

А. Е. КУЛИНКОВИЧ

ОСНОВЫ
МАШИННОЙ
ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КАРОТАЖНЫХ
ДИАГРАММ

24581

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ И ОХРАНЫ НЕДР УССР
УКРАИНСКИЙ НАУЧНО—ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ

А. Е. КУЛИНКОВИЧ

ОСНОВЫ МАШИНОЙ
ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КАРОТАЖНЫХ
ДИАГРАММ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКОВА ДУМКА»
КИЕВ—1974

553
К90

УДК 550.83:581.142.1

В монографии изложены основы машинной интерпретации материалов геофизических исследований буровых скважин. Детально рассматриваются алгоритмы различных звеньев обработки промыслово-геофизических данных. Описываются системы автоматической интерпретации, рассчитанные на решение различных задач - литологическое расчленение, количественная интерпретация данных БКЗ, оперативная интерпретация диаграмм нефтегазовых скважин, качественная и количественная интерпретация диаграмм угольных и железорудных скважин. Приводятся примеры машинной обработки каротажных диаграмм.

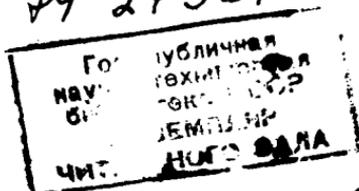
Книга рассчитана на геофизиков и геологов, а также студентов и аспирантов геологоразведочных специальностей.

Р е ц е н з е н т ы

канд. геол.-мин. наук Б.Л. Гуревич,

канд. техн. наук А.Л. Колосов

44-27587



34
33642

Редакция геологии и географии

К 0295-231 90-74
М221(04)-74

© Издательство "Наукова думка", 1974 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Применение электронных цифровых вычислительных машин для решения промышленно-геофизических задач и, в частности, для автоматизации обработки каротажных диаграмм, начато у нас и за рубежом в конце пятидесятых годов, причем первые публикации относятся к началу шестидесятых годов. Внедрение информационно-вычислительной техники в промышленной геофизике, как и вообще в геолого-геофизической разведке, знаменует качественно новый скачок, открывающий совершенно новые перспективы.

Стала очевидной необходимость освещения этих вопросов в специальной монографии, детально излагающей основы нового направления в промышленной геофизике.

При составлении монографии по применению информационно-вычислительной техники автор встретился с рядом трудностей. Во-первых, материал по характеру для геофизиков новый — при его изложении необходимо ознакомить читателя со многими понятиями кибернетики, информационно-вычислительной техники. При этом монография должна освещать вопросы промышленной геофизики. Необходимо было найти пути как бы исподволь, не теряя промышленно-геофизической тематики, вводить и разъяснять новые для читателя понятия непосредственно на примерах применения ЭЦВМ для решения задач геофизических исследований буровых скважин. В настоящее время относящийся к этому вопросу материал настолько обширен, что для его детального и систематического изложения необходима монография чрезвычайно большого объема. Подготовка и опубликование многотомной монографии весьма затруднительны. Естественным выходом из этого положения является созна-

тельное сужение круга вопросов, рассматриваемых в книге. В качестве основы для изложения автор выбрал алгоритмизацию оперативной интерпретации промышленно-геофизических данных.

Автор считает своим долгом выразить благодарность сотрудникам А.Л.Ханкину, М.Д.Красножону, В.С.Готыняну, М.Ф.Дайновской, Л.М.Демчук и др. за помощь в подготовке рукописи к изданию.

Автор будет признателен читателям за деловые критические замечания по книге.

Глава I. ЦЕЛИ И СРЕДСТВА МАШИННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРОМЫСЛОВО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

§ I. Машинная интерпретация промыслово-геофизических данных

Машинная интерпретация данных геофизических исследований буровых скважин, основанная на использовании современной информационно-вычислительной техники, получает за последние годы все большее развитие как в Советском Союзе, так и за рубежом. Привлечение быстродействующих электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦВМ) для решения задач промысловой геофизики было вызвано существенными трудностями, с которыми сталкивается обычная ("ручная", или, точнее, "визуальная") обработка. Главнейшие из этих трудностей таковы:

I. Расширение возможностей промыслово-геофизических исследований во многих случаях связано с разработкой сложных методик комплексной интерпретации данных каротажа. Сложные методы интерпретации предъявляют весьма строгие требования к квалификации интерпретатора. Обеспечить геофизическую службу достаточным числом высококвалифицированных кадров интерпретаторов удается далеко не всегда, особенно для восточных районов страны.

Сложные методики интерпретации весьма трудоемки, причем в большинстве случаев нельзя поручать обработку лицам меньшей квалификации, поскольку от правильности выполнения предварительных этапов обработки данных (например, выделение пластов и отсчет характерных значений при интерпретации бокового каротажного зондирования) зависит результат обработки в целом.

Трудности в применении сложной методики препятствуют ее совершенствованию, так как нельзя получить данные о ее фактической эффективности и на основании этих данных устранить недостатки.

2. Большим недостатком ручной ("визуальной") обработки является ее "локальность" — человек в состоянии охватить некоторый, сравнительно небольшой, объем информации, в то время как очень часто необходимо обработать одновременно большое количество материалов — данные по смежным и аналогичным районам, детальный анализ результатов других исследований (данные палеонтологического, минералогического и петрографического анализов керна, гидрогеологических и геохимических исследований, результаты полевой геофизики, в первую очередь сейсморазведки и т.д.). Большие же объемы информации труднообозримы для человека. Поэтому глубокая интерпретация данных, как правило, либо вообще не производится, либо затягивается на длительные сроки и зачастую сводится к решению только отдельных частных вопросов. Неоперативность обычных методов обработки нередко приводит к значительным экономическим потерям.

3. Обработка материалов человеком субъективна — результаты интерпретации одних и тех же материалов различными исполнителями могут значительно отличаться. Обработка информации человеком не надежна из-за рассеяния внимания, вызванного утомлением или другими причинами; в конечные результаты нередко вкрадываются разного рода ошибки, иногда весьма серьезные.

4. Первичные материалы и документы, оформляемые вследствие интерпретации, неудобны для хранения. Поиск нужных сведений, рассеянных в различных фондовых материалах, зачастую настолько трудоемок, что оказывается практически невыполнимым.

Недостатки ручной интерпретации — малая глубина и неоперативность, субъективность и не очень большая надежность обработки, невозможность хранения первичных и других документов, обеспечивающих быструю и полную выдачу нужной информации, и т.д. — можно преодолеть путем автоматизации обработки промыслово-геофизических данных с применением современной информационно-вычислительной техники и в первую очередь быстродействующих электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦМ).

Применение ЭЦМ крайне важно для разработки теории геофизических методов исследования скважин — составления палеток, необходимых для интерпретации данных, оценки оптимальных параметров аппаратуры и методики каротажа — требует численного решения дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений, описывающих распределение исследуемых физических полей. Все это сопряжено с выполнением большого объема расчетных работ и практически неосуществимо без современной вычислительной техники.

Проблема автоматизации обработки промышленно-геофизических, как впрочем и вообще геолого-геофизических данных, является весьма сложной и сопряжена с решением целого круга разнообразных задач. Дело усугубляется, с одной стороны, новизной вопроса - аппаратура, теоретические основы, практические навыки, характеризующие техническую кибернетику, существенно отличаются от того, с чем ранее приходилось иметь дело инженерам-геофизикам. С другой стороны, скважинные измерения и обработка получаемых данных очень специфичны, поэтому нельзя просто переносить достижения, полученные в других областях.

К числу задач, которые необходимо было решить при создании методов машинной интерпретации, относятся:

1. Создание устройств, преобразующих промышленно-геофизическую информацию в форму, удобную для ввода ее в электронные цифровые вычислительные машины.

2. Алгоритмизация обработки промышленно-геофизических данных. Составление, отладка, массовое опробование и внедрение программ в кодах конкретных ЭЦВМ, а также специализированных выходных устройств, способных оформлять результаты интерпретации данных в виде, наиболее удобном для анализа их человеком.

3. Решение проблемы связи - обеспечение оперативной передачи информации из мест сбора в места обработки и наоборот.

« Рассмотрим вкратце описанные задачи.

§ 2. Преобразование каротажных диаграмм в цифровую форму

Ф о р м ы п р е д с т а в л е н и я и н ф о р м а ц и и

Существуют две формы представления информации - дискретная и непрерывная. Примером дискретной информации могут служить числа, буквенный текст и т.п. Графики, диаграммы, карты представляют собой информацию, записанную в непрерывной форме. В соответствии с этим устройства, осуществляющие обработку информации, делятся на устройства дискретного действия (различного рода цифровые машины) и устройства непрерывного. В первом случае информация преобразуется в дискретной (цифровой) форме, во втором - в непрерывной. Примером устройств непрерывного действия могут служить счетные линейки, различного рода пантографы, планиметры, моделирующие устройства. При создании моделирующих устройств широко используется принцип аналогии, который позволяет, например, изучать распределение грунтовых вод на электролитической модели. В связи с этим и устройства непрерыв-

ного действия часто называют а н а л о г о в ы м и. Это название перешло и на непрерывные величины, которые также называют аналоговыми.

Информация, записанная в дискретной (цифровой) форме, нередко называется к о д о м. Объем дискретной информации определяется числом разрядов, которые она занимает. Если разряды десятичные, то количество информации измеряется в десятичных единицах информации — д и т а х. Так, количество информации, содержащейся в четырехзначном десятичном числе, равно четырем дитам. Очень часто для хранения используются двоичные разряды — на перфокартах, перфолентах, где отводимое под запись разряда поле может находиться в одном из двух состояний (отверстие пробито — отверстия нет, лампа заперта — не заперта и т.п.). В этом случае количество информации измеряется в двоичных единицах информации — б и т а х.

Между битами и дитами такие соотношения:

$$1 \text{ дит} \approx 3 \frac{1}{3} \text{ бита,}$$

$$1 \text{ бит} \approx 0,3 \text{ дита.}$$

Одна и та же информация может быть записана как в дискретной (цифровой), так и в непрерывной (аналоговой) форме.

В процессе обработки большую роль играет преобразование информации из непрерывной формы в цифровую и наоборот. Необходимость такого преобразования чаще всего связана с тем, что человеку во многих случаях удобнее работать с аналоговыми документами — графиками, картами и т.д. ЭЦВМ же обрабатывают лишь цифровую информацию.

К в а н т о в а н и е к р и в ы х

Чтобы осуществить обработку материалов на электронных цифровых вычислительных машинах, необходимо исходные данные, в частности каротажные диаграммы, преобразовать в дискретную (цифровую) форму, удобную для ввода в ЭЦВМ. Преобразование непрерывной величины в дискретную форму называется квантованием.

Простейшим способом преобразования каротажной диаграммы в цифровую форму является отсчет значений регистрируемого параметра, например, кажущегося сопротивления, через равный интервал на оси глубин, например, через 20 см (т.е. через 1 мм при масштабе глубин 1 : 200). На рис. I схематично показан пример такого преобразования каротажной кривой. Расстояние на оси глубин между двумя соседними точками, для которых определяются значения замеренной величины, называется ш а г о м к в а н т о в а н и я.

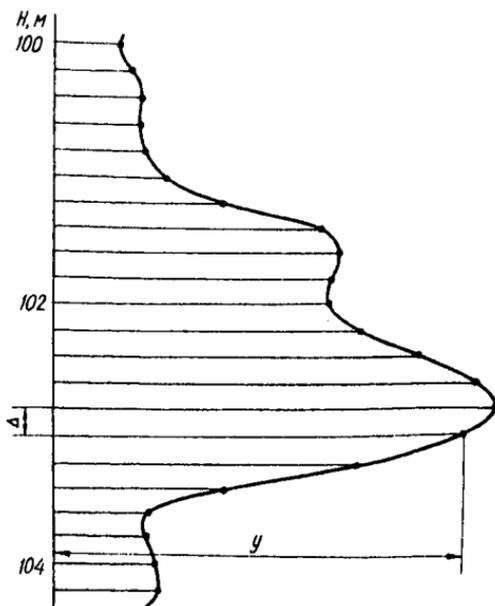


Рис. I. Преобразование каротажной кривой в цифровую форму.

В результате дискретного преобразования с постоянным шагом квантования каротажная кривая записывается в виде последовательности чисел. Последовательность чисел в теории программирования называется **м а с с и в о м** чисел.

Достоинством дискретного преобразования с постоянным шагом квантования является простота обработки получаемых численных массивов. Например, зная порядковый номер i некоторого числа в данном массиве, легко рассчитать соответствующую ему глубину

$$h_i = h_1 + \Delta (i-1), \quad (I)$$

где Δ - шаг квантования, h_1 - "начальная глубина" - глубина, соответствующая первому числу массива.

На первый взгляд кажется, что замена непрерывной кривой совокупностью чисел принципиально сопряжена с потерей информации - ведь мы определяем только отдельные значения ординаты из бесчисленного множества их. Однако, как показывает теория, это не так. Согласно теореме В.А.Котельникова, широко используемой в работах по теории связи, любое значение функции $f(t)$, спектр которой не содержит частот выше w , может быть восстановлено, если известны значения функции, зафиксированные с шагом Δt , не меньшим $\frac{1}{2w}$.

На основе теоремы Котельникова можно оценить величину шага квантования при цифровом преобразовании каротажных диаграмм. Поскольку интервалу времени Δt соответствует интервал глубин $\Delta = \Delta t v$, шаг квантования будет связан с соотношением:

$$\Delta = \frac{v}{2W}. \quad (2)$$

Максимальная частота W при каротаже имеет порядок нескольких герц [42], скорость каротажа v колеблется в пределах 0,05 – 1,5–2 м/сек. В связи с этим шаг квантования должен иметь величину от нескольких сантиметров до дециметров*. При оцифровке диаграмм шаг обычно составляет 1 мм, т.е. 0,5 м при масштабе глубин 1 : 500 или 0,2 м при масштабе 1 : 200. В некоторых случаях применяют более удобный шаг (0,5 мм ленты) или же (при более пологом характере кривой) – 2 мм и более.

Недостатком преобразования с равномерным шагом квантования является избыточность записи информации, иногда весьма значительная, что приводит к неэкономному использованию памяти, излишней загрузке каналов связи при передаче данных и проч. Поэтому предложены более экономичные способы квантования регистрируемых кривых. Один из них основан на аппроксимации кривой некоторой ломаной. В этом случае находятся лишь ординаты "точек излома" и изменение в угле наклона очередного отрезка ломаной. При этом объем информации, получаемой в результате квантования, существенно уменьшается. Квантование, основанное на аппроксимации ломаной, требует более сложной аппаратуры и поэтому применяется реже, чем равномерное квантование.

Н е п р е р ы в н о – д и с к р е т н ы е п р е о б р а з о в а т е л и

Квантование каротажных кривых вручную требует чрезвычайно больших затрат труда и времени и было допустимо лишь на первых этапах работ по машинной интерпретации. В настоящее время разработаны специализированные устройства для цифрового преобразования каротажных диаграмм – непрерывно-дискретные преобразователи. По своему назначению они подразделяются на два типа – полевые и лабораторные. Полевыми каротажными непрерывно-дискретными преобразователями можно непосредственно в процессе измерений преобразовывать информацию в цифровую форму и записывать ее на носитель – магнитную

* К аналогичным результатам пришли Г.С.Неймарк и Н.Н.Сохранов [45], исходящие из других предпосылок (из требования получения не менее трех отсчетов на крутом участке кривой).

ленту или перфоленту. Лабораторными преобразователями можно в условиях интерпретационного бюро считывать информацию с каротажных диаграмм и в цифровой форме наносить ее на перфоленту.

В зависимости от способа считывания информации лабораторные преобразователи делятся на полуавтоматические и автоматические. При преобразовании каротажных диаграмм полуавтоматическим устройством оператор с помощью специального копира обводит кривую. Перемещения копира преобразуются в цифровой код, который и записывается на перфоленту. Полуавтоматические преобразователи просты в изготовлении и практичны в работе – требования к качеству оформления диаграмм менее жесткие: можно преобразовывать кривые с "синек", со старых диаграмм не очень хорошей сохранности и т.д. Недостатком их является низкая точность преобразования и значительная нагрузка на оператора, утомление которого может приводить к дополнительным погрешностям.

Автоматические непрерывно-дискретные преобразователи работают без участия человека – информация считывается с помощью специального луча. Точность преобразования более высокая, чем при использовании полуавтоматического устройства, однако возрастают требования к оформлению диаграмм, предъявляемых для считывания.

В связи с тем, что скорость преобразования ограничивается выходными перфораторами и некоторыми другими узлами, осуществляющими цифровое кодирование, быстродействие автоматических преобразователей в настоящее время ненамного превышает быстродействие полуавтоматов.

Полевые преобразователи характеризуются большей точностью, чем лабораторные. Однако их применение требует больших затрат, поскольку таким устройством должна быть снабжена каждая каротажная станция. Впрочем, противопоставление лабораторных и полевых преобразователей неправомерно, так как каждый из этих типов аппаратуры имеет свою область применения: полевые устройства нужны для обработки текущей информации, лабораторные – для интерпретации фондовых материалов. Более подробные данные о каротажных непрерывно-дискретных преобразователях приведены в [1,2,9,14,17,44].

§ 3. Устройства для выдачи результатов машинной интерпретации в цифровой и аналоговой форме

Универсальные электронные цифровые вычислительные машины оборудованы выводными устройствами, печатающими дискретную информацию. Наиболее распространены два вида печатающих устройств - "узкая" и "широкая" печать.

Узкая печать выдает колонки чисел, записанных на узкой бумажной ленте (шириной 8 см). Устройства широкой печати (автоматическое цифровое печатающее устройство - АЦПУ) позволяют печатать не только цифры, но также буквы и другие символы - знаки препинания, математические знаки и т.д. - что дает возможность получать результаты обработки в виде текста, различного рода таблиц и проч. Примеры таблиц результатов машинной интерпретации данных БКЗ, выданных АЦПУ, приведены в последующих главах.

В настоящее время широкая печать очень часто используется для приближенной записи аналоговой информации - графиков, карт и проч. В этом случае вместо линий печатаются последовательности тех или иных символов. Однако во многих случаях АЦПУ нельзя использовать для выдачи аналоговой информации - точность построения графиков и карт оказывается совершенно недостаточной. Это привело к необходимости создания специализированных устройств для выдачи результатов обработки геолого-геофизических данных - устройств для записи каротажных диаграмм и литологических колонок, устройств для записи карт изолиний.

Устройство для выдачи информации в виде каротажных диаграмм осуществляет преобразование, обратное рассмотренному квантованию - массивы чисел преобразуются в непрерывные кривые.

Одним из наиболее важных результатов интерпретации промышленно-геофизических данных является построение геологического разреза толщи, пересеченной скважиной. Этот разрез оформляется в виде литологической колонки с выделением продуктивных пластов, пластов-коллекторов и других элементов, важных для правильной эксплуатации или же дальнейшей разведки месторождения. В связи с этим разработано специализированное аналоговое устройство И-024 для выдачи литологической колонки, а также нескольких каротажных кривых (как исходных, так и полученных в результате трансформации).

