриам указывают использование исходных наблюдаемых (raw — сырых) данных.

Сопоставление трех разрезов циклично построенных отложений пенсильвания в Центральном, Южном Канзасе и в Восточной Оклахоме дало наивысшее значение коэффициента в положении, близком к наилучшей стратиграфической корреляции (очевидно, по результатам предыдущих исследований принятой за эталонную), но все же не совпадающем с ней. По-видимому, в связи с цикличностью разреза был получен не один, а несколько пиков значений коэффициента множественной корреляции.

Во всех изложенных вариантах (кроме методики А. Б. Вистелиуса и М. А. Романовой) скользящая корреляция сталкивается с такой трудностью, как возможное изменение мощностей от разреза к разрезу: «Хороших сопоставлений может вообще не быть, если слои в одной последовательности в 1,2 мощнее, чем в другой» [44, с. 170]. Дж. Харбух и Д. Мерриам не предлагают методических приемов, устраняющих эту трудность, другие же авторы, вслед за Н. Найделлом используют конструктивный прием [49].

После того как найдено наивысшее значение коэффициента при скользящей корреляции двух кривых, изображенных в одинаковом масштабе, одна из них растягивается в 1,1 раза, скольжение и поиск наивысшего значения коэффициента повторяется еще раз, затем еще и еще с масштабом растяжения 1,2; 1,3 и т. д. По максимальному значению фиксируется оптимальное растяжение и смещение одной кривой относительно другой.

Серьезным затруднением, встречаемым при скользящей корреляции, о котором пишут практически все пользующиеся этим методом, является также возможное выпадение слоев в одном из разрезов, сразу деформирующее все вычисления и основанные на них выводы.

А. Б. Вистелиус и М. А. Романова [8] предлагают разновидность метода, учитывающую и уменьшающую отмеченную трудность, — сопоставление блоками. В этом варианте должно быть заведомо известно, что лишь часть сравниваемых в каждой позиции слоев являются общими для обоих разрезов, но их процент не должен быть меньше 80. Тогда можно при каждом сравнении исключить пары слоев, понижающие значение коэффициента кор-

реляции. А. Б. Вистелиус и М. А. Романова исследуют, какое изменение коэффициента может быть связано случайности. Для этого они проводят эксперимент по сравнению последовательности из 1000 следующих подряд последних двух цифр в таблице десятичных логарифмов с другой последовательностью из 120 цифр той же таблицы. Полученное после выбрасывания 20 пар цифр, уменьшающих коэффициент корреляции, максимальное значение t было равно 4,6. «Таким образом, при искусственном удалении 20 % наблюдений, понижающих коэффициент корреляции, мы получили величину t во всяком случае значительно меньше 6. Следовательно, если в практической работе мы используем сопоставления, дающие при исключении от 20 % наблюдений и меньше, коэффициент корреляции с $t > 6$, то при удовлетворительном геологическом контроле мы сможем использовать в нашей работе увязку блоками. Конечно, в этом случае нужно быть очень осторожным и ни в коем случае не опираться только на значения коэффициентов корреляции» [8, с. 66]. Для очень распространенной геологической ситуации, когда выпадает более 20 % слоев, никакого метода не предлагается. Кроме того, непонятно, зачем же выбрасывать пары слоев, если речь идет о выпадении слоев только в одном из разрезов? По-видимому, надо выбрасывать из этой пары лишь один слой, а оставшийся объединять в новую пару с тем, что лежал выше или ниже выброшенного, что должно привести к полной перекombинации всех пар.

Несмотря на все сделанные и возможные усовершенствования, методика скользящей корреляции не претендует ни на что большее, чем на вспомогательную роль. До ее применения должны быть заранее выделены интервалы разреза, в которых наивысший коэффициент сходства указывает на оптимальное стратиграфическое сопоставление, должна быть известна хотя бы грубая корреляционная схема. Комментируя результат скользящей корреляции, зафиксировавший положение с наиболее высоким коэффициентом сходства в 750 м от правильной палеонтологической корреляции, Дж. Робинсон [47] пишет, что проблема вовсе не в алгоритмах математического или визуального сравнения кривых: «Реальная трудность в том, что геологическая корреляция — процедура хроностратиграфическая, а автоматическая корреляция — литостратиграфическая. Геологические последовательности могут становиться не только более мощными и менее мощными, но и обнаруживать выпадения слоев, фациальные изменения» [47, с. 326]. Выход он видит в том, чтобы совместить достоинства ручных и автоматических процедур: кривые должны подвергаться предварительной корректировке с целью исключения перерывов, циклов, инструментальных ошибок, подвергаться необходимым преобразованиям (квадратного корня, степенным и т. д.), улучшающим их сопоставимость. По-видимому, все высказанные соображения следует принять, с одной лишь оговоркой. Все вмешательства в скользящую корреляцию со стороны должны быть однозначными, основанными на понятиях геохронологической шкалы и ее произ-

водных — возрастных диапозонах, стратиграфических подразделениях, несогласиях, фациях и т. д.

КОРРЕЛЯЦИЯ ПО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НАИБОЛЬШИХ СХОДСТВ

Многочисленные трудности скользящей корреляции связаны с фактическим принятием слишком жестких требований, в явном виде, правда, не сформулированных: в сравниваемых разрезах должны сохраняться — одинаковый порядок следования коррелируемых пластов, одинаковые отношения непосредственного соприкосновения (непосредственно выше каждого из сопоставляемых друг с другом пластов должны находиться пласты, также сопоставляемые друг с другом; то же для нижележащих), одинаковые мощности сопоставляемых пластов.

Это стало ясным после того, как Ш. А. Губерман и др. [13] в 1968 г. сформулировали первое из этих требований отдельно — сохранение порядка следования взаимно коррелируемых пластов в скважинах. Порядок следования двух объектов А и В не зависит от того, какое расстояние отделяет А от В и есть ли между ними какие-то другие объекты С и D.

На этом принципе была построена гораздо более гибкая методика, получившая более широкое распространение, чем скользящая корреляция. При этом пласты объединялись в пары на основе наибольшего сходства. Начало подобным разработкам было положено Б. Ековским [46].

Последовательность пластов одного из коррелируемых разрезов откладывается по оси X, второго — по оси Y. Для каждого пласта разреза X вычисляется показатель его сходства с каждым из пластов разреза Y. В результате получается матрица — поле цифр, по которым, как по гипсометрическим отметкам, строится рельеф в изогониях. Водораздел этого рельефа, соединяющий точки с наибольшими сходствами, принимается за линию корреляции. Абсцисса и ордината каждой точки водораздельной линии представляют собой пару синхронизированных отметок в разрезах X и Y. Успешное применение «метода минимальных расстояний» (*la méthode des distances minimales*) иллюстрируется примером корреляции двух скважин, пробуренных в Сенегале и вскрывших меловые отложения. Один разрез представлен последовательностью из 10 образцов, второй — из 8. Расстояние между скважинами 30 км. Упоминается о «дюжине других, более сложных испытаний метода» [46].

В применяемой методике много неясных моментов. Если продолжать обсуждение на языке топографических аналогий, то почему линия водораздела должна быть единственной во всем анализируемом поле, откуда следует, что их не может быть две, три или что линия не может расщепляться, как это происходит с водоразделом в географии? Возможно ли, чтобы водораздельная линия дважды пересекала одну и ту же абсциссу или одну и ту же орди-

нату? Условий, как-то ограничивающих ее поведение (аналогичных, например, условию Губермана), не сформулировано. Исходный фактический материал допускает многочисленные и, по-видимому, непредусмотренные аномалии.

Б. Ековский [46] считает, что неоднозначность может быть устранена сглаживанием исходных данных (doppes brutes). Однако для рельефа земной поверхности, например, никакое сглаживание не позволит получить на любой территории единственный хребет или единственную долину. Чем отличается рельеф, построенный по методу Ековского, от земного, не уточняется.

В работах Ш. А. Губермана и др. метод получает дальнейшее развитие, ясные и четкие формулировки [13]. Прежде всего, фиксируются две цели корреляции — синхронизация и установление частей одного и того же геологического тела. Реализуются два основных принципа корреляции: 1) выявление участков каротажных диаграмм, похожих по своей конфигурации, и 2) сохранение порядка следования взаимно коррелируемых пластов в скважинах, для чего линия корреляции на графике должна быть монотонной. Очень часто для отдельных интервалов разреза отношение мощностей пластов в соседних скважинах есть величина постоянная; последнее условие означает принятие модели Хейтса.

Каротажные диаграммы коррелируемых скважин для снятия цифровых значений кривых разбиваются на интервалы по 1 м. Сравнение производится по участкам длиной 48 м; сравниваются каждый с каждым участки двух сопоставляемых скважин.

Отмечается, что лишь в особо благоприятных случаях все точки с максимальными значениями коэффициентов сходства лягут на непрерывную гладкую кривую. Чаше корреляционную линию, чтобы обеспечить выполнение второй и третьей посылок (одинаковый порядок следования взаимно коррелируемых пластов в обоих разрезах и линейный характер изменения мощностей от разреза к разрезу), приходится проводить на отдельных отрезках через точки не с наибольшими значениями коэффициентов сходства. Делается это следующим образом.