В ряде случаев на основе обработки промышленно-геофизических материалов строятся карты, в частности, различного рода карты в изолиниях. Для вычерчивания изолиний предложены различные (специа-

лизированные) устройства. Разработанное Киевским политехническим институтом устройство "Карта" [8,9] рассчитано на полуавтоматическое построение изолиний - оно печатает точки пересечения изолиний с системой прямых, параллельных одной из координат планшета. Соединение этих точек кривыми производится вручную.

Разработаны и более совершенные отечественные графикостроители - "Атлас" и др.

§ 4. Передача промыслово-геофизической информации

Проблема передачи данных геофизических исследований скважин от места ее получения (с буровой) до места обработки сложна в связи с тем, что в большинстве случаев буровые удалены от постоянных линий связи. Проблема связи с буровыми в настоящее время решается в рамках разработки отраслевой автоматизированной системы управления (ОАСУ) геологоразведочными работами. Ни один из видов связи (кабельная, радиорелейная, радио) не обладает абсолютным преимуществом. Необходимо комбинированное использование различных каналов связи. Для передачи промыслово-геофизической информации в СНИИГиМС и Тюменском ГУ ИВЦ были разработаны специализированные устройства [2,147].

§ 5. Электронные цифровые вычислительные машины, применяемые при решении задач промысловой геофизики

При решении задач промысловой геофизики используются универсальные ЭЦВМ серии "Урал", "Минск", БЭСМ, "Раздан" и др.* В наибольшем объеме программы решения прямых и обратных задач промысловой геофизики, в том числе программы машинной интерпретации промыслово-геофизических данных, разработаны для машин М-20 и других машин с аналогичной системой команд (БЭСМ-4, М-220 и т.д.), а также для машины "Минск-22". Это машины среднего класса, обладающие быстродействием в несколько тысяч (или первых десятков тысяч) команд в секунду.

Электронные цифровые вычислительные машины состоят из следующих основных частей (рис.2):

устройства ввода; устройства памяти; функционального (арифметического) устройства; устройств вывода.

* Подробная характеристика различных советских вычислительных машин приведена в справочнике [12].

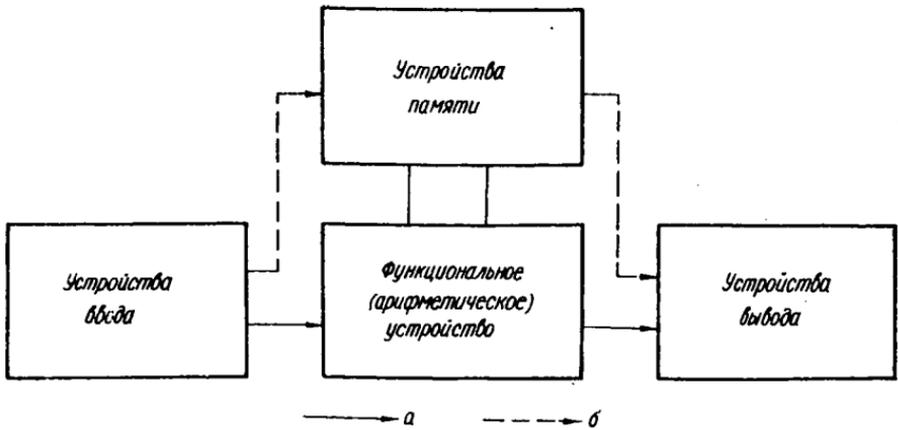


Рис.2. Принципиальная схема электронной цифровой вычислительной машины /ЭЦВМ/.

Связи: а - в одноканальной ЭЦВМ, б - дополнительные, в многоканальной ЭЦВМ.

Устройство ввода позволяет считывать и заносить в память ЭЦВМ исходную информацию. Как правило, машины оборудуются устройствами, считывающими информацию, записанную на перфоноситель - с перфоленты или с перфокарт.

Устройство памяти предназначено для хранения статической и динамической информации. Статической информацией называют различного рода величины неалгоритмического характера - числа, логические значения, текстовые фрагменты, введенные в ЭЦВМ или же полученные в процессе обработки. Динамическая информация носит командный характер, т.е. представляет собой запись алгоритма на машинном языке.

Организация памяти в современных ЭЦВМ носит довольно сложный характер: как правило, имеется несколько уровней памяти - оперативная (внутренняя), внешняя, а в ряде случаев еще и промежуточная. Необходимость в такой иерархической структуре памяти вызвана тем, что, как правило, не удается удовлетворить одновременно двум основным и, к сожалению, противоречивым требованиям, предъявляемым к памяти ЭЦВМ: большому объему и высокому быстродействию. Чем больше объем памяти, тем, при прочих равных условиях, больше времени приходится затрачивать на выборку нужной информации. В связи с этим данные, к которым в процессе решения задачи приходится обращаться часто, хранятся в оперативной памяти, которая, хотя и имеет отно-

сительно малый объем, но зато обеспечивает быструю выдачу информации и, тем самым, достаточное быстродействие ЭЦВМ. Память более высокого уровня – промежуточная, внешняя – характеризуется большим объемом, но и большими затратами времени на выборку единицы информации.

Оперативная память обычно выполняется на магнитных сердечниках, промежуточная – на магнитном барабане и на магнитных дисках, внешняя – на магнитных лентах. Объем оперативной памяти составляет сотни тысяч бит, промежуточной – около миллиона или миллионы бит, внешней – десятки и сотни миллионов бит. Время обращения к оперативной памяти составляет сотни микросекунд и меньше, к промежуточной – миллисекунды, к внешней памяти – десятки, сотни миллисекунд и даже секунды и десятки секунд.

В большинстве ЭЦВМ информация, хранящаяся в памяти, дробится на отдельные единицы, так называемые "машинные слова". Для хранения каждого машинного слова в памяти отводится определенная ячейка. Одно машинное слово может содержать число, команду, набор логических констант, последовательность символов (букв, цифр и других знаков).

Для предварительного знакомства с принципами работы ЭЦВМ вполне допустимо отвлечься от сложной структуры памяти и рассматривать ее как однородную последовательность ячеек. Ячейки памяти нумеруются. Номер ячейки, в которой хранится некоторая информация (число, команда), носит название *адреса*. Адрес может быть выражен непосредственно целым числом (номером), в этом случае он называется *действительным адресом*, или же обозначен некоторым символом, например, латинской или греческой буквой (x, α); в последнем случае говорят о *символических адресах*. Промежуточное положение между действительными и символическими адресами занимают *словные*, когда адрес ячейки записывается в виде некоторого арифметического выражения, содержащего символы. Так, если адрес некоторой ячейки обозначен символом α , то условный адрес $\alpha + 1$ обозначает номер ячейки, расположенной непосредственно за ячейкой α . Удобство использования символических и условных адресов заключается в том, что можно составлять программу, не обуславливая заранее, в какую часть памяти она будет занесена. Следует заметить, что программа в условных адресах не является записью на машинном языке и для того, чтобы машина могла исполнить ее, нужно предварительно перевести условные адреса в действитель-

ные. Эта работа носит технический характер и во многих случаях может осуществляться автоматически на ЭЦВМ с помощью сравнительно несложных компилирующих программ (ассемблеров).

Информация, хранящаяся в ячейке памяти с адресом α , называется содержимым адреса α . Понятия адреса и содержимого являются очень важными в теории программирования и алгоритмических языков.

Говоря о символических языках, необходимо обратить внимание на тот факт, что символ адреса ячейки может рассматриваться и как обозначение содержимого ячейки, например, некоторого числа.

Функциональное устройство (процессор) выполняет различные операции над информацией, введенной в ЭЦВМ и хранящейся в ее памяти. К числу таких операций относятся: арифметические (сложение, вычитание, умножение, деление), логические (логическое сложение, логическое умножение, отрицание, эквивалентность), определение истинности значения некоторых высказываний (неравенств, равенств) операции выбора и записи информации, передачи управления различным частям программы и др. В первых программах, когда ЭЦВМ использовались в основном для выполнения различных расчетов, роль арифметических операций была очень велика, в силу чего функциональное устройство было названо арифметическим и это название часто применяется и теперь, хотя уже давно стало общепризнанным, что "... цифровая вычислительная машина - машина более логическая, нежели арифметическая ...".

После того, как предусмотренная программой последовательность операций выполнена на ЭЦВМ и получены результаты, последние выдаются машиной с помощью выводных устройств. К числу выводных устройств, которыми оборудуются универсальные ЭЦВМ, относятся: узкая печать, осуществляющая выдачу колонки чисел, разделенных интервалами определенной длины; широкая печать, допускающая печатание текста, таблиц и даже фигур и рисунков; кроме того, в ЭЦВМ есть выводные перфораторы, позволяющие автоматически набивать выводимую информацию на перфоноситель - перфокарты или же перфоленту. Выводные перфораторы имеют большое значение, например, при автоматизации программирования, когда составленная машиной программа в кодах ЭЦВМ выдается в законченном виде - набитой на перфоленту или же в виде колоды перфокарт.

Перечисленные выводные устройства не всегда удовлетворяют геофизиков, так как при решении многих задач желательно окончатель-

ные результаты получить оформленными в виде карт, графиков. Это привело к созданию ряда специализированных выводных устройств, о которых уже упоминалось.

§ 6. Алгоритмизация обработки промыслово-геофизических данных

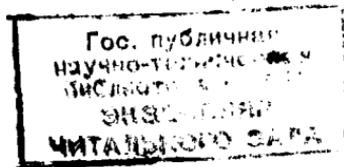
Создание машинных методов интерпретации данных геофизических исследований скважин потребовало расчленения всего процесса обработки каротажных диаграмм на отдельные этапы, построения для каждого этапа и звена соответствующей математической модели и, наконец, разработки и опробования программ (алгоритмов) для найденных моделей, а также структуры входных и выходных массивов информации.

Указанные действия – расчленение процесса обработки на этапы и звенья, построение моделей, разработка и опробование программ, определение структуры обрабатываемых данных – составляют процесс а л г о р и т м и з а ц и и решения задачи. Конечным результатом процесса является создание алгоритмов (программ). А л г о р и т м о м называется четкое описание последовательности операций, которое должна выполнить машина, чтобы на основе исходных данных получить окончательный результат. Таким образом, при решении задачи мы имеем такую схему (рис.3,а): входная информация (V_x) обрабатывается алгоритмом (Алг), в результате чего получают выходную информацию (V_y). Машина в процессе решения сложной задачи реализует целый ряд частных алгоритмов. При этом выходная информация одного (см.рис.3,б) или нескольких (см.рис.3,в) частных алгоритмов является одновременно входной информацией для нового частного алгоритма.

Структура общих (суммарных) алгоритмов может быть весьма сложной и представлять не только "деревья" с развитым ветвлением, но местами и "петли". Так, выходная информация для отдельного алгоритма (или ветви алгоритма) может служить для него же входной информацией (рис.3,г). Образуется так называемая и т е р а ц и о н н а я п е т л я или ц и к л (например, при решении задачи методом последовательных приближений). С итерациями в алгоритмических схемах нам неоднократно придется встречаться в последующих главах*.

Сам алгоритм (программа) неоднороден по составу и содержит два вида информации – динамическую (командную) и статическую (параметрическую). Статическая информация состоит из различного рода

* Очень важно при реализации циклов предусмотреть своевременный выход на него. В случае ошибки петля может оказаться "порочной" – ЭЦВМ не в состоянии будет самостоятельно выйти из нее.



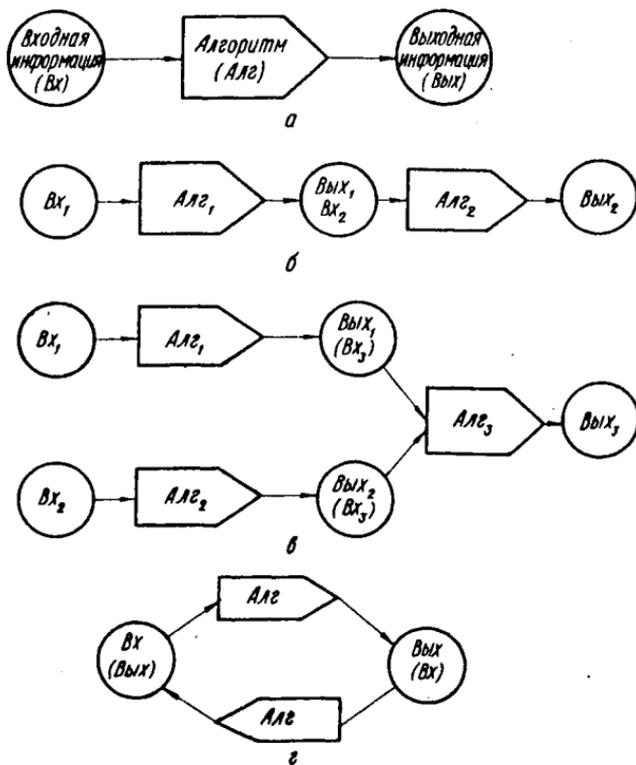


Рис.3. Схема рабочих алгоритмов.

констант (параметров), участвующих в процессе обработки входной информации. Так, в качестве параметрических констант часто задаются критические значения, например, значение пористости, ниже которого пласт не может рассматриваться как коллектор, значение нефтегазонасыщенности коллектора, ниже которого он не может рассматриваться как продуктивный и т.п. В качестве параметрической информации могут фигурировать логические константы (определяющие переход с одной ветви алгоритма на другую), строки (для формирования текстов и таблиц). При изменении параметрических констант окончательный результат может меняться и даже очень существенно. Выделяя из алгоритма ее статическую часть – параметрическую информацию – мы приходим от схемы рис.3, а к схеме, показанной на рис.4, а. Алгоритмы, осуществляющие преобразование входной информации в выходную на базе постоянной параметрической информации, называются **р а б о ч и м и**, или алгоритмами первого уровня.

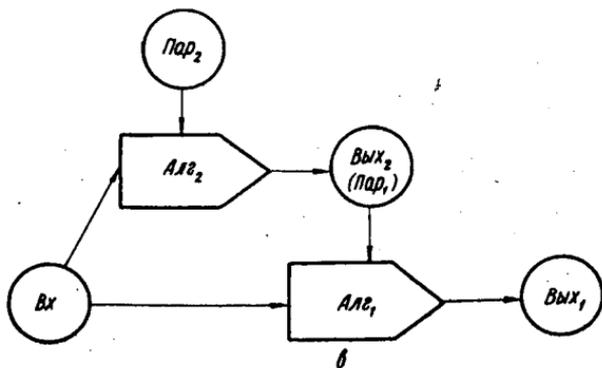
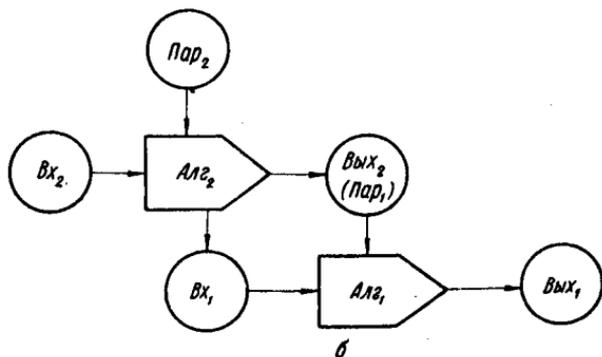
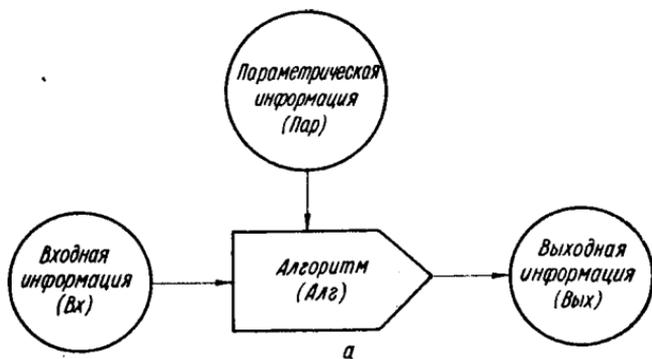


Рис.4. Схема совершенствования алгоритмов.

Рабочие алгоритмы нередко оказываются достаточно эффективными лишь в определенных, сравнительно узких, пределах, причем область их эффективной работы можно расширить изменением параметрической информации. Изменение параметрической информации осуществляется с помощью специального управляющего алгоритма (алгоритма второго уровня, см. рис. 4, б, в).

Работа алгоритма второго уровня может корректироваться управляющими алгоритмами третьего уровня и т.д. Сложные алгоритмы, содержащие рабочий и корректирующий его работу управляющий алгоритмы, называются самосовершенствующимися алгоритмами. Степень воздействия управляющего алгоритма на рабочий может быть различной. Это воздействие может заключаться в уточнении или определении значений отдельных параметров и тогда говорят о самокорректирующихся алгоритмах (об алгоритмах, самосовершенствующихся на базе самокоррекции). Управляющий алгоритм может выбирать наиболее эффективный в данных условиях режим работы. В таком случае говорят о самоадаптирующихся (самонастраивающихся) или самооптимизирующихся алгоритмах. Часто в задачу управляющих алгоритмов входит вычисление целых массивов параметров, определяющих процесс решения задачи. Такие самосовершенствующиеся алгоритмы чаще всего называют самообучающимися. Наконец, управляющий алгоритм может менять структуру рабочего алгоритма, исключая из него те или иные звенья и включая новые. Такие алгоритмы предложено называть самоорганизующимися (самосовершенствующимися на базе самоорганизации).

Следует заметить, что разделение самосовершенствующихся алгоритмов на перечисленные разновидности весьма условно и один и тот же алгоритм в одних условиях может быть назван самокорректирующимся, а в других — самоадаптирующимся.

В практике машинной обработки промышленно-геофизических данных самосовершенствующиеся алгоритмы встречаются часто. Так, при интерпретации данных бокового каротажного зондирования часто целесообразно, чтобы ЭЦВМ определила или уточнила значение удельного сопротивления бурового раствора в интервале исследований. Здесь мы имеем дело с самокоррекцией. При расчленении разреза пересеченной скважиною толщи по кривым КС градиент-зондов желательнее, чтобы программа на основе анализа фактических каротажных кривых выбрала наиболее эффективные для конкретного случая параметры, определяющие расчленение. В этом случае можно говорить, что алгоритм обла-

дает возможность самоадаптации (самонастройки). При определении (диагностике) типов геологических объектов (пластов-коллекторов, продуктивных пластов и т.д.) в так называемой задаче распознавания образцов на основе фактических данных происходит формирование таблиц (массивов), определяющих процесс диагностики. Такие самосовершенствующиеся программы в геологической литературе принято называть самообучающимися. Наконец, при создании систем обработки данных, как правило, предусматривается возможность изменения структуры решения задачи в зависимости от конкретных геологических и технических условий - для каждой конкретной ситуации одни подпрограммы включаются в работу, другие исключаются из процесса обработки промыслово-геофизических и смежных геологических данных. Можно считать, что такие системы в определенной степени обладают возможностью самоорганизации.

При разработке самосовершенствующихся алгоритмов и программ важно придерживаться принципа поуровневой алгоритмизации. Принцип поуровневой алгоритмизации [32] требует вначале тщательного изучения возможности рабочих алгоритмов, их структуры, режима работы, эффективности, а уже потом разработку управляющих алгоритмов. Таким образом, первоначально разрабатываются и достаточно глубоко изучаются алгоритмы более низкого уровня, а затем более высокого.