Для каждого из участков скважины X на график наносят только цифры, соответствующие максимумам функции сходства — K_m . Среди всех нанесенных локальных максимумов функции сходства K_m один будет наибольшим — K_{mm} . Чтобы выполнялись требования модели Хейтса, корреляционная линия, проведенная через все K_{mm} , должна быть прямой. Если же прямая линия проводится через три точки с K_{mm} , но на каком-то участке отклоняется от очерченной K_{mm} и попадает на локальный максимум K_m , алгоритм игнорирует аномальную K_{mm} , предпочитая выполнение третьей посылки (вторая выполняется автоматически при выполнении третьей, первая в данном случае нарушается) (Ш. А. Губерман и др., 1968 г.). В более поздних работах рекомендации несколько иные [13].

Сначала наносятся на график все K_m и K_{mm} . Затем из всего множества K_{mm} подбирается такая последовательность точек, каж-

дая из которых удалена от прямой L , проведенной через них по методу наименьших квадратов, не больше чем на величину 2σ (где σ — средний квадратичный разброс точек). Если некоторая точка K_{mm} лежит вне интервала 2σ , то она отбрасывается и заменяется, если это возможно, другой точкой локального максимума K_m , расположенной внутри интервала $\pm 2\sigma$ и ближайшей к прямой L . Из найденного множества K_{mm} берутся первая, вторая и третья точки с наименьшими координатами глубин. Через них проводится по методу наименьших квадратов прямая l_1 , подсчитывается σ_1 для этих точек и проверяется выполнение условий $\sigma_1 < \xi$, где ξ — заранее заданная точность построения прямой. Если условие не выполняется, то третья точка отбрасывается, а к первым двум добавляется вместо нее другая. Для новой тройки строится прямая l_2 , вычисляется σ_1 и т. д., пока для данной пары первых двух точек не найдется подходящая третья точка. Если найдены, наконец, такие три точки, через которые с заданной точностью проходит прямая l , то программа пытается продолжить ее, т. е. найти дополнительные точки K_{mm} или K_m , попадающие с заданной точностью на прямую l . Если через какую-то область прямая не продолжается, то эта область анализируется далее отдельно по тому же алгоритму. В результате ЭВМ выдает несколько отрезков корреляционной прямой. По разрывам между ними выявляются выпадения пластов. Такой результат был получен, например, при корреляции скважин № 15 и 37 площади Учкыр (Средняя Азия) по их диаграммам ПС — собственной поляризации. Если машина выдает несколько линий корреляции, из них выбирается одна по наибольшему среднему значению коэффициентов K_{mm} или K_m в точках, лежащих на линии. Приведены примеры успешной корреляции разрезов скважин по их каротажным диаграммам для различных месторождений Башкирии и Татарии.

За основу в работах А. М. Волкова и др. [9, 39] было принято сокращение числа возможных вариантов корреляции. Содержательный смысл задачи сводился к нахождению варианта корреляции, который характеризуется минимальными различиями кривых и не противоречит имеющимся представлениям о геологическом строении района.

Представления о геологическом строении района позволяют сформулировать ограничение на допустимые варианты корреляции по углу падения: если при некотором варианте отметки двух скважин надо соединять линией, угол наклона которой превышает максимальные из всех известных для данного района, то такой вариант корреляции признается недопустимым. Аналогично вводятся ограничения по наибольшей амплитуде поднятия, по максимальному приращению мощностей, по расположению искомой корреляционной поверхности между двумя заданными поверхностями, например, между отражающими сейсмическими горизонтами.

Вводятся также ограничения, не требующие знания геологического строения конкретного района, формулируемые в общем виде:

номера литологических типов сопоставленных пород не должны различаться более чем на единицу (перенумерована последовательность: песок, алевроит, глина, мергель, известняк); проводимые линии или поверхности корреляции должны быть параллельными, не допускается отклонение от параллельности более чем на δ .

Если есть информация, которая не решает однозначно — допустимым или недопустимым является некоторый вариант корреляции, а говорит лишь о том, насколько хорошим или насколько плохим можно его признать, такие данные вводятся в виде штрафных функций. В числе допустимых вариантов, удовлетворяющих принятым ограничениям, находится оптимальный вариант. Поиск ведется в соответствии с моделью Хейтса или ее модификациями. Среди последних выделяются модели: 1) с перерывом в осадконакоплении, 2) с разломом и 3) с фациальным замещением. Для всех трех модификаций принимаются упрощающие предположения.

В модели с перерывом должно быть известно положение двух реперов в разрезах; поверхность перерыва располагается между реперами; отклонения от модели Хейтса вызваны только данным перерывом, если пополнить толщу под перерывом размытой мощностью, модель Хейтса должна полностью восстановиться; мощность размытых осадков линейно зависит от дефицита мощности: чем меньше мощность, тем на большую глубину размыт комплекс под перерывом.

В модели с разломом также должно быть известно положение двух реперов в коррелируемых разрезах; разлом пересекает только один из разрезов, остальные разрезы не нарушены; к ненарушенной части толщи предъявляются требования модели Хейтса.

Если предполагается фациальное замещение g -го интервала, сравнение разрезов ведется по всем интервалам, кроме g -го, «Тем самым корреляция проводится без фациально невыдержанного тела» [39, с. 27].

Отмечается, что линейный характер площадной изменчивости мощностей нарушается для разреза в целом при значительных размерах территории, например, для юрских и меловых отложений всей Западной Сибири. Для таких объемов уже не годится модель Хейтса, вместо нее рекомендуется модель, описываемая гармонической функцией, отвечающей предположению о волновом характере колебаний земной коры во время накопления изучаемой толщи.

Так как по всем коррелируемым скважинам информация имеется обычно лишь в виде каротажа, для сравнения разрезов целесообразно выбрать каротажные кривые. Различия между кривыми оцениваются по площади, заключенной между ними. Если мощности изменяются от разреза к разрезу, подбирается нужный коэффициент сжатия одной из кривых. В суммарный показатель вносятся также данные о различиях по литологии, фауне, спорово-

пыльцевым комплексам. Такой подход принимается А. М. Волковым и др. (1974 г.) [9, 39].

В 1978 г. А. М. Волков принимает другую процедуру вычисления сходства между интервалами разных разрезов [39]. Выбирается только одна каротажная кривая. Остальные используются для литологической классификации пород и начисления штрафов. Мера I различия двух каротажных диаграмм $f(x)$ и $\varphi(x)$ складывается из различия самих функций ρ_1 и различия их производных — ρ_2 :

$$I = \tau \rho_1 + (1 - \tau) \rho_2,$$

$$\text{где } \rho_1 = \left(\int [f(x) - \varphi(x)]^2 dx \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\rho_2 = \left(\int [f'(x) - \varphi'(x)]^2 dx \right)^{\frac{1}{2}},$$

τ — весовой коэффициент, изменяющийся от 0 до 1. При $\tau=1$ сравнение ведется только по абсолютным значениям функций, при $\tau=0$ учитывается только направление и скорость изменения функций, значения функций могут быть разными, важно лишь совпадение конфигураций и положения экстремумов.

Для устранения нежелательных влияний случайных флуктуаций рекомендуется перед сравнением произвести сглаживание кривых хотя бы методом скользящего среднего. Производится попарная корреляция скважин. Некоторый интервал нулевой (эталонной, опорной) скважины сначала прослеживается до первой скважины, затем от первой до второй и т. д. по замкнутому контуру вплоть до корреляции последней скважины снова с эталонной. Вычисленные попарные коэффициенты различия (с учетом штрафов) суммируются по всему контуру. Методами динамического программирования находится коэффициент корреляции с минимальной суммой.

Результаты корреляции иллюстрируются примером сопоставления 16 скважин одного из месторождений Западной Сибири (верхневартовская свита).

Рассмотрим корреляцию по последовательности наибольших сходств. Ее достоинства, преимущества перед скользящей корреляцией и другими проанализированными методами отмечены выше. Одним из недостатков, не имеющих принципиального значения, является использование попарного сопоставления разрезов.

Гораздо важнее другое. И именно на примере корреляции по последовательности наибольших сходств можно проанализировать недостаток, одинаково свойственный всем остальным методам. Здесь он не растворяется во множестве прочих недостатков, не маскируется ими, а выступает «в чистом виде».

В самом деле, кажется непонятным, почему столь продуманный, совершенный и изощренный метод тоже претендует лишь на вспомогательную роль. Ш. А. Губерман и другие пишут об этом прямо, А. М. Волков и В. Ф. Гришкевич косвенно признают то же

самое своими требованиями предварительного учета многочисленных априорных данных о геологическом строении района.