Как показала практика обработки на ЭЦВМ геолого-геофизических данных, привлечение из других областей сложных многоуровневых программ до того, как изучены возможности и эффективность рабочих алгоритмов, чревато большими неприятностями [27].

Графические схемы алгоритмов, подобные приведенным на рис. 3 и 4 и содержащие как частные алгоритмы, так и их входные и выходные данные, называют информационно-алгоритмическими схемами или УНКОН-диаграммами.* Более часто для иллюстрации структуры алгоритма используют упрощенные схемы, так называемые блок-схемы, на которых показывается лишь связь между алгоритмами, а данные о входной и выходной информации исключаются. С примерами блок-схем алгоритмов мы познакомимся в последующих главах настоящей книги.

Блок-схемы, равно как и УНКОН-диаграммы, позволяют показать лишь главные особенности алгоритмов, они мало пригодны для детального описания алгоритма.

* Такие диаграммы использовались в докладе о языке УНКОН [49, 50, 51]. УНКОН-диаграммы могут содержать также и информацию о типе ЭЦВМ, на которой реализуется алгоритм.

При алгоритмизации очень важно для каждого частного алгоритма (реализующего отдельное звено в процессе обработки данных) точно определить полный состав входной, параметрической и выходной информации. Если какая-то часть входной или параметрической информации, фактически используемой интерпретатором при решении данной частной задачи, упущена, машинный алгоритм может по своей эффективности уступать, и даже очень существенно, обычной (ручной) обработке. Так, при определении характера нефтенасыщения пласта (является ли он продуктивным или водоносным) интерпретатор учитывает положение водонефтяного контакта. Машинные диагностические программы, не использующие эти данные, в определенных случаях будут давать неправильные или неоднозначные ответы, в то время как ручная интерпретация дает точные результаты. Если недостаточно продуман состав выходной информации, то полезная информация, содержащаяся в исходных данных, будет извлечена не полностью, причем неполнота ответных данных может вести к ошибкам. Так, при интерпретации фактических кривых каротажного зондирования, если не констатировать факт наличия (отсутствия) явления U - или A -эквивалентности, найденная оценка параметров зоны проникновения может оказаться совершенно не соответствующей действительности и дальнейшее ее использование на последующих этапах обработки, например, при определении пористости пласта, приведет к значительным ошибкам в конечных результатах интерпретации.

Иногда при построении информационно-алгоритмических схем выясняются "порочные петли" — входная информация алгоритмов предшествующих звеньев вырабатывается лишь последующими алгоритмами. В этом случае общая схема алгоритма требует коренной переработки.

После выяснения структуры информационно-алгоритмической схемы отрабатываются алгоритмы отдельных звеньев. Тщательно продумывается та последовательность операций, которая позволяет на основании входной и параметрической информации получить с наибольшей точностью выходную информацию.

При автоматизации обработки промыслово-геофизической информации можно создать такие типы алгоритмов различных звеньев процесса интерпретации.

Машинные варианты известных "ручных" методик обработки предусматривают достаточно точную имитацию всех тех действий, которые выполняет интерпретатор при обработке данной информации.

При разработке машинных аналогов традиционных методов обработки за основу берутся достаточно опробованные

на практике методики интерпретации, но в деталях есть существенные отличия, поскольку, с одной стороны, "кратчайший" путь для человека может оказаться громоздким для ЭЦВМ и наоборот, а с другой стороны, машинная интерпретация позволяет осуществить более глубокую и более сложную методику обработки.

Так, при формализации интерпретации кривых каротажного зондирования машина не только находит палеточную кривую, наиболее близкую к фактической, но и количественно оценивает степень совпадения этих кривых, что интерпретатор сделать не в состоянии. ЭЦВМ без существенных затрат машинного времени может произвести интерполяцию между палетками; осуществить же это вручную весьма громоздко и, как правило, интерпретатор избегает этого. Весьма несовершенная методика выборочного внесения поправок за влияние интегрирующей ячейки на показания радиоактивного каротажа по палетке Дивана при машинной обработке заменяется более простой (с точки зрения реализации на ЭЦВМ) и более универсальной методикой трансформации кривой РК в соответствии с дифференциальным уравнением, описывающим влияние интегрирующей ячейки [25].

В машинных аналогах более широко используется аппарат математической статистики и других разделов математики, поскольку громоздкие вычисления при ручной интерпретации оказываются практически невыполнимыми.

Построение машинных аналогов и вариантов сравнительно простое в том случае, если вся методика достаточно четко описана. Однако во многих случаях анализ материалов интерпретатором связан с такими формами умственной деятельности, как узнавание, интуитивная догадка и пр., — формализация процесса обработки в этом случае сталкивается с серьезными трудностями. В этом случае об имитации, копировании говорить не приходится — необходима разработка формальных моделей анализа материала, позволяющих получить такие же (или близкие) результаты, какие получает человек.

Широко известны алгоритмы (программы), моделирующие узнавание (так называемые программы распознавания образов, разработанные для решения задач автоматического чтения текста и нашедшие применение и в других областях науки и техники, в том числе при решении геологических задач). С рядом разработанных автором алгоритмов, моделирующих такие этапы анализа материалов, как расчленение разреза окважины по комплексу каротажных диаграмм, корреляция каротажных диаграмм читатель познакомится в последующих главах настоящей монографии.

При разработке моделей звеньев интерпретации, опирающихся на интуицию интерпретатора, нередко приходится начинать с простейших шагов - разработки алгоритмов *ad hoc*,* т.е. алгоритмов, приводящих к желаемому результату, но только в данном, конкретном случае, например, алгоритм, позволяющий выделить в отдельной скважине интересующий нас объект. Построение ряда алгоритмов *ad hoc* открывает возможность создания обобщающего алгоритма, дающего удовлетворительные результаты для группы скважин. Все более нарастая общность алгоритма, постепенно приходят к алгоритмам, рассчитанным на широкое применение. Весьма частая ошибка, встречающаяся при алгоритмизации обработки геолого-геофизической информации, заключается в том, что алгоритмы *ad hoc* или же близкие к ним по общности преподносятся как алгоритмы, рассчитанные на широкое использование.

Применение ЭЦВМ открыло возможность разработки принципиально новых методов интерпретации данных, основанных на таких решениях задачи, которые практически невозможно осуществить вручную из-за чрезвычайно больших объемов вычислений. Это так называемые с п е ц и ф и ч е с к и м а ш и н н ы е методы. Например, ведутся работы по созданию методики непалеточной интерпретации данных каротажа сопротивлений, основанные на непосредственном пересчете каротажных кривых в кривые, характеризующие пространственное распределение удельного сопротивления в пересеченной скважиной толще на основе решения дифференциальных или интегральных уравнений математической физики. Создание специфических машинных методов является весьма сложной задачей как в силу новизны применяемых математических методов, так и в силу необходимости глубокого анализа фактической эффективности новых методов обработки.

На первом этапе разработки методов машинной интерпретации промыслово-геофизических данных широко применяется разработка машинных а н а л о г о в, хорошо зарекомендовавших себя на практике традиционных приемов обработки материалов. Разработка машинных в а р и а н т о в имеет смысл лишь в тех случаях, когда необходимо дать объективную оценку конкретных методик обработки данных интерпретатором на массовом материале. При разработке алгоритмов большую роль играет их достаточно четкое описание.

Детальное описание алгоритма может быть произведено различными способами. Можно, например, изложить алгоритм текстом на русском

* *Ad hoc* (лат.) - для данного случая.

языке. Однако это, как правило, очень громоздко и, что очень важно, не всегда достаточно четко. Если алгоритм сводится к вычислительным операциям, то его удобнее выражать в виде математических формул.

Так, формула, связывающая пористость пласта с его относительным электрическим сопротивлением

$$\rho = \frac{\alpha}{K_n^m}, \quad (3)$$

где α и m — априорно известные константы, определяет порядок математических действий, цель которых вычислить K_n по известному значению ρ , т.е. эквивалентна описанию некоторого алгоритма.

Наиболее широко для записи алгоритмов применяются специальные искусственные алгоритмические языки. Среди них особую роль играют машинные языки, разработанные таким образом, чтобы их легко могла воспринять ЭЦВМ. Почти каждая марка ЭЦВМ рассчитана на определенный машинный язык. Алгоритм, записанный на машинном языке конкретной ЭЦВМ (в кодах данной ЭЦВМ), называется программой. Машинный язык, как правило, довольно громоздкий, но зато предельно четкий. На языке ЭЦВМ "Минск-22" программа расчета по формуле (3), включая используемые при этом подпрограммы, содержит несколько десятков команд, т.е. занимает около двух страниц текста.

Использование машинных языков во многих случаях сопряжено с определенными неудобствами. Программа, составленная для одной марки ЭЦВМ, как правило, не годится для машины другой марки. Это, безусловно, существенный недостаток. Составление программы весьма трудоемко; программы средней сложности содержат тысячи команд и даже небольшая неточность, например, неправильный знак у числа, может сделать ее непригодной к работе. Как показывает опыт, даже очень квалифицированному программисту далеко не всегда удается избежать ошибок. Поэтому после того, как программа составлена, ее отлаживают — проверяют на специально подготовленных примерах для выявления и исправления вкрапившихся ошибок.

Преодоление указанных недостатков программирования (трудоемкость, потери, связанные с отладкой программ, невозможность непосредственного использования программ, составленных для ЭЦВМ других марок и т.д.) возможно на основе разработки методов автоматического программирования.

Основная идея автоматического программирования заключается в следующем. Алгоритм записывается не в кодах конкретной ЭЦВМ, а на специально разработанном алгоритмическом языке, удовлетворяющем такие требования:

1. Текст с записью алгоритма не зависит от марки ЭЦВМ данного класса, на которой он будет реализован.

2. Алгоритмический язык должен быть наиболее прост и удобен для овладения его человеком и, кроме того, допускать компактную и точную запись алгоритмов.

3. Должен обеспечиваться автоматический перевод алгоритмического текста с помощью специальной программирующей программы в коды данной ЭЦВМ.

В настоящее время разработано большое число алгоритмических языков, более или менее успешно удовлетворяющих перечисленным требованиям - АЛГОЛ-60, адресный язык, ФОРТРАН, КОБОЛ, ЛИСП, ГРИАЛ и т.д. Наиболее распространен в СССР международный алгоритмический язык АЛГОЛ-60.*

Оператор вычисления приведенной выше формулы (3) на языке АЛГОЛ-60 записывается так:

$$P := a \times kn^t(-m). \quad (4)$$

Подробнее с изобразительными средствами алгоритмических языков мы ознакомимся ниже.

Опыт применения программирующих программ (часто их называют английским словом "транслятор") показывает большую эффективность автоматического программирования. Программа, составление которой требует недель, месяцев работы программиста, может быть описана на алгоритмическом языке в течение нескольких дней, а то и часов. Для автоматического перевода такого алгоритмического текста в коды ЭЦВМ необходимо время от долей до нескольких часов. Время на отладку программ требуется меньше, чем при ручном программировании.

Следует отметить, что автоматическое программирование обладает и некоторыми недостатками, которые нельзя упускать из виду. К числу их нужно отнести то, что в силу несовершенства созданных к настоящему времени трансляторов, получающиеся в результате автоматического перевода алгоритмического текста программы, как правило, менее экономичны, чем программы, составленные вручную квалифицированным программистом. Они содержат гораздо больше (иногда в 2-3 раза) команд. В настоящее время ведутся работы по совершенствованию программирующих программ, поэтому можно ожидать, что в ближайшее время получаемые в результате трансляции программы по качеству будут соответствовать программам, составленным программистами

* В последнее время все чаще применяются новейшие версии языка ФОРТРАН (ФОРТРАН-IV и его расширения).

средней квалификации. К числу других недостатков можно отнести трудность нахождения и исправления в программе ошибок, порожденных ошибками в алгоритмическом тексте. Это предъявляет строгие требования к качеству алгоритмического текста. В настоящее время разрабатываются средства анализа для автоматического выявления или даже исправления синтаксических ошибок. Если же в тексте есть ошибки по содержанию (например, указаны не те действия, которые требуют правильное решение задачи), то по исправлению текста необходимо осуществить перевод на машинный язык заново.

Несмотря на эти недостатки, в силу описанных преимуществ, автоматическое программирование шире применяется при использовании ЭЦВМ, особенно при разработке экспериментальных программ, не рассчитанных на многократное применение.*

Важно отметить, что практическое применение алгоритмических языков отнюдь не исчерпывается областью автоматизации программирования. Не менее важное значение имеет использование алгоритмических языков как средства общения людей. Во-первых, это относится к обмену алгоритмической информацией между работниками, имеющими в своем распоряжении машины различных марок. Алгоритмы, записанные на алгоритмических языках, в первую очередь на языке АЛГОЛ-60, широко публикуются в различных журналах и научно-технических сборниках, в том числе геолого-геофизических. Во-вторых, алгоритмический язык является прекрасным средством общения между специалистом в конкретной области, в интересующем нас случае - геофизиками, с одной стороны, и математиками-программистами, с другой.

Геофизик составляет алгоритм на алгоритмическом языке, а математик на этой основе разрабатывает программу непосредственно в кодах ЭЦВМ. Такой "двухэтапный" метод программирования хорошо зарекомендовал себя на практике, позволяя геофизикам, не вникая в детали программирования в машинных кодах, активно участвовать в разработке машинных методов интерпретации данных.

Алгоритмическим языкам, особенно международному алгоритмическому языку АЛГОЛ-60, посвящена обширная литература, в том числе ряд учебных пособий и руководств, рассчитанных на приступающих к изучению [3,6,7,39 и др.]

*Указанные трудности автоматизации программирования в настоящее время преодолеваются на основе применения алгоритмических языков различных уровней - "крупноблочных" языков (типа АЛГОЛ, ФОРТРАН), позволяющих компактно записывать алгоритмы, но приводящих к менее экономичным исполнителным программам, и алгоритмических языков ассемблерного типа (типа автокода), очень близких к машинным языкам и позволяющих максимально использовать возможности конкретных марок ЭЦВМ.

§ 7. Обобщенная информационно-алгоритмическая схема
машинной интерпретации промыслово-геофизических
данных

Обработка промыслово-геофизических данных ведется в двух основных планах:

а) интерпретация комплекса каротажных диаграмм по одной только скважине для выявления в разрезе промышленно важных объектов (нефте- или газоносных коллекторов и др.) и выдачи рекомендаций о спуске обсадных колонн, интервалов прострела и т.д.;

б) площадная интерпретация промыслово-геофизических и смежных геологических данных - корреляция каротажных диаграмм для выяснения тектонических и палеотектонических литолого-фациальных особенностей разведываемых площадей и регионов, построение различного рода структурных пластометрических и других карт, подсчет запасов открытых месторождений и отдельных залежей и т.д.

Как уже указывалось в предисловии, в настоящей монографии мы будем касаться машинных методов решения задач лишь первого класса.

Обработка и интерпретация комплекса каротажных диаграмм по отдельной скважине распадается на ряд основных этапов:

1. Контроль качества и предварительная обработка исходных данных. Этот этап предусматривает решение таких задач, как констатация того, что поступившие для интерпретации исходные данные - каротажные диаграммы, преобразованные в цифровую форму, - не одержат брака и могут быть представлены для дальнейшей обработки (или наоборот); выявление отдельных погрешностей - случайных сбоев, пропуск меток глубин и, если это возможно, устранение найденных ошибок; преобразование значений регистрируемого параметра из формата^ж, принятого для непрерывно-дискретного преобразователя, в формат, принятый для данной ЭВМ; формирование стандартных массивов, соответствующих отдельным каротажным кривым; увязка кривых по глубине и т.д.

2. Преобразование отдельных каротажных кривых (внесение поправок в кривые радиоактивного каротажа, дробнолинейное преобразование, изменение масштаба и т.д.).

3. Получение частных расчленений по отдельным каротажным кривым.

4. Получение сводного расчленения на основе частных расчленений.

^ж Форматом называется структура записи информации на носителе.

5. Отсчет характерных значений с каротажных кривых против выделенных пластов, формирование фактических кривых (векторов) БКЗ, характеристических векторов для качественной интерпретации и т.д.

6. Качественная интерпретация - определение литологии выделенных пластов, характера насыщения порового пространства коллекторов.

7. Количественная интерпретация данных - палеточная интерпретация фактических кривых БКЗ для определения удельного сопротивления зоны проникновения и неизменной части пласта; определение пористости, нефтегазонасыщенности и других параметров по известным статистическим (корреляционным) связям и т.д. Количественная интерпретация производится для отдельных пластов. Однако для определенных интервалов разреза может производиться непрерывное преобразование каротажной кривой или группы кривых в кривую интересующего нас параметра - пористости, нефте- или газонасыщенности и т.д. Как правило, такое преобразование сопряжено с внесением случайных и систематических погрешностей (за счет искажающего влияния сложных конфигураций кривых вблизи границ пластов и т.д.). Поэтому кривые, получаемые в результате такой трансформации, фактически являются кривыми кажущихся значений параметров - кривой кажущейся пористости, кажущейся нефтенасыщенности и т.д.

8. Оформление результатов интерпретации - формирование и печать соответствующих таблиц, графиков и т.д.

Программы первого этапа в значительной мере определяются особенностями технических средств - форматом (структурой) записи информации, получаемой на выходе непрерывно-дискретного преобразователя, форматом записи чисел в машинном слове ЭЦВМ и т.д., так что их описание требует привлечения материалов об указанных технических средствах. В связи с ограниченным объемом настоящей монографии эти программы будут описаны в общих чертах. Другие этапы, представляющие наибольший интерес для геофизика, будут освещены детальнее.

На рис.5 приведена генерализованная информационно-алгоритмическая схема интерпретации промыслово-геофизических данных по отдельной скважине. Элементы этой схемы таковы.

И н ф о р м а ц и я: 1 - комплекс каротажных диаграмм (в цифровой форме); 2 - частные расчленения; 3 - сводное расчленение; 4 - характерные значения, отсчитываемые для качественной интерпретации (диагностики); 5 - характерные значения, отсчитываемые для количественной интерпретации; 6 - кривые кажущихся значений кол-

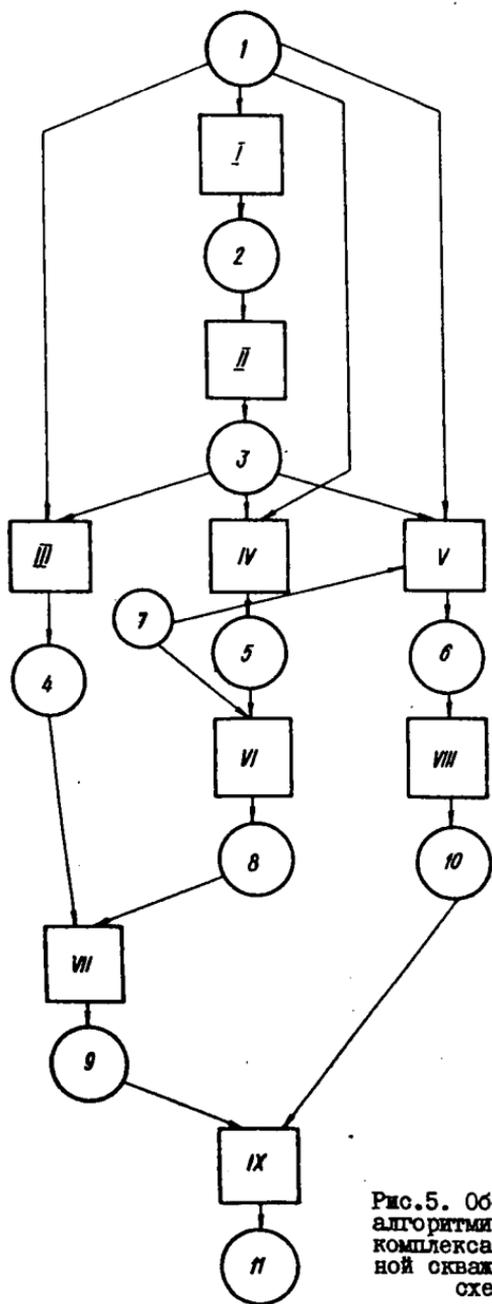


Рис.5. Обобщенная информационно-алгоритмическая схема интерпретации комплекса каротажных диаграмм по одной скважине (экспликация элементов схемы дана в тексте).

литорских свойств; 7 - палетки и параметры корреляционных связей; 8 - количественные значения параметров пластов (удельного электрического сопротивления, пористости, нефтегазонасыщенности и т.д.); 9 - данные о характере насыщения пластов; 10 - интервалы промышленно-важных объектов (продуктивных пластов, коллекторов, удобных для создания подземных газохранилищ и т.д.); 11 - таблицы и графики результатов машинной интерпретации.

А л г о р и т м ы : I - получения частных расчленений по отдельным каротажным кривым; II - получения сводного расчленения; III - отсчета характерных значений для качественной интерпретации; IV - отсчета характерных значений для количественной интерпретации; V - трансформации каротажных кривых в кривые кажущихся значений коллекторских свойств; VI - количественной интерпретации, включающей палеточную интерпретацию фактических кривых каротажного зондирования; VII - определения типа объекта (распознавания образов); VIII - выделения по кривым кажущихся значений коллекторских свойств интервалов продуктивных пластов и пластов-коллекторов; IX - оформления и печати результатов машинной интерпретации.

Глава II. АЛГОРИТМЫ РАСЧЛЕНЕНИЯ КАРОТАЖНЫХ КРИВЫХ

§ I. Общая схема расчленения разреза на пласты

Одной из важнейших задач интерпретации каротажных диаграмм является расчленение разреза на отдельные пласты. Если разрез не очень сложен, опытный интерпретатор, глядя на диаграмму, быстро "узнает" интересующие его пласты, отмечает их границы и делает пометки о типе выделенного пласта, например, продуктивный коллектор, водоносный коллектор и т.д. Формализация этого процесса оказалась отнюдь не легкой задачей, и несмотря на то, что достигнуты значительные успехи, ее еще нельзя считать полностью решенной.

Как правило, интерпретатор производит расчленение по комплексу каротажных диаграмм, учитывая показания различных методов каротажа против выделяемого пласта. В связи с этим при формализации процесса расчленения удобно выделить два этапа: расчленение по отдельным кривым (так называемое сингулярное расчленение), в результате чего получают частные разбиения разреза на пласты и построение на основе частных разбиений сводного разбиения (сводного расчленения).

Мы рассмотрим алгоритмы расчленения разреза по отдельным каротажным диаграммам. В основу получения частных расчленений положен метод характерных точек.

§ 2. Метод характерных точек

Процесс расчленения разреза по каротажной кривой сводится к тому, что ЭВМ, просматривая кривую, выделяет на оси глубин точки, которым могут быть соотнесены границы пластов (или других геологических объектов). Такие точки называются **характерными**. В связи с тем, что конфигурации каротажных кривых отличаются исключительным разнообразием и сложностью, для отбивки границ пластов приходится выделять характерные точки различных типов.

К числу основных типов характерных точек, выделяемых при расчленении каротажных диаграмм, могут быть отнесены точки:

а) уровенные; б) экстремальные (в том числе точки существенного экстремума — точки существенного максимума и точки существенного минимума); в) перегиба; г) связанные; д) связанные с моделью; е) узловые при аппроксимации каротажной кривой ступенчатой или ломаной кривой.

В табл. I дана сводка расчленения тех каротажных кривых, характерные точки которых должны выделяться в процессе машинной интерпретации промыслово-геофизических данных.

§ 3. Расчленение кривых по уровенным точкам

У р о в е н н ы е т о ч к и

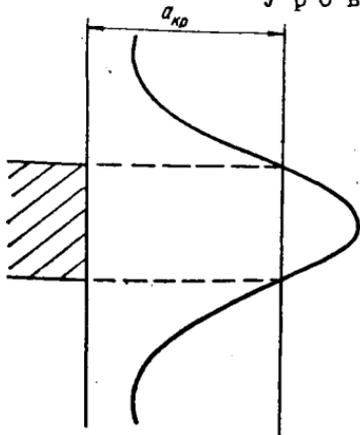


Рис. 6. Отбивка границ по уровенным точкам.

На каротажной диаграмме пласт легко выделить, если показания против него существенно отличаются (в ту или другую сторону) от показаний против вмещающих пород, т.е. когда показания против пласта носят аномальный характер. "Подсечь" такой пласт просто (рис. 6). Достаточно провести **уровенную** прямую — прямую, параллельную оси глубин, с ординатой $a_{кр}$, занимающей промежуточное значение между показаниями против вмещающих пород и против пласта. Ордината $a_{кр}$ называется **критическим значением**.

Использование характерных точек для определения
 * границ пласта по каротажным диаграммам *

Методы каротажа	Уровневые точки	Экстремальные точки	Точки перегиба
Градиент-зонд а) кривые типа А и Б ($L < h$)	Для предварительного выделения	Наиболее эффективно выделение по точкам существенного экстремума (основной способ)	При детальном анализе конфигурации кривой
б) кривые типа В ($L > h$)	По "правилу Железняк"	Для предварительного выделения	-
Потенциал-зонд	Для предварительного выделения	-	Универсальный метод; в качестве границ пласта принимаются точки, связанные с точками перегиба (отход от точек перегиба на половину длины зонда).
Боковой каротаж (БК)	Для предварительного выделения	-	Основной
Гамма-каротаж	1) По способу интенсивности 2) По способу 1/2 или 4/5 амплитуды 3) После трансформации кривой ГК в кривую процентного содержания радиоактивных элементов	В случае больших значений интервала осреднения ζ	Для однородных пластов
Нейтронный гамма-каротаж	После трансформации кривой НК (в зависимости пористости от глубины и т.п.)	В случае больших значений ζ	-

Методы каротажа	Уровенные точки	Экстремальные точки	Точки перегиба
Микрокаротаж	Основной способ	-	-
Кавернограмма	То же	-	-
Гамма - гамма-каротаж	Основной для мощных пластов	Для определения мощности угольных пластов	Основной способ для пластов не очень большой мощности
Индукционный	Для предварительного выделения	-	Основной способ
Магнитной восприимчивости	Основной способ	-	-
Акустический	Для предварительного выделения	-	Основной способ
ПС	1) Для предварительного выделения	Для предварительного выделения	Универсальный способ
	2) По способу половины амплитуды		
	3) Для выделения границ аномалии при определении ее площади		

* Величина Z - "интервал осреднения" (выраженное в метрах произведения $\gamma \cdot \xi$, где ν - скорость каротажа, ξ - постоянная времени интегрирующей ячейки), L - длина зонда, h - мощность пласта.

Уровенная прямая пересекает кривую в некоторых точках, называемых **у р о в е н н ы м и**. Абсциссы уровенных точек могут приниматься (нередко лишь в качестве первого приближения) за границы выделенного пласта.

Следует заметить, что уровенные точки могут быть двух видов, в зависимости от того, пересекает каротажная кривая уровенную прямую "на подъеме" или "на спаде".

П р о с т е й ш и й а л г о р и т м р а с ч л е н е н и я п о у р о в е н н ы м т о ч к а м

Рассмотрим алгоритм выделения уровенных точек. Опишем его словесно, выписывая в то же время соответствующие формулы. Данный алгоритм интересен и тем, что при его описании удобно прибегать к логическим операциям – логическому сложению (\vee) и логическому умножению (\wedge).

Исходной информацией служит массив, полученный в результате квантования каротажной кривой. Этот массив обозначим идентификатором a , длину массива (число значений в массиве) буквой n . Так что массив, соответствующий каротажной кривой в символике языка АЛГОЛ-60, может быть описан: „real array $a[1:n]$ ”. Шаг квантования – Δ (δ).

Чтобы выделить уровенную точку на подъеме каротажной кривой, нужно найти два таких соседних значения $a[i]$ и $a[i+1]$, которые удовлетворяли бы следующим требованиям:

1) значение $a[i]$ меньше критического значения akp или равно ему:

$$a[i] \leq akp;$$

2) значение $a[i+1]$ больше критического:

$$a[i+1] > akp.$$

Оба эти условия должны быть удовлетворены **о д н о в р е м е н н о**. Сложное условие, состоящее в том, что удовлетворяются два простых условия S_1 и S_2 одновременно, записывается с помощью операции логического умножения ("логического И"): $S_1 \wedge S_2$.

Таким образом, выделение уровенной точки на подъеме кривой связано с удовлетворением условия

$$a[i] \leq akp \wedge a[i+1] > akp. \quad (I)$$

Аналогично, уровенные точки на спадающей ветви кривой должны удовлетворять требованиям:

1) значение $a[i]$ больше критического или равно ему:

$$a[i] \geq akp,$$

2) значение $a[i+1]$ меньше критического:

$$a[i+1] < a_{кр}.$$

Указанные требования с помощью операции логического И (логического умножения) записываются в виде:

$$a[i] \geq a_{кр} \wedge a[i+1] < a_{кр}. \quad (2)$$

Продолжим дальше формулировку требования, которому должны удовлетворять уровенные точки. Мы записали два требования - для точек на воздымающейся ветви кривой и спадающей. Уровенная точка должна быть выделена, если она удовлетворяет хотя бы одному из этих двух условий. Сложное требование, состоящее в том, что должно удовлетворяться хотя бы одно из двух простых условий S_1 и S_2 (и л и одно, и л и другое) записывается с помощью операции логического сложения ("логического ИЛИ"): $S_1 \vee S_2$.

Следовательно, общее условие выделения уровенных точек должно быть записано в виде:

$$a[i] \leq a_{кр} \wedge a[i+1] > a_{кр} \vee a[i] \geq a_{кр} \wedge a[i+1] < a_{кр}. \quad (3)$$

Алгоритм поиска уровенных точек сводится к последовательному просмотру всех пар соседних значений и проверке, не соответствует ли данной паре значений уровенная точка. Если для i -го и $(i+1)$ -го значений условие (3) удовлетворяется, то порядковый номер i запоминается. По величине i нетрудно рассчитать глубину z_i :

$$z_i = z_1 + \Delta(i-1), \quad (4)$$

где z_i - глубина, соответствующая первому значению массива (т.е. верхняя граница оцифрованного интервала кривой), Δ - шаг квантования.

Чтобы уменьшить погрешность в выделении абсциссы уровенной точки, последнюю можно считать приуроченной к середине интервала квантования и вместо формулы (4) применять соотношение

$$z_i = z_1 + \Delta(i-0.5). \quad (4')$$

Практически различие между формулами (4) и (4') невелико и им зачастую пренебрегают.

В качестве выходной информации мы получаем массив выделенных глубин z и его фактическую длину m .

Описав алгоритм выделения уровенных точек словесно, перейдем к его описанию на алгоритмическом языке АЛГОЛ-60.

Оформим этот алгоритм в виде процедуры. Заголовок процедуры будет иметь вид:

"Процедура Расчл УТ ($\alpha, n, z1, delta, a_{кр}, z, m$)".

Параметры $\alpha, n, z1, delta, a_{кр}, z, m$ являются ф о р -

м а л ь н ы м и параметрами процедуры, причем массив a , его длина n , верхняя граница оцифрованного интервала кривой z_1 , шаг квантования $delta$ и критическое значение $акр$ являются входными параметрами, а массив z и его фактическая длина m — выходными. Параметры a , z являются массивами действительных чисел, $z_1, delta$ и $акр$ — действительными числами, n и m — целыми числами.

За заголовком процедуры следует т е л о процедуры — блок, т.е. группа операторов, заключенная в операторные скобки begin (начало) и end (конец) и начинающаяся с описания формальных параметров:

"начало действ массив a, z ; действ $z_1, delta$; цел n, m ;"

Или, применяя английскую версию символики языка АЛГОЛ-60,

"begin real array a, z ; real $z_1, delta$; integer n, m ".

В тексте алгоритма необходимо использовать еще две переменные i и j — порядковые номера элементов массивов a и z . Эти переменные также должны быть описаны

"цел i, j ;" („integer i, j ").

В начале алгоритма переменным i и j присваивается значение 1. (Это значит, что обработка начинается с первых элементов массивов a и z .) Действие записывается с помощью оператора присваивания:

" $i := j := 1$ ",

эквивалентного двум операторам присваивания:

" $i := 1; j := 1$ ".

Далее идет многократный просмотр элементов массива a . Этот просмотр алгоритмически записывается в виде ц и к л а. Цикл организуется так:

1. Сначала проверяется выполнение условия (3) при $i = 1$, т.е. для первой пары значений.

2. Если это условие (3) удовлетворено (на кривой выделяется уровенная точка), в ячейку $z[j]$ засылается абсцисса выделенной точки, а номер j очередного элемента увеличивается на единицу.

3. Значение i увеличивается на единицу.

4. Проверяется, вся ли кривая просмотрена ($i \leq n-1$). Если просмотр кривой не окончен, вычислительный процесс возвращается к пункту 2.

5. Если вся кривая уже просмотрена, программа выходит из цикла и осуществляется заключительное действие — определяется фактическое число выделенных границ m .

Таким образом, работа цикла сводится к многократному выполнению некоторого фрагмента программы. Однократное исполнение этого фрагмента носит название *и т е р а ц и и*. Наш алгоритм предусматривает последовательное выполнение $n-1$ итераций, каждый раз с новым значением параметра i .

Оператор, осуществляющий проверку условия (3) и определение глубины уровенной точки, на языке АЛГОЛ-60 записывается таким образом:

"А : если $a[i] \leq \text{акр} \wedge a[i+1] > \text{акр} \vee a[i] \geq \text{акр} \wedge [i+1] < \text{акр}$
то начало $z[j] := z1 + \text{delta} \times (i - 0,5);$
 $j := j + 1$ к о н е ц ",

или, применяя английскую символику:

" A : if $a[i] \leq \text{акр} \wedge a[i+1] > \text{акр} \vee a[i] \geq \text{акр} \wedge [i+1] < \text{акр}$
then begin $z[j] := z1 + \text{delta} \times (i - 0,5);$
 $j := j + 1$ end ".

В операторных скобках начало, конец (*begin, end*) заключены два оператора: первый вычисляет абсциссу уровенной точки и заносит ее в очередную ячейку массива z , второй подготавливает для записи следующую ячейку этого массива, увеличивая j на единицу. Операторные скобки обязательны в данном случае. Если бы они были опущены, то в зависимости от выполнения условия (3) исполнялся бы только первый оператор, второй же исполнялся независимо от того, истинно или нет логическое выражение 3.*

После проверки, имеется ли в данной точке кривой уровенная точка, т.е. после проверки условия (3), ЭВМ переходит к проверке, не просмотрена ли уже вся кривая. В нашем цикле должно быть $n-1$ итераций (в массиве, соответствующем каротажной кривой, $n-1$ пар смежных точек). Поэтому интересующая нас проверка сводится к проверке условия:

$$i \leq n-2. \quad (5)$$

Если условие (5) выполнено, то ЭВМ переходит к анализу следующей точки кривой, для чего значение i увеличивается на единицу ($i := i + 1$); управление же передается оператору, проверяющему наличие уровенной точки, т.е. оператору, помеченному буквой А.

*Если бы были опущены обе операторные скобки, то имела бы место содержательная (несинтаксическая) ошибка, которая не может быть выявлена формальным синтаксическим анализом текста. Если же опущена одна (безразлично какая) операторная скобка, то эта ошибка является синтаксической и может быть легко выявлена: число левых и правых скобок в тексте окажется неодинаковым.

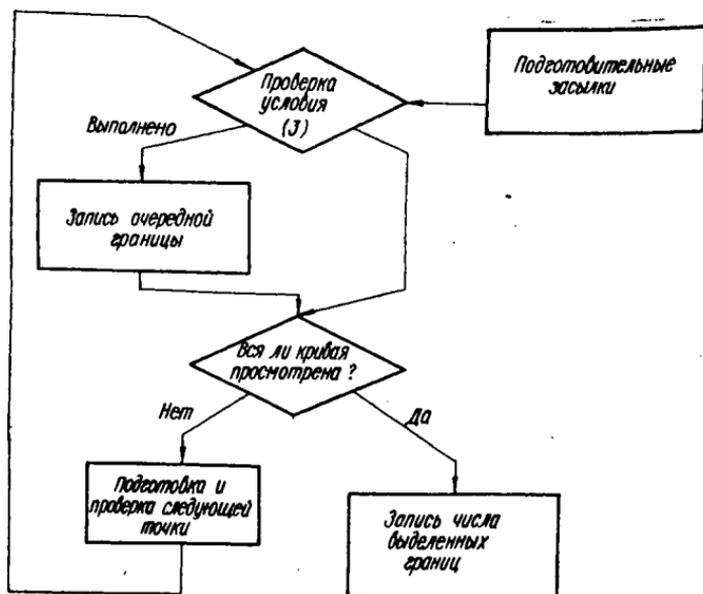


Рис.7. Блок-схема алгоритма I.

Таким образом, очередной оператор в нашем алгоритмическом тексте будет иметь вид:

"если $i \leq n-2$ то начало $i := i + 1$; перейти на А конец"; или в других обозначениях:

"if $i \leq n-2$ then begin $i := i + 1$; goto A end."

Наконец, последним действием определяется фактическая длина массива глубин:

" $m := j$ ".

В целом рассмотренный алгоритм записывается следующим образом:

А л г о р и т м I

Процедура Расчл УТ ($a, n, anp, z1, delta, z, m$);

начало действ массив a, z ; действ $z1, delta$;

цел n, m, i, j ;

$i := j := 1$;

А: если $a[i] \neq anp \vee a[i+1] > anp \vee a[i] > anp \vee a[i+1] < anp$

то начало $z[j] := z1 + delta \times (i - 0.5)$;

$j := j + 1$. "конец;

если $i \leq n-2$, то начало $i := i + 1$; перейти на А конец;

$m := j$ конец

или используя английскую символику:

```
procedure Расчл УТ ( $a, n, акр, z1, delta, z, m$ );  
begin real array  $a, z$ ; real  $z1, delta$ ; integer  $n, m, i, j$ ;  
                                   $i := j := 1$ ;  
 $A$ : if  $a[i] \leq акр \wedge a[i+1] > акр \vee a[i] \geq акр \wedge a[i+1] < акр$   
      then begin  $z[j] := z1 + delta \times (i - 0.5)$ ;  
                                   $j := j + 1$  end  
if  $i \leq n - 2$  then begin  $i := i + 1$ ; go to  $A$  end  
                                   $m := j$  end
```

Блок-схема данного алгоритма показана на рис.7.

Цикл на языке АЛГОЛ-60 удобнее записывать с помощью специального оператора - "оператора цикла".