Разгадкой и здесь может служить высказывание Дж. Робинсона о том, что геологическая корреляция является хроностратиграфической по своей природе, а машинная корреляция — литостратиграфической, или, лучше сказать, литофациальной. Так как наибольшее сходство по комплексу признаков отражает фациальную, а не возрастную близость, то, переводя посылки метода на обычный геологический язык, можно сказать, что он означает сравнение разрезов по одинаковому изменению фаций.

Проиллюстрируем это примером. Есть две одинаковые трансгрессивные серии осадков, смещенные во времени одна относительно другой. Конгломератовая пачка серии А древнее аналогичной пачки серии В и не находит себе возрастного аналога в серии В, песчаная пачка серии А синхронна конгломератовой пачке серии В, алевроитовая серии А — песчаной серии В и т. д. Очевидно, что при сопоставлении по последовательности наибольших сходств возрастные коррелятивы будут деформированы, окончательный результат будет определяться синфазностью, а не синхронностью пачек.

Но это еще не самый худший случай. А если последовательность фаций в разных разрезах вообще несравнима, если фации меняются в разрезе и по площади хаотично, незакономерно? Ведь поведение фациальных показателей, обстановок тем и отличается от поведения возрастных показателей, что они могут вести себя прихотливо, по-разному в разных разрезах в отличие от последовательно, без повторений сменяющих друг друга на больших территориях хронологических, эволюционных признаков. Цель синхронизации — найти единый, устойчивый порядок вопреки всем случайным хаотичным фациальным изменениям. отождествление по общему фациальному сходству означает фактически отказ от построения единого хронологического порядка. Если принятие фациальной последовательности за возрастную в некоторых случаях и допустимо, то только тогда, когда непротиворечивость этой посылки предварительно установлена опять-таки с помощью геохронологической шкалы. Этому и служит априорное выделение реперов, учет знаний о геологическом строении исследуемого района, выбор интервала, в котором имеет смысл применять методы сопоставления по общему сходству. Но имеющаяся шкала, предварительно используемая перед применением алгоритмов нахождения общего сходства, иногда не обладает достаточной детальностью и дальностью действия; в этих случаях корреляция по общему сходству теряет четкий хронологический контроль. К ним, по-видимому, и относится отождествление по сходству кривых, на 750 м смещенное от действительного [47]; по А. М. Волкову, наибольшее сходство может быть установлено и между какими-то частями разновозрастных тюменской и покурской свит. В таких ситуациях ничего другого не остается делать, как построить шкалу по всему имеющемуся материалу, используемому для нахождения общего

сходства. Шкала позволит в любой обстановке обойтись без априорных подпорок.

Можно думать, что произвольный выбор одной из кривых, как наиболее пригодной для синхронизации, неформальное, интуитивное манипулирование весовыми коэффициентами как раз и означают продвижение в направлении построения геохронологической шкалы, разделения признаков на ортохронологические и парахронологические, руководящие и второстепенные. Но даже если это и так, такое продвижение нельзя считать значительным. Выбор или наивысшая весовая оценка, например, кривой ПС совсем не означает, что любые характеристики этой диаграммы будут одинаково важными для синхронизации. Какие-то конфигурации, точки, значения ПС могут быть руководящими, а другие — иметь широкий возрастной диапазон и малое распространение. Так что выбором или весовыми оценками некоторых кривых проблемы все равно не решить, тем более что вместо априорных назначений, интуитивных, неформальных, означающих постороннее вмешательство в метод корреляции, необходимо разработать формальную однозначную процедуру оценки и хронологической разбраковки материала в рамках самого метода. Такие процедуры уже разработаны, их можно было бы применить и для массового скважинного, в основном геофизического материала.

Однако скважинный каротаж, представляемый в форме кривых, непригоден для построения шкалы. Шкала строится на основе анализа вертикального и латерального распространения признаков, но признаки-то как раз и не выделяются на каротажных кривых. Сложные и разнообразные их конфигурации никак не классифицируются. О двух участках кривых можно сказать, сходны они или нет, можно количественно оценить степень их сходства, но нельзя сказать, что это за участки, к какому классу они относятся, каким термином обозначаются и соответственно каким символом их можно закодировать.

Преодолимы ли эти трудности? По-видимому, да, и необходимость их преодоления давно осознана, получены интересные, перспективные разработки.

А. Е. Куликович [16, 17] предлагает расчленять каждую кривую на участки по характерным точкам. Среди них выделяются прежде всего дифференциально-нулевые точки, где обращается в нуль какая-нибудь производная:

- 1) точки максимума и минимума ($y' = 0$),
- 2) точки перегиба ($y'' = 0$),
- 3) точки максимальной и минимальной кривизны ($y''' = 0$),
- 4) множество точек, образующих «площадку» на кривой, параллельную оси скважин; обращаются в нуль производные всех порядков одновременно.

Классификация допускает значительную детализацию — среди точек максимума могут быть выделены точки существенного, наибольшего максимума — *maximum maximum*, среди площадок — площадки первого и второго уровня и т. д.

Кроме дифференциально-нулевых, выделяются связанные точки, отстоящие от выбранной дифференциально-нулевой на заданное расстояние по глубине, а также уровенные точки, определяемые пересечением данной кривой с прямой линией заданного уровня значений, параллельной оси скважины. Все эти точки легко и алгоритмично устанавливаются по каротажной диаграмме с помощью ЭВМ и вручную. Максимумы, например, выявляются по смене знака конечных разностей: кривую разбивают на элементарные интервалы для считывания значений; между соседними интервалами находят разность значений, тогда максимум попадает на тот интервал, где знак разности меняется с положительного на отрицательный, т. е. где возрастание функции сменяется ее убыванием. Вторая производная заменяется второй разностью — вычисляется разность между двумя соседними разностями и т. д.

Все характерные точки и заключенные между ними участки кривых (лунка, горб, спад лунки, подъем лунки, большой спад и т. д.) образуют богатый язык, позволяющий описать, расклассифицировать, сравнить любые кривые.

А. Е. Куликович заменяет каждую кривую последовательно ее кодами, например, $H-A-K-B-C-D-A-E-C-H-N-Q$ и далее анализирует такую строку формально, отвлекаясь от содержания и происхождения каждого символа. Нетрудно видеть, что таким образом каротажные данные приводятся к тому же виду, что и литологические, палеонтологические, геохимические, по ним точно так же можно строить шкалы и производить любые возрастные построения — и алгоритмические, и интуитивные. Представление кривой в виде последовательности символов не исключает ее использования в первичном, традиционном виде. Возможно и различное представление одной и той же кривой в кодах — при разном выборе уровенных и связанных точек, учете или неучете некоторых дифференциально-нулевых точек, снятии значений с первичной или сглаженной кривой (причем при разных процедурах сглаживания) — и все эти разнообразные данные по одной кривой могут употребляться в одном и том же алгоритме (например, построения геохронологической шкалы) одновременно, подобно тому, как по одному и тому же образцу породы мы вводим в обработку разные признаки — конгломерат, конгломерат зеленый косослоистый, наличие глауконита и т. д.

На примере строк, приведенных А. Е. Куликовичем, удобно проиллюстрировать неравноправие разных признаков одного и того же свойства. Будем считать, что строка $H-A-K-B-C-D-A-E-C-H-N-Q$ построена на материале одной кривой — ПС (собственной поляризации) или на материале множества диаграмм ПС по разным скважинам, в данном случае это не имеет значения, главное, что свойство принято одно — собственная поляризация. Тогда символы А, В, С, ..., Q будут обозначать разные признаки этого свойства. При первом же взгляде на строку видно, что признаки А, С, Н в этом ряду повторяются, а К, В, D, E, N, Q образуют стратифицирующую последовательность. Если бы пришлось

строить шкалу только по материалам разреза с такой исходной последовательностью, именно эта шкала и была бы построена. Тогда для признака Н был бы установлен возрастной диапазон по шкале (К, Е), для признака С (D, Е), для признака А (К, D). Неравнозначность для целей синхронизации признаков одного и того же свойства очевидна. Но никакими весовыми коэффициентами и априорным выбором выявить ее невозможно. Строки А. Е. Куликовича позволяют сделать еще один важный вывод. Им сформулировано условие — разрезы двух (или более) скважин, представленные их последовательностями кодов, коррелируются тогда, когда они являются подстроками какой-то одной строки, т. е. когда они могут быть получены из этой исходной строки вычеркиванием некоторых ее символов. Например, три разреза:

$$\begin{array}{l} \text{I—A—K—B—C—D—A—E—C—H—N,} \\ \text{II—H—A—K—B—C—D—A—E—C—H,} \\ \text{III—K—B—C—D—A—E—C—H—N—Q} \end{array}$$

коррелируются, так как представляющие их последовательности символов являются подстроками строки H—A—K—B—C—D—A—E—C—H—N—Q. Наш алгоритм строит по исходным данным трех разрезов шкалу К, В, D, Е, N. Признак Q отбракован как распространенный в единственном разрезе, непригодность А, С, H для шкалы очевидна и при анализе строки А. Е. Куликовича они повторяются в этой последовательности. Их возрастной диапазон по шкале: А (К, D), С (D, Е), H (К, Е). Условие Куликовича — одно из наименее жестких, оно допускает любое изменение мощностей, выпадение из разреза любых слоев, но и оно все же слишком жесткое. Ведь при синхронизации необходимо сохранение лишь хронологического порядка, одинаковой последовательности разновозрастных признаков повсюду, где они встречены в одном и том же разрезе. На взаимоотношения друг с другом одновозрастных признаков или же признаков с пересекающимися возрастными диапазонами никаких ограничений не накладывается. Они могут находиться в разных разрезах в обратном порядке (в одном разрезе А выше С, а в другом С выше А), встречаться совместно в одном и том же слое, могут в частном случае образовывать одинаковые последовательности в разных скважинах. Например, признак Н может встретиться в любом месте своего возрастного диапазона и иметь любые отношения с К, В, D, Е, но не с N, с которым он должен сохранять возрастную последовательность, — быть ниже него. Признак А может встретиться в любом месте ниже Е — между D и Е, между С и D, между В и С, между К и В или совместно с любым из них, но с Е и N должен сохранять одинаковые отношения при любом обнаружении в одном и том же разрезе — быть ниже их. Каковы конкретные взаимоотношения в данном разрезе признаков с пересекающимися возрастными диапазонами, зависит от многих причин фациальных смен, случайности обнаружения — необнаружения признаков и т. д. Если принимать их во внимание, калейдоскопическое разнообразие взаимо-

отношений таких признаков может разрушить любую строку, сделать ее практически неэффективной.

Как видим, требование сохранения порядка всех признаков неприемлемо, оно противоречит модели Вернера, которая требует сохранения только возрастной последовательности. Можно сказать, что посылки, на которых основаны и в соответствии с которыми фактически работают все проанализированные методы корреляции, несовместимы с моделью Вернера и не могут быть приняты. Удачное применение методов в отдельных случаях объясняется привнесением возрастного (не фацеального) порядка со стороны, из традиционной стратиграфии, которая всегда была хроностратиграфией. Это выбор интервала, ограниченного изохронными реперами, фацеальная последовательность в котором совпадает с возрастной; выбор на глаз опытным геологом одного из многих вариантов сопоставления, полученных алгоритмически, — в методе скользящей корреляции, визуального сравнения кривых, корреляции по наибольшему сходству и по последовательности наибольших сходств. Это формирование возрастной последовательности наибольших сходств. Это формирование возрастной последовательности отличительных признаков или классов обучения при корреляции по отличительным признакам. Это установление биостратиграфической значимости признаков с помощью геохронологической шкалы или эталонной схемы синхронизации в методе корреляции по наибольшему сходству. Тем же целям служат априорные данные о геологическом строении района, весовые коэффициенты и другие уловки для вмешательства со стороны в процедуры корреляции, выполняемые строго по алгоритму.

Однако многие из разработанных методов или же отдельные используемые в их рамках операции будут полезными, если общее сходство заменить возрастным, для чего необходимо пополнить эти методы процедурой сортировки признаков и нахождения среди них руководящих. Выявление хронологически наиболее полезных признаков должно проводиться однозначно, алгоритмически.

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ СТРАТИФИЦИРУЕМЫХ ТЕЛ

И. Диенеш [41], подобно Ш. А. Губерману и М. И. Овчинниковой, определяет две цели корреляции: 1) установление принадлежности точек разных разрезов к одному и тому же слою и 2) установление одновременности их образования.

Вводятся общие ограничения, не требующие знания геологического строения изучаемого участка: 1) коррелируются только такие подмножества точек разных разрезов, которые принадлежат к одному и тому же классу, заданному некоторым разбиением в соответствии с принятой геометрической моделью; что за модель имеется в виду — не поясняется; 2) если тело α в одном разрезе находится ниже тела β , то и в других разрезах тело α должно находиться ниже тела β .

Алгоритм поиска единственного варианта сопоставления среди

всех (допускаемых ограничениями 1—2) основан на предположении, что свойства осадочных отложений (в частности, геофизические — ПС, КС) и скорости осадконакопления для двух одновременных близко расположенных точек различаются в среднем незначительно. «Чем короче расстояние между точками x_1, y_1 и x_2, y_2 и чем однороднее обстановка осадконакопления, тем более сходны отложения в двух точках» [41, с. 76]. Вводятся ограничения на скорость изменения свойств по вертикали и горизонтали, ограничиваются минимально и максимально допустимые скорости осадконакопления, допустимые изменения скорости между двумя точками площади. Численное установление предельных значений требует привлечения априорных данных о геологическом строении района. Общегеологическими предпосылками можно считать предположения о существовании интеграла и производной всех функций, описывающих поведение мощностей и свойств, для любого фрагмента пространства, что можно интерпретировать как требования гладкости и конечности. Другими словами, поверхности всех функций, согласно принятому условию, должны быть топографическими поверхностями П. К. Соболевского.

Исходными данными служат измеренные в некоторых вертикальных разрезах (скважинах) значения какой-либо функции (при корреляции двух миоцен-плиоценовых разрезов поля Альгио в Венгрии — кривой ПС). Алгоритм устанавливает для каждой точки разреза I, какая точка в разрезе II, с учетом всех принятых ограничений, может быть ей сопоставлена. Если единственного решения все же не получается, выбирается из многих возможных вариант, минимизирующий суммарное различие сопоставляемых кривых:

$$\sum (b_i^x - c_j^x)^2 = \min,$$

где b_i^x, c_j^x — пары значений функции в разрезах I и II, сгруппированные в соответствии с принятыми ограничениями.

Алгоритм использовался при корреляции миоцен-плиоценовых разрезов поля Альгио и при корреляции современных осадков оз. Балатон (Венгрия). Результаты близки к полученным вручную.

Другой алгоритм основан на формализации «предположения, естественного для геолога, что существует зависимость между типом осадка и скоростью осадконакопления» [41, с. 79]. Так как разница в скоростях осадконакопления, при попытке интерпретации этого понятия в терминах наблюдения, сводится к разности мощностей, заключенных между парами отметок, синхронизированных в разных разрезах, можно сказать, что основная идея алгоритма сводится к нахождению степени растяжения (stretching) одного разреза относительно другого в зависимости от типа осадков, вскрытых обеими скважинами. И. Диенеш считает предлагаемый алгоритм улучшенным вариантом алгоритма Н. Найделла (см. с. 131).

Скоррелированы два разреза, один из которых расположен в Карибском море, другой — в Северной Атлантике. Для сопостав-

ления использовалось изменение по разрезу количественных соотношений кислородных изотопов O^{16}/O^{18} . Полученный результат хорошо согласуется с сопоставлением по определению абсолютного возраста, выполненным Дж. Н. Росхолтом и др. (1961 г.).

ПОСТРОЕНИЕ ЕДИНОГО ПОРЯДКА

Наиболее общий подход к решению задачи стратиграфической корреляции, не требующий привлечения никаких априорных данных, основанный только на наблюдениях и более всего отвечающий традиционным методам, — построение единой координатной системы, по положению в которой можно упорядочить все изучаемые слои. Далее можно идентифицировать, представить как части единого тела слои разных разрезов, занимающие одно и то же место в построенном порядке. Построению такого порядка посвящены работы Ю. А. Воронина и Н. Г. Гореловой, В. Хэя, И. Дие-неша, М. П. Рубеля. Однако способы упорядочения, рекомендуемые этими авторами, различны.

Ю. А. Воронин и др. [25] не выделяют задачу упорядочения множества слоев разных разрезов по их возрасту из общей задачи упорядочения, в качестве других примеров которой они приводят: 1) упорядочение группой экспертов множества месторождений по их промышленному значению, 2) построение последовательности слоев разного литологического состава, типичной для некоторой рудоносной формации и пригодной в качестве эталона этой формации, 3) упорядочение объектов поиска в порядке убывания их перспективности, 4) ранжирование группой экспертов образцов новых изделий по перспективности их внедрения, 5) премирование конкурсной комиссией представленных проектов и др. Все эти задачи для названных авторов — задачи группового выбора, когда по заданным индивидуальным упорядочениям (разрезам в стратиграфии, мнениям потребителя или эксперта в экономике и т. п.) необходимо построить некоторое общее упорядочение — сводную стратиграфическую шкалу, последовательность товаров по степени их общественной предпочтительности и т. п. Общими должны быть и методы решения этой единой задачи. А так как в экономике, социологии, искусстве и спорте история поисков решения насчитывает уже от полувека до века и на эту тему опубликовано огромное количество книг и статей, получается, что основные приемы, принципы, критерии оценки, представления о целях исследования и структуре массивов исходных данных заимствуются по преимуществу из общественных наук.