Используя обозначения, принятые для записи операторов цикла, алгоритм I можно представить в следующем виде:

А л г о р и т м 2

```
Процедура Расчл УТ ( $a, n, акр, z1, delta, z, m$ );  
начало действ массив  $a, z$ ; действ  $z1, delta$ ; цел  $n, m, j$ ;  
для  $i := 1$  шагом 1 до  $n - 1$  выполнять  
если  $a[i] \leq акр \wedge a[i+1] > акр \vee a[i] \geq акр \wedge a[i+1] < акр$   
то начало  $z[j] := z1 + delta \times (i - 0.5)$ ;  
                                   $j := j + 1$  конец;  
                                   $m := j$  конец
```

или в международной символике:

```
procedure Расчл УТ ( $a, n, акр, z1, delta, z, m$ );  
begin real array  $a, z$ ; real  $z1, delta$ ; integer  $n, m, j$ ;  
for  $i := 1$  step 1 until  $n - 1$  do  
if  $a[i] \leq акр \wedge a[i+1] > акр \vee a[i] \geq акр \wedge a[i+1] < акр$   
      then begin  $z[j] := z1 + delta \times (i - 0.5)$ ;  
                                   $j := j + 1$  end;  
                                   $m := j$  end.
```

Мы описали алгоритм уровенных точек в его простейшей форме. Рассмотрим более сложные варианты.

Усложнение алгоритма расчленения уровенных точек может быть произведено различными путями. Во-первых, можно потребовать, чтобы при записи абсциссы уровенной точки указывался тип точки - расположена она на подъеме или на спаде кривой. Во-вторых, желательно освободить получаемое расчленение от незначительных пропластков, например, приняв, что если расстояние между двумя соседними выделенными границами меньше некоторого заранее заданного числа ϵ , то эти границы выбрасываются.

Рассмотрим алгоритм, учитывающий указанные пожелания.

Тип точки обозначим знаком абсциссы, присваивая знак минус, если урoвеньная точка находится на спадающей ветви кривой. При этом абсциссу будем выражать не действительным числом - глубиной, а целым числом - соответствующим значением i массива.

На языке АЛГОЛ рассматриваемый вариант алгоритма расчленения кривой по урoвеньным точкам может быть записан так.*

А л г о р и т м 3

Процедура Расчл УТ ($a, n, акр, eps, z, m$);

действ $акр$; действ массив a ; цел массив z ; цел n, eps, m ;

начало цел j, i ; булев u ;

$j := 0$;

$u :=$ если $a[1] < акр$ то истина иначе ложь;

для $i := 2$ шагом 1 до n выполнять

если $a[i] \geq акр \wedge u \vee a[i] < акр \wedge \neg u$

то начало если $j := 0$ то перейти на M

иначе если $i - abs(z[j]) < eps$ то

начало $z[j] := 0$;

$j := j - 1$;

$u := \neg u$ конец

иначе M : начало $j := j + 1$;

$z[j] := ix$ если u то 1 иначе - 1;

$u := \neg u$ конец конец

$m := j$ конец.

Объясним приведенный алгоритмический текст.

Отличительной особенностью этого алгоритма, по сравнению с алгоритмом 2, является то, что в нем в качестве внутренней переменной фигурирует логическая (булева) величина u . Булевы переменные очень часто используются для записи истинностных значений высказываний. В данном случае логическая переменная u использована для подобных целей. Она является истинностным значением высказывания: "Текущая точка кривой располагается ниже урoвеньной прямой". В начале алгоритма проверяется, истинно ли только что приведенное высказывание для первой точки каротажной кривой. Практически проверка истинности этого высказывания сводится к проверке правильности отношения: $a[1] < акр$. Если это отношение справедливо, т.е. если первая точка каротажной кривой находится ниже урoвеньной прямой, переменной u присваивается значение и с т и н а (true), в противном случае присваивается значение ложь (false).

* См. алгоритм 3 в [21].

В процессе исполнения алгоритма значение переменной u меняется. Изменение производится с помощью операции логического отрицания $\neg u$. Операция отрицания, как мы уже знаем, меняет значение u на противоположное, т. е., если u имело значение *истина*, то оно приобретает значение *ложь*, и наоборот. Как только ЭЦВМ, исполняя данный алгоритм, определяет, что каротажная кривая пересекла уровенную линию (это соответствует моменту выделения уровенной точки), значение u меняется на противоположное. Это осуществляется с помощью оператора

„ $u := \neg u$.”

Используя переменную u , условие (3) может быть записано в более компактном виде:

$$a[i] \geq \text{акрл} u \vee a[i] < \text{акрл} \neg u. \quad (3')$$

Согласно тексту алгоритма 3, в случае истинности выражения (3') проверяется, насколько близка абсцисса выделенной уровенной точки к последней выделенной границе. Если эти соседние уровенные точки расположены очень близко, т. е. если выполняется условие

$$i - z[j] \leq \varepsilon, \quad (6)$$

($z[j]$ - последняя выделенная граница, ε - заданная величина), то вновь найденная уровенная точка не фиксируется, последняя граница затирается, значение переменной u меняется на противоположное.

Поскольку тип выделяемых уровенных точек мы условились обозначать знаком их абсцисс (величина $z[j]$ может быть как положительной, так и отрицательной), то условие (6) должно быть записано в более точном виде:

$$i - \text{abs}(z[j]) \leq \varepsilon, \quad (7)$$

где $\text{abs}(x)$ - функция, выражающая абсолютное значение числа x .

"Стирание" предыдущей границы, сопровождаемое изменением значения переменной u на противоположное, осуществляется с помощью такой группы операторов:

„ $z[j] := 0; j := j - 1; u := \neg u$ ”.

Запись абсциссы уровенной точки производится оператором:

$z[j] := i$ если u то I иначе $-I$.

Параметр i в правой части оператора умножается на условное число если u то I иначе $-I$. Если каротажная кривая пересекает уровенную прямую *снизу* (u истинно), то значение условного сомножителя равно I и целое i записывается со знаком плюс. Если же кривая пересекает *сверху* (уровенная точка второго типа), сомножитель приобретает значение $-I$ и целое i заносится в массив границ со знаком минус.

Алгоритм 3 состоит из таких последовательных шагов: 1) очистка ячейки j и определение первого значения логической переменной u ; 2) просмотр каротажной кривой и выделение границ (осуществляется оператором цикла "для $i:=2, \dots, n$ "); 3) определение фактической длины массива выделенных границ z .

Основную часть алгоритма, как видим, занимает оператор цикла.

Разобрав детально особенности алгоритма 3, напишем его текст, применяя английскую версию символики.

А л г о р и т м 3 а

```

procedure Расчл УТ (  $a, n, акр, eps, z, m$  );
  real акр; real array a; integer array z; integer n, eps, m;
  begin integer i, j; Boolean u;
    j := 0;
  u := if a[1] < акр then true else false;
  for i := 2 step 1 until n do
    if a[i] > акр  $\wedge$  u  $\vee$  a[i] < акр  $\wedge$   $\neg$  u
    then begin if j := 0 then goto M
    else if i - abs (z[j])  $\leq$  eps then
      begin z[j] := 0;
        j := j - 1;
        u =  $\neg$  u end
    else M: begin j := j + 1;
      z[j] := ix if u then 1 else -1;
      u :=  $\neg$  u end end;      m := j end.

```

Знаки массива $z[j]$ представляют собой фактически самостоятельный булев массив. Присвоим этому массиву идентификатор ksi . Тогда алгоритм 3 можно записать в модифицированной форме:

А л г о р и т м 3'

```

procedure Расчл УТ (  $a, n, акр, eps, z, m, ksi$  );
  real акр; real array a; integer array z; integer n, eps, m;
  Boolean array ksi;
  begin integer i, j; Boolean u;
    j := 0;
  u := if a[1] < акр then true else false;
  for i := 2 step 1 until n do;
  if a[i] > акр  $\wedge$  u  $\vee$  a[i] < акр  $\wedge$   $\neg$  u;
  then if j := 0 then goto M;
    else if i - z[j]  $\leq$  eps then;
      begin z[j] := 0;
        j := j - 1;
        u :=  $\neg$  u end

```

```

else M: begin j:=j+1;
          z[j]:=z;
          psi[j]:=u
          u:=|u end end
          m:=j end.

```

У сложнение алгоритма расчленения по уровенным точкам

Описанный алгоритм позволит расчленить одну каротажную кривую по уровенным точкам. Однако для практики представляет интерес и более сложные случаи расчленения. Эти сложные случаи можно свести к одной схеме: одна или несколько каротажных кривых трансформируются в новую кривую, которая и расчленяется по уровенным точкам.

Можно указать два наиболее простых случая такой трансформации: получение "кривой приращений", например, в случае интерпретации диаграмм микрозондов, и дифференцирование кривой, удобное при выделении на кривых КС переходной зоны (зоны, переходной от верхней части продуктивного пласта, где нефтенасыщенность максимальна, к его водоносной части).

Как известно, при микрокаротаже производятся замеры двумя зонами - потенциал-микрозондом и градиент-микрозондом. Второй обладает меньшим радиусом исследования, чем первый, и замеренное с его помощью КС в большей степени зависит от удельного сопротивления глинистой корки (если такая имеется), в то время как на показания потенциал-микрозонда влияет пласт, удельное сопротивление которого значительно выше, чем глинистой корки. Глинистая корка образуется против проницаемых пластов: при фильтрации бурового раствора в пласт глинистая компонента оседает на стенке скважины. Вследствие этого показания обоих микрозондов против глин совпадают, а против проницаемых пластов значительно расходятся: показания потенциал-микрозонда $\rho_K^{ПМЗ}$ существенно превышают показания градиент-микрозонда $\rho_K^{ГМЗ}$.

Наличие такого "расхождения" на кривых микрокаротажа используется интерпретаторами при выделении проницаемых пластов.

Если мы построим "кривую расхождений", т.е. кривую разности $\Delta\rho(z) = \rho_K^{ПМЗ}(z) - \rho_K^{ГМЗ}(z)$, то, проведя на соответствующем уровне прямую, мы сможем по уровенным точкам выделить проницаемые пласты, характеризующиеся "положительным приращением" (превышением $\rho_K^{ПМЗ}$ над $\rho_K^{ГМЗ}$).

Алгоритм получения кривой приращения записывается в виде оператора цикла:

"для $i := 1$ шагом 1 до n выполнять
 $dR[i] := \text{ПМЗ}[i] - \text{ГМЗ}[i];$ "
 т.е. „for $i := 1$ step 1 until n do
 $dR[i] := \text{ПМЗ}[i] - \text{ГМЗ}[i];$ " (8)

После того, как массив приращений dR получен, для выделения проницаемых пластов достаточно применить подпрограмму Расчл УТ. Оператор обращения к этой процедуре будет иметь вид:

"Расчл УТ ($dR, n, \text{акр}, \text{eps}, z, m$)".

Необходимо подчеркнуть, что список обозначений (идентификаторов) в скобках после названия процедуры – это ф а к т и ч е с к и е параметры, в отличие от ф о р м а л ь н ы х параметров, перечисленных в заголовке процедуры:

Расчл УТ ($a, n, \text{акр}, \text{eps}, z, m$).

Таким образом, алгоритм выделения проницаемых прослоев по микрокаротажу содержит два оператора: оператор цикла (8) и оператор обращения к процедуре Расчл УТ. Первый осуществляет трансформацию кривых микрокаротажа в кривую приращений, второй производит расчленение по уровенным точкам.

Получение промежуточного массива dR сопряжено с резервированием дополнительной памяти, и чтобы сделать программу более экономичной, желательно избежать формирования промежуточных массивов. Обе части алгоритма связаны с перебором значений каротажных кривых – первый раз для вычисления приращений, второй раз для выделения уровенных точек. Программу можно сделать более экономичной, если обе задачи решать за один перебор: вычислять приращение, которое сразу же сравнивать с критическим значением.

Алгоритм расчленения кривых микрокаротажа по превышению показаний потенциал-зонда над показаниями градиент-зонда является не очень большим усложнением алгоритма 3 и может быть записан так:

А л г о р и т м 4

"procedure Расчл МЗ ($a1, a2, n, \text{акр}, \text{eps}, z, m$);
real акр; real array $a1, a2$; integer array z ; integer n, eps, m ;
begin integer i, j ; boolean u ; real dR ;
 $j := 0$;
 $u := \text{if } a1[j] - a2[j] < \text{акр} \text{ then true else false};$

```

for i:= 2 step 1 until n do
begin dR:=a1[i]-a2[i];
if dR > anp л и ∨ dR < anp л и
then begin if j:=0 then goto M
           else if i-abs(z[j]) ≤ eps
then begin z[j]:=0;
           j:=j-1;
           u:=1 u end
else M: begin j:=j+1;
z[j]:=ix if u then 1 else -1; u:=1 u end end end; m:=j end".

```

Отличия алгоритма 4 от алгоритма 3 таковы: во-первых, при определении значения булевой переменной проверяется справедливость неравенства

$$a1[i]-a2[i] \text{ как } p,$$

а не соотношения

$$a[i] < \text{анр}.$$

Во-вторых, в цикле для каждой интерации вычисляется текущее значение приращения dR , которое затем и участвует вместо величины $a[i]$ алгоритма 2.

Выделение пластов по приращению в принципе возможно и не только при интерпретации кривых микрокаротажа, но и в других случаях, когда важно выделить "дифференциальный" эффект. Это, конечно, в первую очередь относится к сопоставлению установок, обладающих разной глубиной исследования, например, кривых короткого и длинного градиент-зонда - показания первого определяются главным образом зоной проникновения, в то время как на показания второго существенно влияет неизменная часть пласта. Сопоставляя такие кривые, можно в благоприятных случаях отделить коллекторы от неколекторов. Могут быть и иные случаи выделения интересных участков по приращению, например, сопоставление кривых пористости, построенных по данным БКЗ и нейтронного гамма-каротажа (эта методика эффективна в случае известняков). Совпадение показаний, как правило, свидетельствует об интергранулярной пористости известняков, несовпадение о наличии кавернозной (трещинной) пористости.

Другим видом преобразования кривой перед ее расчленением по уровенным точкам является дифференцирование. Его целесообразно производить в тех случаях, когда нужно выделять участки к оси глубин не по величине показаний, а по величине наклона кривой. Такая необходимость возникает, например, при выделении переходной зоны,

характеризующейся пологим спадом кривой КС. Если построить кривую первой производной КС, то на этой кривой такие участки отмечаются невысокими, но четко выделяемыми широкими положительными отклонениями (рис.8).

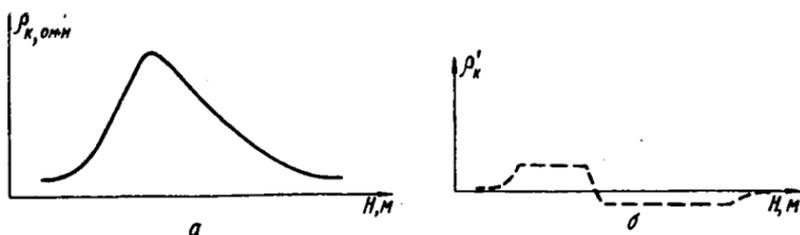


Рис.8. Кривая первой производной КС:

а - кривая КС, б - кривая первой производной КС.

Поскольку в ЭВМ вводится не каротажная кривая, а массив значений, дифференцирование сводится к вычислению первых разностей $a[i] - a[i+1]$.

Алгоритм расчленения кривой по уровненным точкам с предварительным ее дифференцированием почти совпадает с алгоритмом 3, отличаясь от последнего тем, что вместо разности $a1[i] - a2[i]$ (и, соответственно, $a1[1] - a2[1]$) записывается разность $a[i] - a[i+1]$, а также тем, что цикл выполняется не от 2 до n , а от 2 до $n-1$. Переписать алгоритм 4 в новом варианте мы предоставляем читателю.

Таким образом, мы рассмотрели три случая расчленения каротажных кривых по уровненным точкам: 1) простое, 2) по кривой приращений, 3) с предварительным дифференцированием.

Поставим перед собой такую задачу: составить один алгоритм, который позволял бы осуществить любой из этих видов расчленения. Такой алгоритм должен работать в трех режимах (соответственно трем видам расчленения), причем в каком режиме он должен работать в каждом конкретном случае, нужно определить до обращения к этому алгоритму. Режим работы алгоритма в данном случае можно задать либо целым числом, принимающим значения 1, 2, 3 (это число будем обозначать k), либо двумя булевыми величинами. Если режим задается булевыми величинами (обозначим их соответственно $u1$ и $u2$), то $u1$ будет являться истинностным значением высказывания: "Расчленение производится без предварительного преобразования каротажных кривых", а $u2$ - истинностным значением высказывания: "Расчленение произво-

дятся по кривой приращений". Если режим работы алгоритма задается целым числом k , то равенство $k=1$ эквивалентно u_1 , а равенство $k=2$ эквивалентно u_2 .

В многорежимном алгоритме расчленения изменится лишь первая половина алгоритма 4. Например, вместо оператора $da := a1[i] - a2[i] < \text{акр}$ необходимо записать условный оператор: $\text{if } u_1 \text{ then } da := a1[i]$
 $\text{else if } u_2 \text{ then } da := a1[i] - a2[i]$
 $\text{else } da := a1[i] - a1[i+1]$.

Вместо оператора $u := a1[1] - a2[1]$ необходимо включить следующую группу операторов:

```

nn := n;
if u1 then u := a1[1] < акр
else if u2 then u := a1[1] - a2[1] < акр
else begin u := a1[1] - a1[2] < акр;
nn := n-1 end.

```

Заголовок цикла должен быть записан в виде:

```
for i := 2 step 1 until nn do.
```

Таким образом, мы приходим к следующему алгоритму (MP в идентификаторе процедуры означает: "многорежимный"):

А л г о р и т м 5

```

procedure Расчл MP (u1, u2, a1, a2, n, акр, eps, z, m);
real акр; real array a1, a2; integer array z; integer n, eps, m;
Boolean u1, u2;
begin integer i, j, nn; Boolean u; real da;
j := 0;
nn := n;
if u1 then u := a1[1] < акр
else if u2 then u := a1[1] - a2[1] < акр
else begin u := a1[1] - a1[2] < акр;
nn := n-1 end
for i := 2 step 1 until nn do
begin if u1 then da := a1[i]
else if u2 then da := a1[i] - a2[i]
else da := a1[i] - a1[i+1];
if da > акр ∧ u ∨ da < акр ∧ ¬u
then begin if j=0 then goto M
else if i = abs(z[j]) ≤ eps
then begin z[j] := 0;
j := j-1; u := ¬u end

```

```

else M: begin j:=j+1;
z[j]:=ix Lf u then 1 else -1;
      u:=1 u end end end;
      m:=j end.

```

Если режим задается целым числом k , то вместо $u1$ в алгоритме 4 нужно записать $k = 1$, а вместо $u2 = k = 2$, и соответствующим образом скорректировать список формальных параметров процедуры Расчл МР и описаний к нему.