Ю. А. Воронин и Н. Г. Горелова строят групповое упорядочение на основе мажоритарного правила. Первую формулировку и наиболее массовое применение правило получило в общественных науках — теории потребительского спроса, теории экспертных оценок и т. д. Есть некоторые объекты a , b , c , которые предлагается упорядочить каждому индивидууму (эксперту, опрошенному потребителю). Для одного потребителя a предпочтительнее, чем b , а

b предпочтительнее, чем с, для другого — а предпочтительнее с, а с предпочтительнее b, для третьего самый предпочтительный объект — b, далее следуют а и с, оба хуже, чем b, но между собой неотличимые, и т. д. По результатам опроса надо составить перечень объектов в порядке убывания их общественной предпочтительности. Обычное решение принимается по большинству голосов. Формулировок правила большинства (мажоритарного правила) несколько: для принятия решения о групповом предпочтении а перед b необходимо, чтобы за это решение высказалось более половины членов группы (более двух третей, трех четвертей и т. д.), или чтобы число оценок «а предпочтительнее b» было большим, чем число противоположных оценок «b предпочтительнее а» (большим в полтора, два раза и т. д.).

Групповое упорядочение по результатам индивидуальных предпочтений не пар объектов, а их последовательностей производится следующим образом. Различие между индивидуальными мнениями R и P, $d(R, P)$ вычисляется как общее количество поразрядных несовпадений соответствующих элементов матриц r_{ij} и p_{ij} , построенных по каждому из сравниваемых упорядочений:

$$d(R, P) = \sum_{i,j=1}^N |r_{ij} - p_{ij}|.$$

Далее можно построить медиану — такое упорядочение, для которого сумма расстояний d до каждого индивидуального упорядочения минимальна. О таком упорядочении можно говорить как о наиболее согласованном, наиболее отвечающем мнению большинства, как о наименее отличном от всех индивидуальных, противоречащем наименьшему количеству мнений опрошенных потребителей, экспертов, индивидуумов. Возможны и другие количественные интерпретации понятия «большинство».

Выбор решения по правилу большинства может осуществляться на основании разных характеристик:

1) упорядочение по «простому большинству»: сравниваются по выбранному мажоритарному правилу объекты x и y, выигравший в этом соревновании сравнивается со следующим объектом и т. д. Объект, превосходящий все другие при всех сравнениях, признается самым предпочтительным в групповом упорядочении. Точно так же выбирается следующий по предпочтительности объект и т. д.;

2) доминирование первых мест: все объекты нумеруются по порядку, согласно их месту в предпочтениях каждого индивидуума, затем подсчитывается, сколько первых мест имеет каждый объект, и выбирается объект, имеющий большее число первых мест;

3) упорядочение на основании функции Борды: подсчитывается сумма номеров объекта во всех индивидуальных предпочтениях, объекты в групповом упорядочении располагаются согласно набранной сумме.

Примеров решения практических задач стратиграфии методами группового выбора не приводится.

Проанализируем, приемлема ли точка зрения о том, что упорядочение множества слоев разных разрезов по их геологическому возрасту есть частный случай проблемы группового выбора.

Прежде всего — какому стратиграфическому объекту аналогичны упорядочиваемые в общественных науках объекты *a*, *b*, *c*, что в стратиграфии является аналогом индивидуального упорядочения, мнения эксперта или потребителя? Если индивидуальное упорядочение — конкретный описанный разрез (скважина, обнажение), то упорядочиваемые объекты *a*, *b*, *c* не могут быть слоями или стратиграфическими подразделениями, как утверждают Ю. А. Воронин и Н. Г. Горелова. Ведь, перечисляя *a*, *b*, *c* в разных индивидуальных упорядочениях по-разному, мы знаем, что перекombинируем одни и те же в разных упорядочениях объекты *a*, объекты *b*, объекты *c*, а в стратиграфии установление идентичности слоев разных разрезов, установление их принадлежности к одному и тому же стратиграфическому подразделению — окончательный результат корреляции, решаемой в данном случае методами синхронизации, упорядочения по возрасту. Объектами, идентичными в разных индивидуальных упорядочениях, но перекombинируемыми в каждом из них по-своему, могут быть только признаки.

Уже из одного этого следуют выводы, имеющие большое значение. Для описания взаимоотношений многих признаков в конкретном разрезе недостаточно отношений $+1, 0, -1$, что в переводе на язык стратиграфии должно означать «выше», «ниже», «равноценно» (Ю. А. Воронин, Н. Г. Горелова, 1975 г.) [25]. Ю. А. Воронину и др. (1974 г.) [25] для тех же целей пришлось вводить и другие отношения — включения и переслаивания. Можно было бы сказать, конечно, что разница здесь чисто терминологическая, и отношения включения и переслаивания по Ю. А. Воронину и др. (1974 г.) лишь названы в другой их работе (1975 г.) равноценностью. Но отношение равноценности должно быть транзитивным, а переслаивание нетранзитивно. Например, в одном разрезе признак *a* выше *b*, а признак *k* своим вертикальным диапазоном полностью или частично перекрывает и тот и другой, переслаиваясь с ними в интервалах перекрытия. Так как *a* переслаивается с *k*, а *k* с *b*, то по транзитивности должно быть: *a* переслаивается с *b*, что противоречит наблюдаемым отношениям. Если вводить в описание частного разреза нетранзитивное отношение переслаивания, то матрица индивидуального упорядочения в целом не будет обладать свойством транзитивности, а мера между двумя матрицами, только одна из которых обладает свойством транзитивности, по Ю. А. Воронину и Н. Г. Гореловой (1975 г.), равна нулю. Так как разрезов без отношений переслаивания (перекрытия вертикальных диапазонов) признаков практически не встречается, в абсолютном большинстве случаев подсчет сходства между матрицами не будет иметь смысла, результат его будет предопределен.

Вряд ли этот вывод будет единственным или, по крайней мере,

самым важным. Невозможно даже представить, что в общественных науках могло бы быть аналогом отношению включения, переключения, например, двух товаров в мнении одного и того же потребителя. Существование таких отношений в геологии и несуществование их в общественных науках должно привести к глубоким различиям в математических структурах множеств, изучаемых стратиграфией и социологией, и далее в характере логического вывода, доказательств, теорем и следствий.

Различны и цели упорядочения в стратиграфии и общественных науках. Пусть есть некоторый групповой порядок a, b, c, d , установленный на тысячах индивидуальных упорядочений. Затем появилось новое индивидуальное упорядочение k, a, b . В стратиграфии — это достижение, иногда сенсационное: глубокая скважина вскрыла палеозойские отложения k , еще более древние, чем самые древние из ранее известных меловые толщи a . Получены данные о фундаменте! В экономике — личная аномалия, не представляющая общественного интереса.

Различна и постановка задач. В общественных науках она такова: все объекты по данным всех индивидуальных упорядочений не упорядочиваются без противоречий, требуется построить групповой порядок на всем множестве объектов, противоречащий минимальному количеству индивидуальных упорядочений. В стратиграфии: все объекты по данным всех индивидуальных упорядочений не упорядочиваются без противоречий, требуется построить групповой порядок на оптимальном подмножестве объектов, не противоречащий ни одному из индивидуальных упорядочений. Оптимальным при этом признается подмножество с наибольшей суммой частот, так как оно обеспечивает наилучшее расчленение и корреляцию разрезов.

Различны в стратиграфии и общественных науках формы представления исходного материала в рассматриваемых задачах упорядочения. В социологии каждый объект присутствует в каждом индивидуальном упорядочении, в стратиграфии так никогда не бывает.

Внимание к форме представления исходных данных может показаться мелочной придиркой. Докажем, что это не так, и невнимание к отмеченной особенности приводит к абсурдным выводам. Например, использование правила доминирования первых мест, приводит к разумным результатам в экономике, искусстве, спорте, но оно неприменимо в типичной стратиграфической ситуации.

На изучаемой территории пробурено 100 неглубоких скважин, вскрывших подошву неогена, и две глубоких, достигших силура. Подошва неогена трассируется по руководящему виду a . Вид a будет стоять на первом месте в ста индивидуальных упорядочениях, любой силурийский вид — только в двух. Самым древним по правилу доминирования первых мест будет объявлен неоген, а не силур. Точно такой же парадоксальный вывод будет получен, если мы подсчитаем для каждого вида сумму мест, занятых им в каждом индивидуальном упорядочении.

Таким образом, между построенным единого порядка в стратиграфии и общественных науках так много различий, специфики, и так мало общего, что понятие наилучшего вообще упорядочения вряд ли имеет смысл.

Вероятностную корреляцию предлагают В. Хей и его единомышленники [45]. Основная посылка их построений: никакие два стратиграфических события не происходили в один и тот же момент; любая пара событий разделена конечным временным интервалом. Под событиями понимается появление и исчезновение в геологической истории какого-либо таксона, начало и завершение накопления некоторой породы, слоя и т. д. Временное отождествление любых объектов отражает лишь нашу неспособность по имеющимся данным выявить их разновозрастность, для чего потребовалось бы знать об изучаемых событиях все, делать о них выводы с вероятностью 1. Так как исчерпывающих знаний о событиях прошлого мы не имеем, приходится удовлетворяться суждениями с некоторой меньшей вероятностью. Корреляция определяется как установление вероятности того, что образцы из двух различных разрезов занимают одно и то же положение в известной последовательности стратиграфических событий.