Примеры расчленения каротажных кривых по уровненным точкам

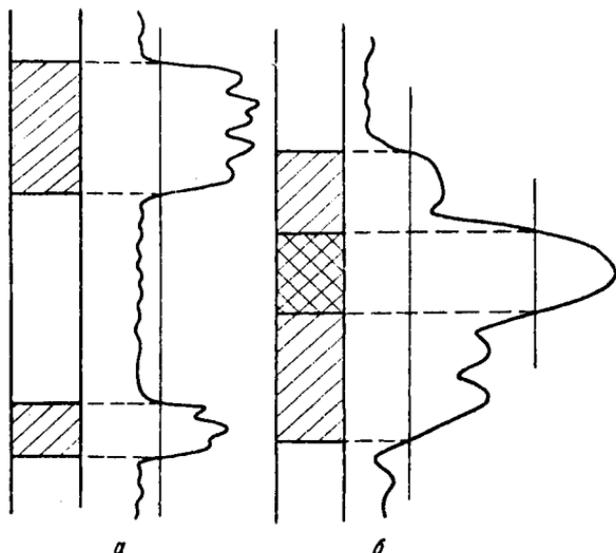


Рис.9. Примеры сингулярного расчленения каротажных кривых по уровненным точкам:

а - отбивка границ пластов по кавернограмме,
б - выделение в разрезе низкоомных непродуктивных и высокоомных продуктивных пластов по кривой КС.

Выделенные уровненные точки либо могут быть непосредственно приняты за границы пластов, либо использованы в качестве предварительных границ, требующих последующего уточнения. Для каротажных кривых, характеризующихся резкими отклонениями в области границ пластов, таких как кривые микрокаротажа, кавернограмма и т.п., в большинстве случаев по уровненным точкам границы отбиваются с достаточной

точностью. Для кривых с более плавными переходами в области границ пластов (кривые каротажа ПС, потенциал-зонда) уровенные точки выделяются в качестве первого приближения, а окончательные границы выделяются в результате соответствующего анализа каротажной кривой в окрестности выделенной уровенной точки.

На рис. 9, а, б приведены примеры сингулярного расчленения каротажных кривых по уровенным точкам.

§ 4. Выделение экстремальных точек и точек перегиба

Э к с т р е м а л ь н ы е т о ч к и

Во многих случаях границы пластов приурочены к экстремальным точкам — точкам максимума и точкам минимума (кривые КС градиент-зонда, в определенных случаях — кривые РК).

Точкой максимума называется такой i -тый элемент массива α , которому соответствует значение КС, большее чем соседним:

$$\alpha[i] > \alpha[i-1] \wedge \alpha[i] > \alpha[i+1]. \quad (9)$$

Аналогично точкой минимума — это элемент $\alpha[i]$ массива α , для которого удовлетворяется условие:

$$\alpha[i] < \alpha[i-1] \wedge \alpha[i] < \alpha[i+1]. \quad (10)$$

Во избежание ошибок, понятие экстремальных точек следует расширить. Не исключена возможность (хотя и вероятность этого во многих случаях невелика), что в области экстремума может встретиться не одно, а два (и даже более) равных между собой значения КС, т.е. максимуму будет соответствовать не "точка", а "область стационарных точек". В этом случае в качестве характерной точки следует выбрать одну из крайних стационарных, а именно точку, ограничивающую область стационарных точек со стороны обложенных электродов градиент-зонда. В дальнейшем, чтобы не усложнять изложение, мы эти точки также будем называть экстремальными (минимальными, максимальными).

На основании оказанного, условия (9) и (10) обобщим следующим образом. "Точка максимума" — это элемент $\alpha[i]$ массива α , для которого выполняется условие

$$\alpha[i] \geq \alpha[i-1] \wedge \alpha[i] \geq \alpha[i+1], \quad (II)$$

если градиент-зонд подошвенный, или условие

$$\alpha[i] > \alpha[i-1] \wedge \alpha[i] > \alpha[i+1], \quad (II')$$

если градиент-зонд кровельный.

Соответственно, "точка минимума" — это элемент $\alpha[i]$ массива, для которого справедливо условие

$$\alpha[i] \leq \alpha[i-1] \wedge \alpha[i] \leq \alpha[i+1] \quad (I2)$$

в случае подошвенного градиент-зонда, или же условие

$$a[i] < a[i-1] \wedge a[i] \leq a[i+1] \quad (I2')$$

при кровельном зонде.

Выделение очередной точки максимума может быть осуществлено с помощью оператора цикла:

```
„for i = q+1 step 1 until n-1 do
  if a[i] > a[i-1] & a[i] > a[i+1]
then begin qq := i, goto Запись границы end”
```

 (I3)

Указанный оператор просматривает каротажную кривую, начиная с абсциссы q (выраженной в целочисленной форме) и находит абсциссу ближайшей точки максимума, также выраженной в целочисленной форме.

Если заранее известно, что поиск ведется на монотонно возрастающем участке кривой, то этот алгоритм выделения точки максимума может быть записан в ином виде:

```
begin qq := q;
for i := q+1 step 1 until n do
  if a[i] > a[i-1] then qq := qq+1
  else goto Конец;
goto Запись границы;
Конец: end.
```

 (I3')

Аналогично группа операторов, осуществляющая поиск абсциссы очередной точки минимума, будет иметь вид:

```
begin qq := q;
for i := q+1 step 1 until n do
  if a[i] < a[i-1] then qq := qq+1
  else goto Конец;
goto Запись границы;
Конец: end.
```

 (I4)

Составные операторы (I3') и (I4) близки по структуре, что позволяет объединить их, оформив в виде одной процедуры, работающей в двух режимах, - режиме поиска точки максимума и точки минимума. Режим работы определяется значением булевой переменной α (α (α)). Такая процедура имеет вид:

А л г о р и т м 6

```
procedure .Сл.Экстр. (q, alpha, qq);
integer q, qq; Boolean alpha;
begin qq := q;
for i := q+1 step 1 until n do
  if if alpha then a[i] > a[i-1]
```

else $a[i] \leq a[i-1]$ then
 $qq := qq + 1$ else goto Конец;
goto Запись границы;
Конец: end.

Фактическая каротажная кривая, как правило, всегда осложнена наличием несущественных экстремальных точек, связанных с незначительными пропластками и мелкими неоднородностями пересеченных скважиною пластов.

В связи с этим экстремальные точки выделяются не все, а только такие, которые удовлетворяют ряду дополнительных условий (так называемые точки существенного экстремума). Алгоритмы выделения точек существенного экстремума более сложны. При выделении этих точек алгоритм 6 используется в качестве подпрограммы.

Точки перегиба

Ряд каротажных кривых (кривые каротажа самопроизвольной поляризации скважин, индукционного каротажа и др.) имеет симметричную форму против однородного пласта, залегающего в неоднородной вмещающей толще. Границы на таких кривых оказываются приуроченными к точкам перегиба, в которых вторая производная обращается в нуль.

В случае дискретного представления каротажных кривых, которое имеет место при обработке с помощью ЭВМ, выделение точек перегиба аналогично выделению экстремальных точек с той лишь разницей, что вместо условий (1) и (2) должны быть удовлетворены условия

$$a[i-1] - a[i] > a[i] - a[i+1] \wedge a[i] - a[i+1] < a[i+1] - a[i+2]. \quad (I5)$$

и

$$a[i-1] - a[i] < a[i] - a[i+1] \wedge a[i] - a[i+1] > a[i+1] - a[i+2]. \quad (I6)$$

На кривых точкам перегиба соответствуют точки максимальной (по абсолютной величине) крутизны (рис. 10).

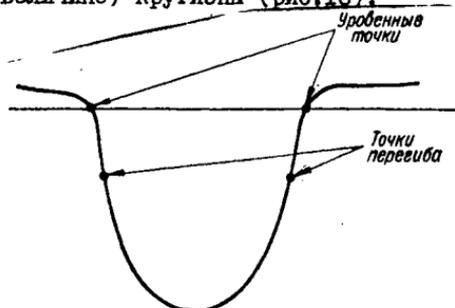


Рис. 10. Отбивка границ по точкам перегиба, ближайшим к уровненным точкам.

Возможно, что максимальной по абсолютной величине производной соответствует не одна точка, а целая область – участок, в пределах которого кривая совпадает с отрезком прямой, имеющей максимальный наклон. Границу в этом случае целесообразно отбивать по середине прямолинейного отрезка.

Чтобы не выделять все точки перегиба на каротажной диаграмме (в этом нет практической надобности), удобно идти по следующему пути: вначале выделяют уровенные точки и для каждой найденной уровенной точки находят ближайшую к ней точку перегиба. Поиск точек перегиба, ближайших к выделенным уровенным точкам, удобно осуществлять так:

1. Находят экстремальные точки (точку максимума и точку минимума), которые ограничивают на кривой монотонный участок, включающий точку перегиба.

2. Выделяют на этом участке точки перегиба (в общем случае таких точек может быть несколько).

3. С помощью заранее заданного критерия выбирают одну точку перегиба, которая расположена ближе к выделенной уровенной точке.*

Пусть $j[c]$ – c -ая выделенная уровенная точка, а $psi[c]$ – истинностное значение высказывания. "Данная уровенная точка находится на воздымающейся части кривой".**

Тогда следующие операторы позволяют выделить на каротажной кривой монотонный участок, содержащий s -ую уровенную точку:

```

v:=if psi[i] then 1 else -1;
i:=j[c]; i2:=j[c];
for l:=i-v while i>1^i<n^a[l]<a[i+v]
do i1:=i;
i:=j[c]; i2:=j[c];
for l:=i+v while i>1^i<n^a[i]>a[i-v]
do i2:=i;

```

(I7)

Группа операторов (I7) выделяет абсциссу точки минимума $i1$ и точки максимума $i2$.

* В качестве "прочих" условий могут быть заданы требования максимума абсолютной величины крутизны кривой в точке перегиба и др. В данной книге эти дополнительные условия мы не будем рассматривать.

** Таким образом, если $psi[c]=true$, то c -ая уровенная точка является точкой первого класса, а если $psi[c]=false$, – второго класса.

Поиск точек перегиба в пределах монотонного участка можно осуществить с помощью следующей группы операторов:

```

w:=t:-1; s:=0;
r0:=a[i1+v]-a[i1];
for i:=i1+v step v until i2 do
  begin r:=a[i+v]-a[i];
        if r>r0 then w:=t:-1
        else if r=r0 then t:=t+1 else
  if w=1 then begin s:=s+1; g[i]:=i-(t÷2)×v;
  w:=0 end r0:=r end
  
```

(I8)

Целочисленная переменная s играет роль булевой переменной: " $s = 0$ " означает, что справедливо высказывание: "Только что была зафиксирована точка перегиба".

Переменная t - счетчик равных значений первых разностей. В общем случае на кривой может встретиться участок, где кривая производной регистрируемого параметра параллельна оси глубин. В пределах этого участка все точки - "точки перегиба". В качестве абсциссы точки перегиба в этом случае целесообразно принять середину этого участка. В группе операторов (I8) предусмотрено фиксирование конца такого участка i и его "длины" t . Середина такого участка выражается следующим образом:

$$i - (t \div 2) \times v.$$

Абсциссы выделенных точек перегиба записываются в массиве $g[i: x]$. По окончании работы группы операторов (I8) число s означает число выделенных точек перегиба.

Выбор из s точек перегиба ближайшей к уровенной точке ($j[c]$) осуществляется операторами:

```

t:=10 10;
for i:=1 step 1 until s do
  begin d:=abs(j[c]-g[i]);
        if d<t then
  begin t:=d;
        ii=g[i] end.
  
```

(I9)

По окончании работы оператора цикла число ii представляет собой абсциссу точки перегиба, ближайшей к выделенной уровенной точке. Абсцисса ii выражена целым числом. Чтобы перейти к значению, выраженному в метрах, нужно воспользоваться формулой:

$$z_c = (ii-1) \Delta + H_0.$$

Последнее равенство, будучи записано в алгоритмической форме (оператора присваивания), имеет вид:

$$z[cj] = (ii-1) \times delta + ho. \quad (20)$$

Связанные точки

В некоторых случаях границу следует отбивать не по найденной характерной точке, а по точке, отстоящей от последней на некоторое расстояние. Такие точки будем называть связанными. По ним, например, удобно отбивать границы на кривых КС потенциал-зонда. Выделение связанной точки в этом случае производится по схеме (рис. II, б): 1) выделяются уровенные точки; 2) для каждой уровенной точки находится ближайшая к ней точка перегиба; 3) от выделенной точки перегиба отступают в сторону вмещающих пород на половину длины потенциал-зонда; полученная таким образом точка и есть искомая связанная точка.

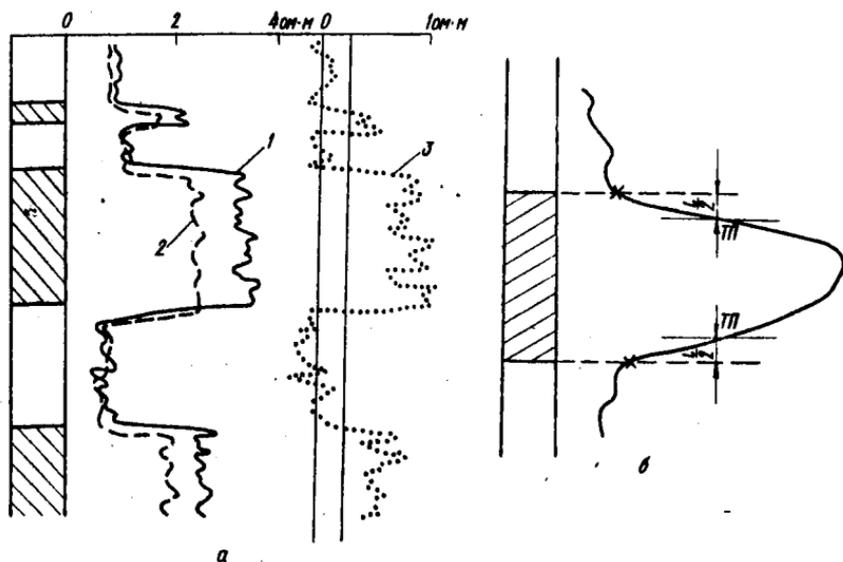


Рис. II. Рабочение каротажных кривых с помощью программы комплексного расчленения:

а - определение границ пластов по разности кривых микрокаротаж: 1 - кривая микро-потенциал-зонда, 2 - кривая микро-градиент-зонда, 3 - кривая приращений; б - отбивка границ пласта по связанным точкам.

Если ii , выраженная в виде индексного числа абсцисса выделенной точки перегиба, то выраженная в метрах абсцисса связанной точки, используемой для отбивки границ потенциал-зонда, может быть представлена в виде равенства:

$$z_{cb} = (ii - 1) \Delta + H_0 - \frac{L}{2} v, \quad (21)$$

где

$$v = \begin{cases} I, & \text{если урвенная точка первого класса;} \\ -I, & \text{если урвенная точка второго класса.} \end{cases}$$

В алгоритмической форме равенство (21) имеет вид

$$z[c] := (ii - 1) \times \text{delta} + h_0 - L \times v / 2. \quad (22)$$

Как нетрудно видеть, оператор (22) отличается от оператора (20) лишь наличием члена $-L \times v / 2$ в правой части.

§ 5. Расчленение кривых с помощью модели

Узловые точки

Точки, связанные с моделью

Одним из наиболее универсальных способов расчленения кривых является отбивка границ с помощью модели. Этот метод заключается в следующем.

Задается некоторая конфигурация кривой - модель, например, ступень. Далее выбирается некоторая метрика в пространстве фрагментов кривой.* Затем эта модель "прогоняется" через каротажную кривую - последовательно сопоставляется с участками кривой, соответствующими длине модели, и при таком сопоставлении вычисляется расстояние между данным фрагментом кривой и моделью. При этом находится фрагмент, для которого это расстояние минимально.

Границы найденного фрагмента или некоторые другие точки, легко выделяемые на модели, и являются точками, связанными с моделью.

Метрика может быть построена, например, на базе коэффициента корреляции $K(f, g)$, определяемом равенством

$$K(f, g) = \frac{\int_a^b f(x) g(x) dx}{\sqrt{\int_a^b [f(x)]^2 dx \int_a^b [g(x)]^2 dx}}, \quad (23)$$

где f и g - функции, одна из которых может служить моделью.

* Метрическим пространством называется совокупность некоторого множества x и расстояния ρ . Расстояние ("метрика") - однозначная не отрицательная действительная функция, определенная для любой пары (x, y) , $x \in x$, $y \in x$ и удовлетворяющая следующим условиям (аксиомам):

1) $\rho(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$; 2) $\rho(x, y) = \rho(y, x)$ - аксиома симметрии; 3) $\rho(x, y) + \rho(y, z) \geq \rho(x, z)$ - аксиома треугольника.

Величины

$$\|f\| = \sqrt{\int_a^b [f(x)]^2 dx}$$

и

$$\|g\| = \sqrt{\int_a^b [g(x)]^2 dx}$$

называются нормами функций f и g .

Выражение (23) можно переписать в виде:

$$K(f, g) = \frac{\int_a^b f(x)g(x) dx}{\|f\| \cdot \|g\|}. \quad (24)$$

Следует заметить, что иногда коэффициент корреляции вычисляется по формуле, несколько отличающейся от (23).

В случае, когда кривые "проквантованы" - представлены в виде последовательности чисел (векторов) - равенство (23) принимает вид:

$$K(f, g) = \frac{\sum_{i=1}^n f_i g_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n g_i^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i g_i}{\|f\| \|g\|},$$

где $\|f\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^2}$ и $\|g\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n g_i^2}$ - нормы векторов f и g .

Коэффициент корреляции не является метрикой (не удовлетворяется первая аксиома и требование неотрицательности). Однако можно предложить некоторую монотонную функцию от K , удовлетворяющую всем требованиям метрики (расстояния), например, величину, выражающуюся формулой

$$\alpha(f, g) = \arccos(K(f, g)). \quad (25)$$

$K = \cos \alpha$. Величина α имеет наглядный геометрический смысл: это угол между векторами f и g (или соответствующая углу дуга большого круга). Нетрудно убедиться, что $\alpha(f, g) = 0$ тогда и только тогда, когда $\frac{f}{\|f\|} = \frac{g}{\|g\|}$, а также, что удовлетворяется аксиома треугольника*

$$\alpha(f, h) \leq \alpha(f, g) + \alpha(g, h). \quad (26)$$

В ряде случаев для расчленения эффективны и другие метрики, не связанные с коэффициентом корреляции, например, среднеквадратичная:

$$R(f, g) = \left(\int_a^b [f(t) - g(t)]^2 dt \right)^{1/2} \quad (27)$$

или же метрика, определяемая равенством

$$R(f, g) = \sup_{a \leq t \leq b} |f(t) - g(t)|. \quad (28)$$

Указанные метрики удобны для выделения "площадок" - участков кривой, в пределах которых последняя достаточно мало отклоняется от прямой, параллельной оси глубин (см. алгоритм 2 в работе [21]).

* Неравенство (26) следует из сферической теоремы косинусов.

Таким образом, в данном случае моделью является прямая, параллельная оси глубин, ординаты которой (среднее значение ординат кривой) находятся в процессе обработки каротажной диаграммы. В результате выделения площадок каротажная кривая полностью или частично аппроксимируется ступенчатой зависимостью.