Совершенно ясно, что время для В. Хей существует само по себе, независимо от наших целей и измерительных возможностей. Другими словами, это абсолютное время Ньютона, а не порядок событий Лейбница.

Для установления вероятности P синхронизации двух образцов на основании их расположения на одной и той же геологической границе, например верхней границе зафиксированного в разрезах распространения некоторого таксона, необходимо сначала установить вероятность P_1 того, что эта граница отражает действительное исчезновение организмов таксона в геологической истории. Оценка P_1 зависит (кроме многих прочих факторов), с одной стороны, от количества экземпляров окаменелых остатков древних организмов данного вида в единице объема породы, а с другой — от объема образца, в котором произведены поиски вида. Когда исчезает из разреза массовый, повсеместно распространенный в изучаемой области вид, вероятность соответствия верхней границы его распространения, проведенной нами по зафиксированным последним находкам, действительному времени исчезновения вида гораздо больше, чем для мало распространенного, редкого вида, известного по двум-трем находкам. Рекомендовано такие мало распространенные виды просто выбрасывать в некоторых ситуациях из исходного материала, не привлекать к дальнейшим построениям.

В этой рекомендации, бесспорно, есть рациональное зерно. Независимо от различия в философских позициях надо признать, что шкала, построенная по данным видов массового распространения, будет гораздо более стабильной, чем построенная по видам редким, для которых случайность обнаружения — необнаружения намного чаще может привести к изменению отношений между чле-

нами шкалы а и б по данным новых наблюдений и, следовательно, к перестройке всей шкалы.

После установления P_1 должна быть вычислена вероятность P_2 того, что отношения наблюдаемой в разрезах последовательности между событиями а и б соответствуют их действительным отношениям в геологической истории. Принимается посылка: если отношения последовательности между событиями а и б случайны, то вероятность наблюдения «а предшествует б» равна 1/2. Строится матрица отношений между событиями. На пересечении строки i и столбца j ставится число $a_{ij} = n_{ij}/N_{ij}$, где n_{ij} — число разрезов, в которых i ниже j , N_{ij} — общее число разрезов, в которых между i и j устанавливалось отношение порядка: либо i ниже j , либо j ниже i . Эти данные позволяют по формулам статистики вычислить вероятность каждого отношения.

При разных уровнях вероятности могут быть построены разные последовательности. Например, по материалам анализа распространения 144 видов известковых нанофоссилий в 13 разрезах палеогеновых отложений Калифорнии была построена зональная последовательность на уровне вероятности 0,7 — из семи событий, на уровне 0,8 — из пяти событий, на уровне 0,9 — из трех событий. Стратиграфу самому следует выбирать между детальной шкалой с низкой вероятностью и менее детальной шкалой с большей вероятностью.

Для окончательного решения задачи корреляции необходимо вычислить еще одну вероятностную характеристику, отражающую правильность идентификации коррелируемых событий с помощью шкалы.

В целом вероятностную корреляцию можно оценить так же, как и предыдущую методику (см. с. 146). При упорядочении любого набора стратиграфических исходных данных сначала необходимо попытаться упорядочить традиционными способами все, что упорядочивается без противоречий, единогласно по всем разрезам, а оставшуюся часть обработать методами вероятностной корреляции, группового выбора или оценки биостратиграфической значимости признаков.

Другую методику предлагает И. Диенеш [42]. На языке теории множеств определяются основные исходные понятия — отношения пространственного и временного предшествования; временные диапазоны любого события устанавливаются по его положению в шкале, определяемой как линейно упорядоченное множество событий. Никакой статистики, выводов по большинству голосов не рекомендуется.

В бассейне Дорог (Венгрия) в девяти изученных скважинах зарегистрированы 523 ископаемых таксона. После отбраковки таксонов, встреченных менее чем в трех скважинах, их остается 124. Далее в результате использования исключаящего алгоритма (excluder algorithm) строится множество таксонов, которые пара за парой находятся в отношении «симметрично выше» один к другому (тело T_j находится в отношении «симметрично выше» к телу

T_1 , если и только если во всех вертикальных разрезах кровля T_2 выше кровли T_1). Признаков в этом множестве насчитывается 25. После вычеркивания еще шести таксонов было получено линейно упорядоченное множество (цепь — цепь) из 19 признаков, по которому и произведена корреляция скважин. Достаточно очевидно, что и множество признаков, которые находятся пара за парой в отношении «симметрично выше» один к одному, и линейно упорядоченных множеств по исходному массиву из 124 признаков можно построить очень много, существо проблемы — в критериях и процедурах выбора, не изложенных И. Диенешем.

М. П. Рубель строит и использует для корреляции биостратиграфическую шкалу [48]. Единственным исходным фактическим материалом являются интервалы распространения таксонов в каждом отдельном разрезе, заключенные между самой верхней и самой нижней находками данного таксона в разрезе. Он использует понятие стратифицирующих признаков, «обеспечивающих непротиворечивость понятия об относительном времени» (Ю. А. Косыгин и др., 1974 г.). Для выявления таких признаков необходимо построить квадратную матрицу отношений между признаками.

Сначала в матрицу заносятся данные по первому (любому) разрезу. На пересечении i -й строки и j -го столбца ставится знак —, если вид i предшествует j , знак +, если i следует за j , знак 0, если интервалы i и j перекрываются. Если в разрезе отношения между i и j не наблюдались, элемент на пересечении i -й строки и j -го столбца остается пустым. Главная диагональ заполняется нулями. Далее заносятся результаты установления отношения между i и j по другим разрезам. Суммирование знаков в одном и том же элементе матрицы производится следующим образом. Сочетание + и + дает +, — и — дает —, 0 и 0 дает 0. Сочетание разных символов: + и —, + и 0, — и 0 дает всегда 0. Сочетание пустого элемента и любого конкретного символа не изменяет этого символа. Количество отношений, их характер, процедура заполнения матрицы аналогичны изложенным в ранних публикациях [12, 28, 30]. Существуют и различия.

Пустые элементы заполняются на основе использования свойства транзитивности: если между i и j ни в одном из разрезов не наблюдались отношения, но i зафиксировано в отношении + к s , а s в отношении + к j , то на пересечении строки i и столбца j ставится плюс. Аналогично распространяется по транзитивности и минус.

После окончательного заполнения матрицы ее строки переставляются до тех пор, пока в самом верху не окажется строка с наибольшим количеством плюсов и наименьшим — минусов, а внизу — с наибольшим количеством минусов и наименьшим — плюсов. Расположение других строк — в порядке возрастания числа плюсов и убывания минусов. После проведения такой перегруппировки порядок строк матрицы будет указывать на последовательность таксонов во времени.

Однако если в матрице хотя бы один плюс будет расположен ниже главной диагонали и хотя бы один минус — выше диагонали, возникают противоречия в упорядочении. Так как символ, противоречащий упорядочению, отражает отношения между двумя таксонами, а после выбрасывания одного из них исчезает и «неправильный» символ, предложено исключать противоречия путем отбраковки одного из таксонов. Выбрасывается худший таксон, менее полезный для корреляции, распространенный в меньшем количестве разрезов. Виды, встреченные в единственном разрезе, вообще бесполезны для корреляции, и их следует отбраковывать сразу же.

Перечисление признаков в порядке убывания их распространенности дает возможность разработать другую методику упорядочения: наилучшим признается признак, стоящий в этом списке первым, к нему присоединяется второй, третий и т. д., но при условии, чтобы отношения каждого вновь присоединяемого не противоречили уже имеющимся.

В полученном наборе уровень изохронности определяется интервалом между двумя последовательными таксонами i и j . Чем уже промежуток разреза между самой верхней находкой более древнего таксона i и самой нижней находкой более молодого j , тем меньше зона неопределенности синхронизации.

Методика применялась при корреляции разрезов верхнего силура Прибалтики по данным распределения брахиопод (25 видов из 10 разрезов) и остракод (172 вида из 10 разрезов).

Отмечая бесспорные достоинства методики М. П. Рубеля, следует отметить и некоторые ее недостатки, например, заполнение пустых элементов матрицы на основе свойства транзитивности. Если i и j не имеют наблюдаемых отношений, но наблюдались отношения последовательности i к s , а s к j , то какие признаки могут служить опосредующими элементами s ? Если, как считает М. П. Рубель, ограничений в применении свойства транзитивности быть не должно, то надо перебрать все признаки, чтобы выявить среди них все возможные опосредующие элементы s для заполнения элемента на пересечении строки i и столбца j . Как поступать в том случае, когда на одно и то же место матрицы попадут разные символы при заполнении ее через разные s ? Такое неизбежно при обработке любого реального набора исходного материала, так как, кроме «параллельных», «правильных» признаков, всегда найдутся и «косые», «неправильные». Если s_1 — «косой» признак, в одном разрезе расположен ниже i , а в другом поднимается выше j , то между i и j по s_1 будет выведено « i выше j ». Если и другой опосредующий признак s_2 также «косой», но в одном разрезе расположен выше i , а в другом — ниже j , то вывод по s_2 — « i ниже j ». Конкретные комбинации символов будут зависеть от калейдоскопического разнообразия отношений различных «косых» и «параллельных» признаков, тем более что на данном этапе обработки материала отличить первые от вторых невозможно. Если вывод результирующего отношения делается по ранее сформулирован-

ным правилам, то многие элементы матрицы должны быть заполнены нулями.