Статистические методы расчленения кривых

Вместо подбора фрагмента диаграммы к модели можно использовать и обратную процедуру – подбор модели (аппроксимирующей зависимости) к участку каротажной диаграммы. Так, в США предложен метод (В.Тестерман) подбора ступенчатой зависимости на основе метрики

$$R = \frac{B - W}{B},$$

$$B = \frac{1}{L-1} \left[\sum_{i=1}^L m_i (\bar{K}_i - \bar{K}_{**})^2 \right],$$

$$W = \frac{1}{N-L} \left[\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{m_i} (K_{ij} - \bar{K}_i)^2 \right],$$
(29)

где B – вариация между зонами ("зона" – участок, аппроксимируемый одной ступенькой); w – вариация в зоне; i – индекс суммирования для числа зон; j – индекс суммирования для числа данных в зоне; L – число зон; m_i – число данных в i -ой зоне; \bar{K}_i – среднее значение регистрируемого параметра в i -ой зоне; \bar{K}_{**} – наибольшее значение регистрируемого параметра; N – общее число данных; K_{ij} – значения регистрируемой величины.

Эта метрика вполне оправдывает себя, когда число данных сравнительно невелико (она была предложена для обработки керновых данных – аппроксимации зависимости проницаемости по керну от глубины). Для расчленения каротажных диаграмм метрика мало эффективна, так как требует большой затраты машинного времени. На рис.12,а приведен пример машинного расчленения каротажной диаграммы на основе составленного автором алгоритма, реализующего метрику (29). Границы пластов приурочены к скачкам ступенчатой кривой. Как видим, алгоритм Тестермана использует статистические характеристики расчленяемой диаграммы.

Теоретически более обоснован способ расчленения на основе статистического анализа, предложенный Д.А.Родионовым. По Родионову, последовательность значений (в одной точке может быть измерено несколько величин или описано несколько признаков) считается принадлежащей к одной статистически однородной совокупности, если гипотеза о том, что замеры (признаки) для всей последовательности то-

чек соответствуют одному и тому же закону распределения - в общем случае многомерному - не отвергается (при заданном уровне надежности).

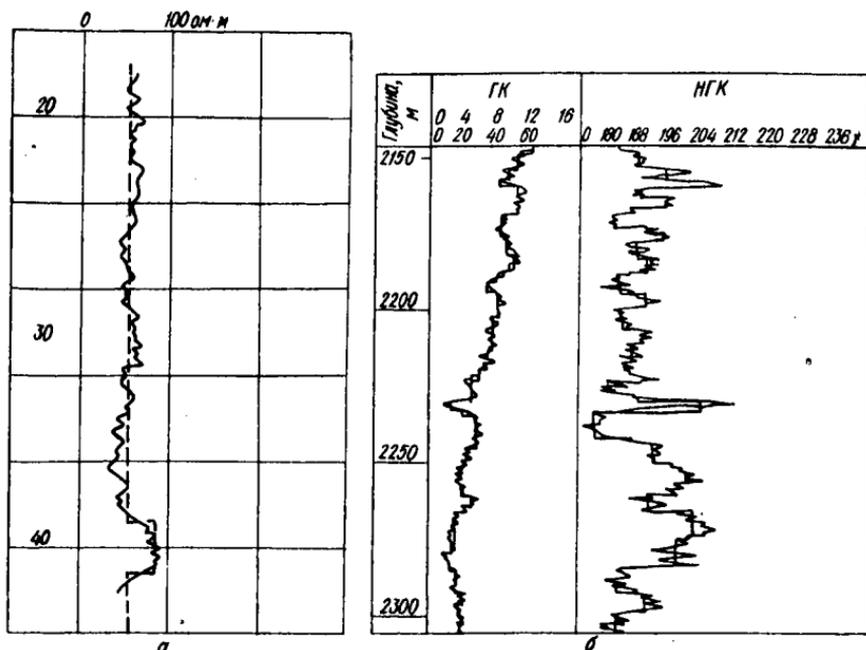


Рис.12. Расчленение каротажных диаграмм на основе статистических алгоритмов: по критериям В.Тестермана (а) и Д.А.Родионова (б).

Теория расчленения каротажных диаграмм на основе критерия Родионова, а также реализующий это расчленение алгоритм приведены в [7].

На рис.12,б приведен пример расчленения диаграммы НГК на основе статического метода Родионова с целью "снятия" случайной (флуктуационной) компоненты.

Узловые точки

Переход от каротажных диаграмм к ступенчатой кривой, наиболее близкой к ней в том или ином смысле, является примером аппроксимации диаграммы некоторой упрощенной кривой. Помимо ступенчатой кривой в качестве аппроксимирующей могут быть взяты и другие ее ви-

ды, в частности, ломаная. Точки, в которых характер аппроксимирующей кривой резко меняется, — точки "скачка" ступенчатой кривой и излома ломаной — будем называть узловыми точками. Использование узловых точек в качестве характерных в последнее время приобретает особый интерес в связи с возможностью осуществлять соответствующую аппроксимацию фактических каротажных кривых в процессе непрерывно-дискретного преобразования непосредственно на скважине. Это позволяет существенно уменьшить объем информации, передаваемый со скважины в информационно-вычислительный центр.

Остановимся несколько подробнее на ступенчатой кривой.

В то время, как при обычной записи каротажная диаграмма вводится в ЭВМ в дискретной форме в виде массива $a[1:n]$, ступенчатая кривая представляется двумя массивами: массивом значений $a[1:n]$ и массивом абсцисс узловых точек $z[1:n+1]$.

Алгоритм расчленения ступенчатой кривой по уровенным точкам может быть записан в таком виде:

А л г о р и т м 8

procedure Расчл СК ($a, z, акр, n1, z1, m$);
real array $a, z, z1$; integer $n1, m$; real акр;
begin integer array $zz[1:100]$; Boolean array $ksi[1:100]$; integer i ;

Расчл УТ ($a, n1, акр, 0, zz, m, ksi$);
 $z1[0] := z[1]$;
 $z1[m+1] := z[n1]$;
for $i := 1$ step 1 until m do
 $z1[i] := z[zz[i]]$ end.

Алгоритм 8 работает следующим образом.

1. С помощью подпрограммы Расчл УТ находится положение уровенных точек на ступенчатой кривой. Оно задается в виде номеров тех элементов массива a , к которым приурочена уровенная точка. Обращение к подпрограмме Расчл УТ записывается в виде оператора обращения:

"Расчл УТ ($a, n1, акр, 0, zz, m, ksi$);"

2. Из массива z границ ступеней выбираются границы, к которым приурочены уровенные точки. Это осуществляется с помощью операторов:

$z1[0] := z[1]$;
 $z1[m+1] := z[n1]$;
for $i := 1$ step 1 until m do
 $z1[i] := z[zz[i]]$.

Алгоритмы 8 и 3 нетрудно объединить в один, выписывая вместо оператора обращения к процедуре Расчл УТ все операторы, которые составляют тело этой процедуры. Объединяя эти алгоритмы, можно составить одну процедуру, которая будет осуществлять выделение уровней точек как в случае обычной дискретной записи каротажной диаграммы, так и в случае "сжатой" ее записи в виде ступенчатой кривой.

§ 6. Программа комплексного расчленения каротажных кривых

На основе изложенных в предыдущем параграфе алгоритмов может быть составлена программа выделения характерных точек, применимая для расчленения широкого комплекса каротажных кривых. Эта программа была названа комплексной программой расчленения. В основу ее положено выделение характерных точек: а) уровней (по каротажной кривой); б) уровней (по разности двух кривых, т.е. по кривой приращений); в) уровней (по предварительно продифференцированной кривой); г) точек перегиба, ближайших к выделенной уровневой точке; д) связанных точек.

Возможность выделения такого многообразия характерных точек позволяет производить расчленение каротажных диаграмм различными методами геофизических исследований скважин (каротаж ПС, микрокаротаж, каверномер, потенциал-зонд, радиоактивный каротаж и т.д.).

Комплексная программа расчленения выполняет следующую последовательность действий:

1. Производится вычисление кривой приращений, если это предусматривается режимом работы (если $\rho = 1$).

2. Производится вычисление первых разностей, если это предусматривается режимом работы программы (если $\rho = 2$);

3. Находятся, если это предусмотрено (если $fl1 = \underline{true}$), экстремальные значения max и min и вычисляется критическое значение по формуле

$$akp = min + kn \times (max - min). \quad (30)$$

Коэффициент kn считается заданным.

Если $kn = \frac{1}{2}$, то

$$akp = min + \frac{max - min}{2}.$$

4. Находятся уровневые точки (аналогично тому, как это описано в алгоритме 3').

5. Если программа работает в режиме расчленения ступенчатой кривой ($fl2 = \underline{true}$), находятся абсциссы узловых точек, к которым приурочены уровневые точки (см. алгоритм 8), после чего в данном режиме программа заканчивает работу.

Т а б л и ц а 2

Режимы работы программы комплексного расчленения

Номер режима	ρ	$fi1$	$fi2$	$fi3$	L	Исполняемая работа
I	I	<u>false</u>	<u>false</u>	<u>true</u>	$L = 0$	Расчленение по кривой приращений с заданной величиной Δxp
2	I	<u>true</u>	<u>false</u>	<u>true</u>	$L = 0$	Расчленение по кривой приращений с вычислением Δxp
3	2	<u>false</u>	<u>false</u>	<u>true</u>	$L = 0$	Расчленение по дифференцируемой кривой с заданной величиной Δxp
4	3	<u>false</u>	<u>false</u>	<u>true</u>	$L = 0$	Расчленение кривой по уровенным точкам с заданной величиной Δxp
5	3	<u>true</u>	<u>false</u>	<u>true</u>	$L = 0$	То же
6	3	<u>false</u>	<u>true</u>	-	-	Расчленение ступенчатой кривой с заданной величиной Δxp
7	3	<u>true</u>	<u>true</u>	-	-	Расчленение ступенчатой кривой с вычислением Δxp
8	3	<u>false</u>	<u>false</u>	<u>false</u>	$L = 0$	Расчленение по точкам перегиба при заданном Δxp
9	3	<u>true</u>	<u>false</u>	<u>false</u>	$L = 0$	Расчленение по точкам перегиба с вычислением Δxp
10	3	<u>false</u>	<u>false</u>	<u>false</u>	$L > 0$	Расчленение по связанным точкам при заданном Δxp
II	3	<u>true</u>	<u>false</u>	<u>false</u>	$L > 0$	Расчленение по связанным точкам с вычислением Δxp

6. Если расчленяется неступенчатая кривая ($fi2 = false$) и предусматривается производить расчленение по уровненным точкам ($fi3 = true$), то осуществляется переход от индексного представления абсцисс к их значениям в метрах.

7. Если предусмотрен поиск точек перегиба ($fi3 = false$), то осуществляется выделение монотонного участка кривой, содержащего уровенную точку (см. группу операторов (I7), описанную в § 4), затем осуществляется поиск точек перегиба в пределах этого участка (см. группу операторов (I8), там же) и, наконец, выбирается точка перегиба, ближайшая к выделенной уровенной точке (см. группу операторов (I9)). Вычисление границ производится по формуле (2I). При этом, полагая $L = 0$, получают границы пластов по точкам перегиба, а если L равно длине потенциал-зонда, то получают связанные точки для отбивки границ по кривой КС потенциал-зонда.

Сводка режимов работы программы дана в табл.2.

В результате работы программы комплексного расчленения может быть получена такая выходная информация:

а) массив границ j в индексной форме; б) массив границ z в метрах; в) булев массив kzi типов уровенных точек; г) фактическая длина выходных массивов k .

Массив границ j в индексной форме удобно использовать для последующих этапов машинной обработки (получение сводного расчленения, укрупнение расчленений). Массив z границ, выраженных в метрах, необходим для формирования выходных таблиц — при выдаче результатов интерпретации для каждого из выделенных пластов обязательно указывается его глубина залегания. Кроме того, границы (альтитуды кровли и подошвы) пласта, выраженные в метрах, необходимы для вычисления его мощности.

Массив kzi типов уровенных точек, как будет показано в следующей главе, может быть использован на последующих этапах машинной обработки каротажных кривых (например, при отсчете характерных значений).

Длина выходного массива k важна для правильной организации работы циклов в последующих программах обработки. На рис.9,10,12 приведены примеры сингулярного расчленения каротажных кривых с помощью программы комплексного расчленения.

Глава III. РАСЧЛЕНЕНИЕ КРИВЫХ КАРТАЖА СОПРОТИВЛЕНИЙ, ОТЧЕТ ХАРАКТЕРНЫХ ЗНАЧЕНИЙ.

Автоматическое расчленение кривых КС градиент-зондами является весьма трудной задачей. Эта трудность обусловлена сложностью конфигураций получаемых в скважине кривых. Кривые КС приобретают качественно иную форму в зависимости от многих причин – являются ли пласты или вмещающие породы однородными или неоднородными, изотропными или анизотропными, имеет ли место проникновение бурового раствора в пласт, каково соотношение между значениями удельного сопротивления различных областей пространства, попадающих в область исследования зонда (зона проникновения, неизменная часть пласта, покрывающая и подстилающая толщи и т.д.), каково соотношение между исследуемым пластом и мощностью пласта – и от многих других факторов. Прежде чем перейти к анализу алгоритмов расчленения кривых КС и отчета характерных значений, рассмотрим сводку конфигураций кривых КС.

§ I. Сводка конфигураций кривых КС

Однородный изотропный пласт, залегающий в однородной изотропной вмещающей толще
Градиент-зонд

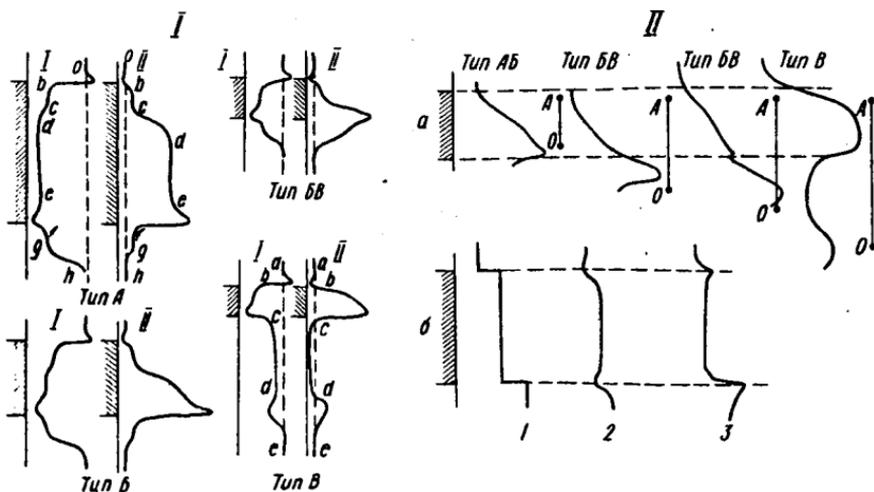


Рис.13. Формы кривых кажущегося удельного сопротивления (I-II).

Форма кривой КС (см. рис. 13, I) существенно зависит от соотношения между длиной зонда L и мощностью пласта h . В соответствии с этим мы будем различать три типа кривых: тип А ($L \ll h$), тип Б ($L < h$) и тип В ($L > h$). В ряде случаев имеет смысл выделять промежуточный тип БВ, когда длина зонда больше мощности пласта, но не на много. Если удельное сопротивление пласта больше, чем вмещающих пород $\rho_n > \rho_{вм}$ (пласт высокого сопротивления), то кривая типа А для подошвенного (кровельного) градиент-зонда состоит из таких участков: ab - кровельный (подошвенный) минимум; bc - верхняя (нижняя) краевая площадка, cd - подъем, de - центральная площадка, ef - подошвенный (кровельный) максимум, fg - нижняя (верхняя) краевая площадка, gh - спад.

Если $\rho_n < \rho_{вм}$ (пласт низкого сопротивления), кривая КС типа А состоит из таких участков: ab - кровельный (подошвенный) максимум; bc - верхняя (нижняя) краевая площадка, cd - спад, de - центральная площадка, ef - подошвенный минимум, fg - нижняя (верхняя) краевая площадка, gh - подъем.

Кривая КС типа Б по форме близка к кривой типа А, отличаясь от последней отсутствием "центральной площадки".

Кривая КС типа В состоит из таких участков.

Пласт высокого сопротивления ($\rho_n > \rho_{вм}$): ab - кровельный (подошвенный) минимум, bc - основной максимум, cd - площадка (экранная депрессия), de - экранный максимум.

Пласт низкого сопротивления ($\rho_n < \rho_{вм}$): ab - кровельный (подошвенный) минимум, bc - основной максимум, cd - площадка, de - экранный минимум.

На кривой КС типа БВ, соответствующей случаю однородного изотропного пласта, залегающего в однородной вмещающей толще, "площадки" нет и оба максимума (основной и экранный) сливаются в одну аномалию.

В случае кривой типа А и Б границам пласта соответствуют экстремальные точки: подошва отбивается по точке, соответствующей максимальному значению КС, а кровля - по точке, соответствующей минимуму на кривой КС (это справедливо, если градиент-зонд подошвенный; в случае кровельного зонда - картина обратная). Более сложна связь между положением границ пласта и его мощностью в случае кривой Б.

Известно так называемое правило Железняк [15], согласно которому мощность пласта равна ширине "пики" на кривой КС на уровне,

соответствующем $2/3$ величины аномалии. Если мы найдем на кривой КС точки ее пересечения с прямой, параллельной оси глубин и имевшей ординату, равную $2/3$ ($\rho_K^{\text{макс}} - \rho_K^{\text{вм}}$), то разность абсцисс этих точек будет равна мощности пласта. Этот прием - проведение на каротажной диаграмме прямой, параллельной оси абсцисс и выделение точек пересечения этой прямой с каротажной кривой для определения границ пласта и его мощности - широко используется на практике (иногда в неявном виде). В главе II такая прямая была названа уровневной прямой (линией уровня), а выделяемые с ее помощью точки - уровенными.

Покрывающая и подстилающая толщи имеют различное удельное сопротивление
 Все среды изотропны

В большинстве случаев различие в удельном сопротивлении качественно не сказывается на форме кривой КС. При $\rho_{св} < \rho_{уд}$ * на кривой типа В ($L > h$) экранный максимум выражен менее рельефно, при $\rho_{св} > \rho_{уд}$ - четко. Своеобразная форма кривой КС наблюдается при $\rho_{св} > \rho_{уд}$ для кривых, соответствующих типу БВ (длина зонда не на много превышает мощность пласта).

В этом случае (см. рис. I3, П) основной и экранный максимум кривой КС сливаются, образуя общую пику, причем точка максимума смещается от границы пласта в толщу, расположенную со стороны ближних электродов. При увеличении длины зонда против границы пласта намечается максимум (меньший по величине, чем экранный), затем при дальнейшем увеличении L оба максимума расходятся.

Также следует отметить случай кривой типа А ($L \approx h$), когда имеет место ступенчатое падение удельного сопротивления в том или ином направлении ($\rho_{св} > \rho_n > \rho_{уд}, \rho_{св} < \rho_n < \rho_{уд}$). В этом случае образуются (правда, не всегда четко выраженные) дополнительные экстремумы, которые при обычной схеме расчленения разреза по экстремальным точкам могут привести к выделению несуществующих пластов (см. рис. I3, Пб).

* $\rho_{св}$ и $\rho_{уд}$ - значения удельного сопротивления толщи, соответственно расположенной со стороны ближних и удаленного электродов градиент-зонда. Использовать обозначения $\rho_{св}$ и $\rho_{уд}$ удобнее, чем $\rho_{покр}$ и $\rho_{под}$, (удельные сопротивления покрывающей и подстилающей толщ), т.к. отпадает необходимость в указании, каким градиент-зондом (кровельным или подошвенным) производится замер.