Не накладывая ограничений на применение свойства транзитивности, следует использовать его и для пополнения непустых элементов. Ведь и для любых i и j , отношения между которыми наблюдались, их можно вывести еще и по транзитивности от i к s , от s к j . Кроме того, неограниченность сферы действия транзитивности должна означать, что отношения можно распространять не только через один опосредующий элемент — от i к s , а от s к j , но и через два, три и т. д. элемента, например, от i к s , от s к t , а от t к j . Где остановиться и почему? Но это будет означать ограничения на транзитивность. Если же ограничений не вносить никаких, то, кроме невообразимого роста вычислительных сложностей, результатом будет заполнение всех (или почти всех) элементов нулями, невозможность установить временную последовательность признаков по матрице.

Неприемлемо упорядочение строк матрицы по убыванию числа минусов и возрастанию плюсов. Во-первых, между убыванием минусов и возрастанием плюсов может не оказаться связи, тогда упорядочивающих показателей будет два, надо выбирать из них какой-то один. Во-вторых, нет связи и между возрастанием числа плюсов, убыванием числа плюсов, возрастанием или убыванием числа минусов, с одной стороны, и геологическим возрастом — с другой.

Например, в изученном нами районе Корфовского бурогоугольного месторождения (Восточная Камчатка) самой молодой является континентальная угленосная толща, более древними — морские толщи. В описанных разрезах фиксированы наблюдаемые стратиграфические отношения континентальной толщи только с самой верхней морской толщей. На других участках района многими разрезами вскрыты отношения верхней морской толщи со всеми остальными морскими, но континентальных отложений в этих местах нет. Угленосные толщи являлись предметом специального, особо тщательного изучения палеоботаниками, поэтому здесь зарегистрировано наибольшее количество признаков — видов, подвидов, родов ископаемой флоры, всего более 200. Морские толщи изучены гораздо слабее, общее число признаков во всех морских отложениях около 50. Наибольшее количество минусов (отношений «ниже») имеют признаки верхней морской толщи по той единственной причине, что они обнаружены ниже самой тщательно изученной и полно описанной континентальной толщи. Более древние морские толщи имеют наблюдаемые отношения (в том числе и «ниже») только друг с другом, поэтому ни один из их признаков не может набрать хотя бы сравнимого количества минусов. По М. П. Рубелю, самыми древними, как имеющие наибольшее количество минусов, должны быть объявлены признаки, ограниченные в вертикальном распространении самой молодой из морских толщ. Далее должны быть выброшены признаки, противоречащие принятому «упорядочению». Не имеет принципиальных

отличий и упорядочение по возрастанию числа минусов, по убыванию и возрастанию числа плюсов. Для любого из этих показателей обязательно будут найдены многочисленные, заурядные ситуации, в которых упорядочение получится заведомо неприемлемым.

Упорядочивающие предположения М. П. Рубеля, как и И. Диенеша, формулируются на основе представлений о какой-то очень уж «рафинированной» геологической действительности.

При разбраковке признаков (операция «исключение противоречий в матрице») не всеобщим следует признать и правило предпочтения. С предложением М. П. Рубеля о полной непригодности для корреляции признаков, распространенных в единственном разрезе, можно безоговорочно согласиться. Принцип «чем больше распространение признака, тем он лучше для корреляции» также неоспорим, но о какой корреляции идет речь? Вряд ли удовлетворит кого-нибудь отождествление в разных разрезах нерасчлененных подразделений от докембрия до плейстоцена. Наилучшими будут признаки, позволяющие проследживать на наибольшие расстояния наиболее дробные подразделения, но характеристика «число разрезов, в которых распространен признак» никак не связана с детальностью расчленения.

Обо всех математических методах стратиграфической корреляции, проанализированных в данном разделе, можно сказать то же самое, что и о большинстве других: в них слишком много математики и слишком мало геологии.

1. *Агрикола Г.* О горном деле и металлургии. Пер. с лат. М., Изд-во АН СССР, 1962, 599 с.
2. *Аронов В. И.* Методы математической обработки геологических данных на ЭВМ. М., Недра, 1977, 168 с.
3. *Бембель Р. М., Горбачева Р. М.* Об аппроксимации геологических поверхностей. — В кн.: Программы обработки геолого-геофизической информации на ЭВМ (труды ЗапСибНИГНИ, вып. 78). Тюмень, 1974, с. 5—10.
4. *Вавилов С. И.* Исаак Ньютон. М., Изд-во АН СССР, 1961, 294 с.
5. *Валуйский А. А., Жабрев И. П.* О возможности применения цифровых вычислительных машин для стратификации осадочных толщ по данным минералогических исследований. — В кн.: Комплексная интерпретация геологических и геофизических данных на вычислительных машинах. М., Недра, 1966, с. 69—76.
6. *Вебер В. Н.* Полевая геология. М. — Петроград, Изд. Совета нефтяной промышленности, 1923, 147 с.
7. *Виницкий Ю. С., Соломещ К. Н., Халимов Э. М.* О возможности использования ЭВМ при корреляции разрезов скважин. — В кн.: Проблемы нефти и газа Тюмени, вып. 16. Тюмень, 1973, с. 58—62.
8. *Вистелиус А. Б., Романова М. А.* Красноцветные отложения полуострова Челекен (литостратиграфия и геологическое строение). М.-Л., Изд-во АН СССР, 1962, 226 с.
9. *Волков А. М.* Решение практических задач геологии на ЭВМ. М., Недра, 1980, 224 с.
10. *Головкин Н. А.* О пермской формации в центральной части Камско-Волжского бассейна. — В кн.: Материалы для геологии России. СПб., Минерал. об-во, 1869, с. 273—415.
11. *Гончарова Е. И.* Алгоритм и результаты корреляции неогеновых разрезов Корфовского бурогоугольного месторождения (Восточная Камчатка). — Изв. АН СССР. Сер. геол., № 7, 1979, с. 147—150.
12. *Гончарова Е. И., Салин Ю. С., Солдатов О. Б.* Алгоритм построения сводных стратиграфических шкал и корреляции разрезов. — В кн.: Принципы тектонического анализа. Владивосток, 1977, с. 34—41.
13. *Губерман Ш. А., Овчинникова М. И.* О машинной корреляции пластов в разрезе скважины по геофизическим данным. — Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, № 3, 1972, с. 87—94.
14. *Иовский А.* Опыт руководства к познанию внутреннего строения и образования змного шара. М., 1828, 356 с.
15. *Кириллова Г. Л.* Сравнение двух немых толщ методами математической статистики. — Литология и полезные ископаемые, № 1, 1970, с. 146—148.
16. *Куликович А. Е.* Основные принципы машинной обработки каротажных кривых. — В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации (труды УкрНИГРИ, вып. 1). М., Недра, 1965, с. 113—159.
17. *Куликович А. Е.* Основы машинной интерпретации каротажных диаграмм. Киев, Наукова думка, 1974, 188 с.
18. *Лайель Ч.* Основные начала геологии или новейшие изменения Земли и ее обитателей. Т. I. Пер. с англ. А. Мина, М., Изд. А. И. Глазунова, 1866, 399 с.
19. *Лайель Ч.* Руководство к геологии, или древние изменения Земли и ее обитателей, по свидетельству геологических памятников. СПб., 1866, 495 с.

20. *Леонов Г. П.* Основы стратиграфии. Т. 1—2. М., Изд-во Московского ун-та, 1973—1974 (т. 1, 1973, 530 с.; т. 2, 1974, 485 с.).
21. *Любичев А. А.* Систематика и эволюция. — В кн.: Внутривидовая изменчивость наземных позвоночных животных и микроэволюция. Свердловск, 1966, с. 45—57.
22. *Методы* теоретической геологии. Ред. И. И. Абрамович Л., Недра, 1978, 335 с.
23. *Нехорошев В. П.* О причинах, затрудняющих корреляцию стратиграфических схем. — В кн.: Биостратиграфические и палеобioфациальные исследования и их практическое значение. М., Недра, 1970, с. 96—107.
24. *Общая* стратиграфия (терминологический справочник). Хабаровск, кн. изд-во, 1979, 842 с.
25. *Применение* математических методов и ЭВМ при поисках полезных ископаемых. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1976, 170 с.
26. *Реализация* алгоритмов машинной интерпретации каротажных диаграмм на ЭЦВМ/А. Е. Кулинкович, Ю. С. Лапченко, О. С. Остапчук и др. — В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации № 2 (труды УкрНИГРИ, вып. XV). М., Недра, 1967, с. 128—146.
27. *Родионов Д. А.* Статистические методы разграничения геологических объектов по комплексу признаков. М., Недра, 1968, 158 с.
28. *Салин Ю. С.* Конструктивная стратиграфия. М., Наука, 1979, 173 с.
29. *Салин Ю. С.* Согласные и несогласные отношения в слоистых толщах. — Геология и геофизика, № 5, 1980, с. 43—50.
30. *Салин Ю. С., Синюков В. И.* Можно ли построить стратиграфию без историко-генетических посылок? — В кн.: Методология геологических исследований. Владивосток, 1976, с. 185—197.
31. *Севастьянов А.* Геология, или наука о горах и горных породах. СПб, типография Академии наук, 1810, 350 с.
32. *Севергин В.* Царство ископаемых. — В кн.: Начальные основания естественной истории. Кн. 1, часть I и II, СПб, 1791, 367 с.
33. *Соболевский П. К.* Современная горная геометрия. — Социалистическая реконструкция и наука, 1932, вып. 7. с. 42—78.
34. *Соколов Б. С.* Биохронология и стратиграфические границы. — В кн.: Проблемы общей и региональной геологии. Новосибирск, Наука, 1971, с. 155—178.
35. *Спенсер Г.* Нелогическая геология. — Собр. соч., т. 3, СПб, 1866, с. 277—335.
36. *Стратиграфия и математика.* Хабаровск, кн. изд-во, 1974, 207 с.
37. *Цеплихаль А.* Ант. Цеплихалья введение в горное познание земного шара. Ч. 1. Подземная география. Пер. с нем., (СПб), типография горного училища, 1780, 252 с.
38. *Циттель К. А.* Первобытный мир (очерки из истории мироздания). СПб, Общественная польза, 1873, 391 с.
39. *Экстремальные задачи* в геологии нефти и газа. — Труды ЗапСибНИГНИ, вып. 126. Тюмень, 1978, 136 с.
40. *Daskam R.* Automated Well Log Analysis and the Evaluation of Sandstone Bodies in Shale Sequences. — Quarterly of the Colorado School of Mines, 1964, vol. 59, No. 4, p. 517—536.
41. *Dienes I.* General Formulation of the Correlation Problem and its Solution in Two Special Situations. — Journ. Int. Assoc. Math. Geology, 1974, vol. 6, No 1, p. 73—81.
42. *Dienes I.* Methods of Plotting Temporal Range Charts and Their Application in Age Estimation. — Computers and Geosciences, 1978, vol. 4, p. 269—272.
43. *Haïtes T. B.* Perspective Correlation. — Bull. Amer. Assoc. of Petrol. Geol., 1963, vol. 47, No. 4, p. 553—574.

44. *Harbaugh J. W., Merriam D. F.* Computer Application in Stratigraphic Analysis. New York, London, Sydney, 1968, 282 p.
45. *Hay W. W., Southam J. R.* Quantifying Biostratigraphic Correlation. — Amer. Rev. Earth Planet. Sci., 1978, No 7, p. 353—375.
46. *Jekhowsky B. de.* La méthode des distances minimales, nouveau procédé quantitatif de corrélation stratigraphique; exemple d'application en palynologie. Rev. Inst. Franc. du Pétrole, Paris, 1963, vol. XVIII, N 5, p. 629—653.
47. *Robinson J. E.* Transform to Enhance Correlation of Mechanical Well Logs. — Journ Int. Assoc. Math. Geology, 1975, vol. 7, No 4, p. 323—334.
48. *Rubel M.* Principles of Construction and Use of Biostratigraphical Scales for Correlation. — Computers and Geosciences, 1978, vol. 4, p. 243—246.
49. *Rudman A. J., Blakely R. F.* Fortran Program for Correlation of Stratigraphic Time Series. — Geophys. Comput. Program 3. Depart. of Nat. Res. Geol. Survey Occasional Paper 14. Bloomington, Indiana, 1976, p. 1—31.

От редактора	3
Введение	5
Идентификация	8
Основная модель геологии	8
Построение модели	19
Усложнения модели	38
Алгоритмы синхронизации	52
Исходные данные	52
Переборные алгоритмы	56
Непереборные алгоритмы	81
От стратиграфической схемы — к геологической карте	90
Дифференциальные модели	90
Проективные модели	92
Аффинные модели	103
Метрические модели	105
Анализ некоторых методов стратиграфической корреляции	117
Корреляция по достаточному сходству	117
Корреляция по наибольшему сходству	120
Корреляция по отличительным признакам	123
Визуальное сравнение кривых	126
Скользкая корреляция	127
Корреляция по последовательности наибольших сходств	133
Построение системы стратифицируемых тел	142
Построение единого порядка	144
Список литературы	154

ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ САЛИН

СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ

Редактор издательства Т. А. ГОРОХОВА
Обложка художника О. В. КАНАЕВА
Художественный редактор Е. Л. ЮРКОВСКАЯ
Технические редакторы М. Е. КАРЕВА, Е. В. ВОРОБЬЕВА
Корректор Е. В. НАУМОВА

ИБ № 5013

Сдано в набор 11.01.83 Подписано в печать 25.03.83 Т-06770
Формат 60×90^{1/16} Бумага типографская № 2 Гарнитура «Литературная» Печать высокая
Усл.-печ. л. 10,0 Усл. кр.-отг. 10,12 Уч.-изд. л. 11,1 Тираж 2300 экз.
Заказ 49/8982-1 Цена 1 р. 70 к.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ. Ваганов В. И., Иванкин П. Ф., Кропоткин П. Н. и др. 15 л., 2 р. 30 к.

Рассмотрены крупнейшие кольцевые структуры на территории СССР, которые рядом исследователей относятся к астроблемам. Геологическое строение этих структур и особенности вещественного состава пород однозначно указывают на их эндогенное происхождение. Криповзрывные структуры являются закономерным членом формационного ряда: кимберлитовая формация — альнеит-кимберлит-карбонатитовая формация — формация криповзрывных структур. Формирование этого ряда отражает эволюцию глубинного мантийного флюида, главным образом перераспределение воды и углекислоты между флюидом и сосуществующим расплавом. Метеоритные и эндогенные криповзрывные структуры имеют много сходных черт, поэтому возникает проблема их различия. Приведены новые данные в пользу вулканической природы большинства крупных и средних по размерам кратеров Луны и Марса.

Для геологов, занимающихся изучением взрывных кольцевых структур, и общих проблем глубинного мантийного петрогенеза.

Карогодин Ю. Н. Региональная стратиграфия (системный аспект). 15 л., 2 р. 40 к.

Впервые с позиций системно-структурного анализа породно-слоевых ассоциаций рассматриваются актуальные теоретические проблемы региональной стратиграфии и формулируется принцип литмостратиграфии. На конкретных примерах по Западной Сибири, Енисейско-Ленскому бассейну, Тунгусской синеклизе и Нелско-Ботубинской антеклизе Сибирской платформы, Ферганскому бассейну и по другим регионам показаны широкие возможности реализации этого принципа, позволяющие существенно упорядочить и унифицировать региональные стратиграфические подразделения и схемы. Предлагаются рекомендации и дополнения к Стратиграфическому кодексу СССР.

Для геологов, интересующихся теоретическими и методологическими проблемами геологии. Может быть полезна студентам геологических специальностей вузов.

Нейман В. Б. Теория и методика палеотектонического анализа.
3-е изд., перераб. и доп. 6 л., 30 к.

Показано, что тектоническое прогибание в платформенных условиях весьма точно компенсируется осадконакоплением. Выделены 2 тектонические формации, имеющие прямое отношение к расчленению толщ, пониманию процессов осадконакопления. Описан ряд новых методов, которым дается строгое математическое выражение, что позволяет расширить область приложения палеотектонического анализа. В 3-ем издании (2-е изд. — 1974) рассматриваются вопросы формирования рифогенных отложений платформ, углублена теория образования платформенных толщ, вводятся дополнительные критерии нефтегазоносности.

Для геологов различных специальностей, геофизиков, геохимиков.

Фролов В. Т. Генетическая типизация морских отложений.
17 л., 2 р. 90 к.

Освещаются принципы генетической типизации морских образований по геологическим процессам, определяющим различные динамические, вулканические, органогенные или химические способы осадконакопления. Приводится апробированная классификация генетических типов морских отложений, выявляются их диагностические признаки, позволяющие устанавливать соответствующие типы в древних толщах. Рассматриваются современные отложения и геосинклинальные и платформенные образования Кавказа, Крыма, Урала, островных дуг востока СССР, Восточно-Европейской и Австралийской платформы, Новой Гвинеи. Предлагается комплексная методика палеогеографических, литогенетических и формационных исследований, даются рекомендации по применению методики генетического анализа.

Для геологов различных специальностей. Может быть полезна студентам геологических специальностей вузов.

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел «Книга — почтой» магазинов:

№ 17 — 199178, ЛЕНИНГРАД, В. О., СРЕДНИЙ ПРОСПЕКТ, 61;
№ 59 — 127412, МОСКВА, КОРОВИНСКОЕ ШОССЕ, 20

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»