Пласт с проникновением

Все среды изотропные

При наличии проникновения фильтрата бурового раствора в пласт (или при образовании промежуточной зоны – зоны расщепления, наложенной трещиноватости) форма кривой КС остается качественно аналогичной за исключением случаев, когда величина удельного сопротивления вмещающих пород $\rho_{\text{вм}}$ занимает промежуточное значение между значениями удельного сопротивления зоны проникновения (ρ_{Δ}) и неизменной части пласта (ρ_n), т.е. когда $\rho_n > \rho_{\text{вм}} > \rho_{\Delta}$ или $\rho_n < \rho_{\text{вм}} < \rho_{\Delta}$. В этом случае при длине зонда, меньшей или большей диаметра зоны проникновения, кривая КС качественно близка по форме к кривой для однородного пласта, характеризующаяся положительным (отрицательным) отклонением. При длине зонда, близкой к диаметру зоны проникновения, форма кривой КС становится весьма своеобразной, приобретая одновременно черты положительного и отрицательного отклонения (см. рис. I4, III).

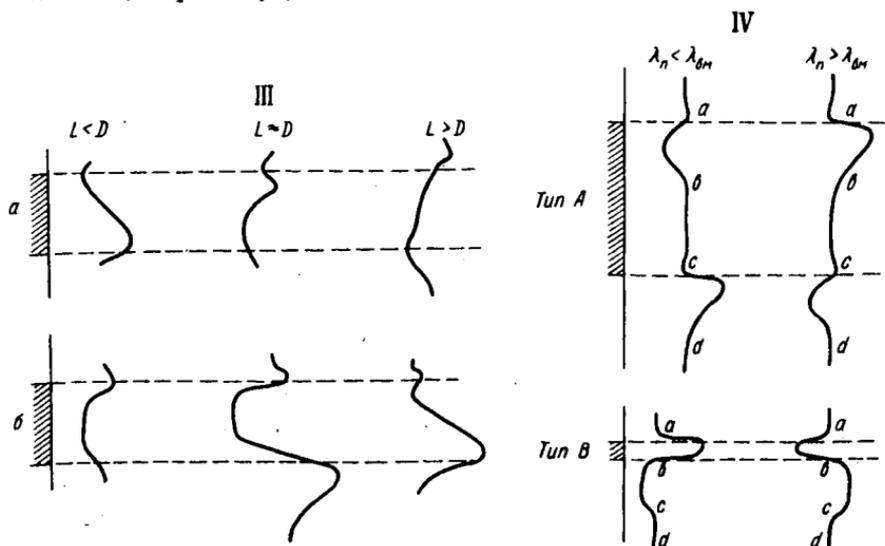


Рис. I4. Формы кривых кажущегося удельного сопротивления (III–IV).

Анизотропные пласты

Форма кривых КС в случае, когда анизотропия горных пород существенна, отличается весьма специфичными особенностями (см. рис.14,1У)*.

Кривые типа А, соответствующие случаю $h \gg L$, против анизотропного пласта распадаются на участки: ab - краевой ("экранный") горб, bc - центральная площадка, cd - краевой прогиб ("экранная яма").

Если пласт изотропен, но вмещающая толща анизотропна, то на кривой КС наблюдаются те же элементы, но в обратном порядке.

Как видим, в случае анизотропных пород на кривых КС вместо краевых площадок, имеющих место в случае изотропных пластов, наблюдаются экранные "горбы" и ямы.

На кривых типа В анизотропному пласти, залегающему в однородной вмещающей толще, соответствует максимум ab , за которым следует площадка bc . За площадкой, в том месте, где в случае изотропных пластов наблюдается экранный максимум (минимум), имеет место монотонный подъем (cd). Площадка и подъем образуют "экранную яму". Если же пласт изотропен и залегает в анизотропной вмещающей толще, то кривая КС типа В состоит из следующих участков: ab - минимум против пласта, bc - площадка, cd - спад.

Площадка и спад вместе образуют "экранный горб".

Пачка пластов

В случае пачки пластов (рис.15,У) можно различить раздельную форму - когда длина зонда соизмерима с мощностью пропластков пачки, и объединенную форму - длина зонда приближается к мощности всей пачки. Объединенная форма в свою очередь может быть подразделена на слитную (подчиненную, по терминологии С.Г.Комарова) и экранированную.

Слитная характеризуется тем, что форма кривой, если отвлечься от "иззубренности", связанной с неоднородностью, отвечает форме КС для однородного изотропного пласта. Пропластки повышенного сопротивления в пачке близки по мощности и сопротивлению, так что максимуму в подошве пласта (при подошвенном градиент-зонде) соответствует наибольшее значение КС. Слитная форма будет, когда значения удельного сопротивления пропластков, составляющих пачку, не сильно отличаются друг от друга.

* Форма кривых КС приведена для случая, когда пласт и вмещающая среда близки по удельному сопротивлению, так что наблюдаемые элементы на кривых обусловлены именно влиянием анизотропии.

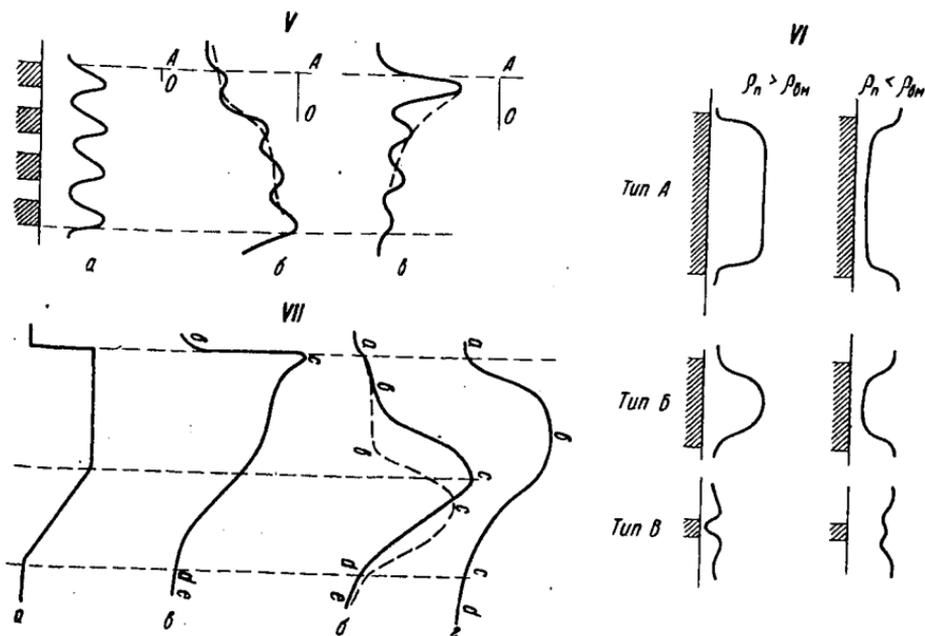


Рис.15. Формы кривых кажущегося удельного сопротивления (У-УП).

Экранированная форма кривой КС соответствует кривой для анизотропного пласта. Против кровли пласта (при подошвенном зонде) при экранированной форме наблюдается максимум более высокий, чем следующие за ним. Экранированная форма соответствует случаю, когда составляющие пачку пропластки существенно отличаются друг от друга.

П о т е н ц и а л - з о н д

Кривые КС против однородного изотропного пласта, снятые потенциал-зондом, если длина зонда существенно меньше мощности пласта (кривая типа А), состоят из таких элементов: краевой площадки, подъема (спада), центральной площадки, спада (подъема), краевой площадки. В случае кривой типа Б центральная площадка пропадает. При $L > h$ кривая приобретает специфическую конфигурацию: против средней части пласта (О) наблюдается максимум (минимум), окаймленный двумя минимумами (максимумами) (см. рис.15, VI). Границам пласта соответствуют середины краевых площадок.

Поскольку в практике каротажа применяют, как правило, потенциал-зонды малой длины, краевые площадки на фактических кривых КС в большинстве случаев не выражены. Концу верхней и началу нижней краевых площадок соответствует наибольшая крутизна кривой, в связи с чем границу пласта можно найти, выделив на кривой точку перегиба и отступив от нее в сторону от середины пласта на расстояние, равное половине длины зонда.

Особенностью кривой потенциал-зонда против однородного пласта, отличающей ее от кривых градиент-зонда, является симметрия относительно середины пласта.

К р и в ы е К С п р о т и в п е р е х о д н о й з о н ы

Как показали данные сеточного моделирования, кривые КС в случае пласта, имеющего переходную зону, в пределах которой коэффициент нефтенасыщенности меняется от нуля до максимального, имеют такую конфигурацию (см. рис. 15, УП).

П о д о ш в е н н ы й г р а д и е н т - з о н д: ab - краевая площадка, bc - подъем, cd - пологий спад, de - площадка, соответствующая водоносной части пласта.

Максимум кривой КС находится против кровли переходной зоны. Однако при зондах достаточно большой длины ($L \gg h_{HH}$, где h_{HH} - мощность части пласта с максимальным нефтенасыщением), максимум сдвигается вниз.

К р о в е л ь н ы й г р а д и е н т - з о н д: ab - краевая площадка, bc - крутой подъем, cd - спад, de - площадка, соответствующая водоносной части пласта. Максимум на кривой КС соответствует кровле нефтяного пласта.

П о т е н ц и а л - з о н д: ab - подъем, bc - пологий спад, cd - площадка, соответствующая водоносной части пласта.

Подосва переходной зоны может быть для кривых всех указанных зондов определена по нижней точке на кривой, кажущееся сопротивление которой существенно (например, на 20%) отличается от значения КС против площадки, соответствующей водоносной части пласта.

При анализе переходной зоны важное место занимает выделение части пласта, принимаемой за нефтенасыщенную при подсчете запасов. Подосва этой части проводится в пределах переходной зоны по точке, в которой удельное сопротивление пласта равно "критическому" значению $\rho_{кр}$ ("критическим" называется удельное сопротивление пласта, который в первый период эксплуатации дает практически безводную нефть [43]).

Величина ζ , на которую нужно отступить от кровли переходной зоны, может быть определена по формуле

$$\zeta = h_{\text{пер}} \frac{\rho_{\text{НН}} - \rho_{\text{кр}}}{\rho_{\text{НН}} - \rho_{\text{БМ}}},$$

где $h_{\text{пер}}$ - мощность переходной зоны, $\rho_{\text{НН}}$ - удельное сопротивление части пласта с максимальным нефтенасыщением, $\rho_{\text{БМ}}$ - удельное сопротивление водоносной части пласта.

Наиболее удобно отбивать границы пласта по диаграммам, записанным малыми зондами, так как для них конфигурация кривых в большинстве случаев соответствует типу А и Б (если отвлечься от некоторой "иззубренности" фактической кривой, связанной с неоднородностью пересеченных скважиной пластов). Поэтому отбивка границ сводится к выделению экстремальных точек - максимума и минимума.

Более детально расчленить кривые КС можно и путем выделения других точек: перегиба (вторая производная которых равна нулю), максимальной кривизны и т.д.

При анализе фактической кривой КС интерпретатор сначала просматривает каротажную диаграмму, выделяя "интересные" фрагменты кривых КС, а затем уже отбивает границы пласта. "Интересные" фрагменты соответствуют, как правило, аномальным значениям КС. В качестве модели этого приема может быть предложена такая схема. Вначале проводится урвенная прямая и выделяются урвенные точки ("предварительные границы пластов"). Затем вблизи выделенных точек находятся экстремальные, соответствующие границам пласта ("уточненные границы пласта"). Указанная схема ("выделение предварительных границ по урвенным точкам" - "уточнение границ по экстремальным или другим каким-либо точкам") может с успехом применяться в качестве модели анализа диаграмм и других видов промыслово-геофизических исследований скважин (картаж ПС и т.д.).

Говоря об экстремальных точках на кривых КС, необходимо сделать замечание. Из-за "иззубренности" фактических кривых КС на последних имеется большое число экстремальных точек и только некоторые из них выделяются в качестве границ пластов.

Экстремальные точки, удовлетворяющие ряду дополнительных условий, которые можно рассматривать как соответствующие границам пласта, будем называть точками существенного экстремума (точками существенного максимума, точками существенного минимума).

§ 2. Простейшие алгоритмы расчленения кривых КС

Алгоритмы, осуществляющие расчленение кривых градиент-зондов, как уже говорилось, сложны. Чтобы максимально облегчить их анализ, мы рассмотрим, как осуществляется автоматическое расчленение для различных типов конфигураций кривых, начиная с наиболее простых.

Для простоты изложения положим, что, если не оговорено противного, кривые КС записаны подошвенными градиент-зондами. Это допущение не очень обременительно, поскольку, как мы увидим далее, эти же алгоритмы применимы и для расчленения кривых кровельных градиент-зондов, если в программе-диспетчере предусмотреть обращение к дополнительным, весьма несложным подпрограммам.

При составлении алгоритмов расчленения кривых градиент-зонда в качестве основной подпрограммы будем использовать процедуру поиска очередного экстремума – процедуру Сл.Экстр. (алгоритм 6, гл. II).

Начнем с алгоритма отбивки пласта для наиболее простого случая, когда нужно выделять высокоомные пласты на фоне низкоомных вмещающих пород, причем пласты высокого сопротивления являются однородными и характеризуются простыми, близкими к "классическим" (полученным теоретически), конфигурациями отклонений на кривой. Подошва и кровля высокоомных пластов отбиваются соответственно точкой максимума и минимума, причем между указанными экстремальными точками происходит монотонный подъем, за которым следует монотонный спад (рис. 16, а).

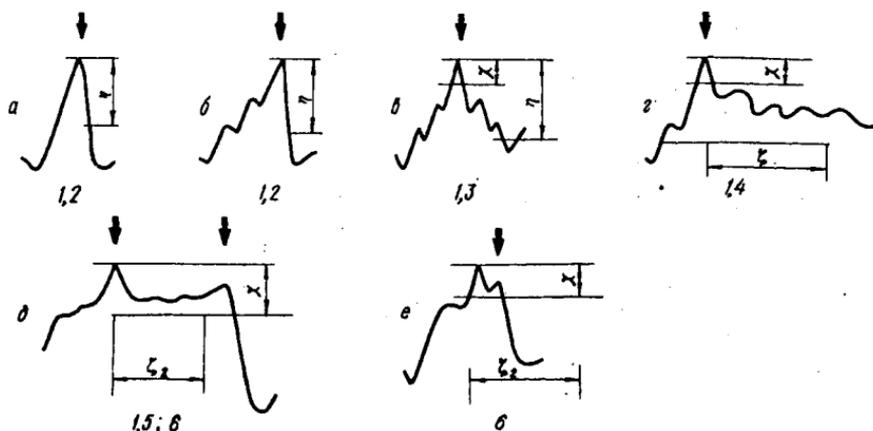


Рис. 16. Типология кривых КС градиент-зонда, положенная в основу алгоритма расчленения по точкам существенного экстремума.

В данном случае алгоритм расчленения должен предусматривать такую последовательность действий:

1. Каротажную кривую просматривают и находят первую экстремальную точку.

2. Находится следующая экстремальная точка (противоположная по характеру предыдущей).

3. Вычисляется разность ординат экстремальных точек.

Если эта разность достаточно велика

$$max - min > eps, \quad (I)$$

то абсциссы точек максимума и минимума определяются как границы пласта.

4. Находится следующая пара экстремальных значений и опять проверяется условие (I) и т.д.

Мы еще более упростим задачу и составим алгоритм, отбывающий лишь подошвы пластов высокого сопротивления. В этом случае алгоритм должен начинаться с поиска первой точки максимума. Кривая может начинаться либо с воздымающейся ветви, либо со спадающей, либо с участка, параллельного оси глубин. Если кривая начинается с воздымающейся ветви, то принимая за отправную точку $i = 2$ с помощью процедуры Сл.Экстр. (алгоритм 6, гл. II) можно найти ближайший максимум. Если кривая начинается со спадающей ветви, то сначала с помощью процедуры Сл.Экстр. находится ближайший минимум и используя абсциссу минимума в качестве отправной точки, вторично оспрашивают к процедуре Сл.Экстр. и находят точку максимума. Если кривая начинается с участка, параллельного оси глубин, то определяется граница этого участка, а затем анализируется, воздымается ли далее кривая или спадает. В первом случае осуществляют сразу же поиск максимума, во втором — сначала поиск минимума, а затем максимума.

Алгоритмически эти действия можно записать так:

```
      " j0 := 1 ;  
for i := 2 step 1 until n do  
  if a[i] = a[i-1] then j0 := j0 + 1  
  else goto M0 ;"
```

comment Этот оператор цикла определяет конец участка, параллельного оси глубин (если таковой имеется);

goto Просмотр кривой закончен;

M0: KO := j0;

if a[j0+1] < a[j0] then : Сл.Экстр. (j0, false, ko);

comment Если кривая спадает, находится ближайший минимум.

Затем переходят к выделению очередного максимума;

M1: Сл. Экстр. (ko , true, $i1$); $max := a[i1]$;

После того, как первый максимум найден ($i1$ - абсцисса точки максимума, max - ордината), находится соседний минимум:

"Сл. Экстр. ($i1$, false, k); $min := a[k]$;

(k - абсцисса точки минимума, min - ее ордината).

Затем проверяется амплитуда спада кривой после точки максимума и если она превышает ϱ , то отбивается очередная граница $g[t]$:

$$\left. \begin{array}{l} \text{"if } max - min > eta \text{ then} \\ \quad \text{begin } t := t + 1; \\ \quad \quad g[t] := i1 \text{ end"} \end{array} \right\} \quad (2)$$

Оператором (2) предусматривается запись границы лишь в индексной форме.

После выполнения условного оператора (2), программа должна перейти на поиск и анализ очередной пары экстремумов, причем в качестве отправной точки уже должна служить точка k . Для этого в ячейку $k0$, где хранится абсцисса отправной точки при поиске очередного максимума, засылается значение абсциссы k последнего найденного минимума и управление передается оператору, помеченному меткой M:

$$\left. \begin{array}{l} \text{"} k0 := k; \\ \quad \text{goto M"} \end{array} \right\}$$

После того, как просмотр кривой закончен, в качестве последней границы записывается длина массива a :

$$\left. \begin{array}{l} \text{"} t := t + 1; \\ \quad g[t] := n; \end{array} \right\}$$

(в начальной части алгоритма следует записать операторы $t := 1$; $g[t] := 1$). Перейти от границ, записанных в индексной форме, к границам, выраженным в метрах, можно с помощью оператора цикла:

$$\left. \begin{array}{l} \text{"for } i := 1 \text{ step } 1 \text{ until } t \text{ do} \\ \quad z[i] := h0 + (g[i] - 1) * delta \text{"} \end{array} \right\} \quad (3)$$

Поскольку первая граница в индексной форме равна 1, а последняя - n , то первой и последней границами, выраженными в метрах, являются соответственно начальная и конечная глубины интервала кривой, представленной массивом a .

Оператор (3) может быть либо включен в алгоритм расчленения кривой градиент-зонда, либо исключен. Поскольку формирование таблиц результата интерпретации относится к заключительным фазам обработки данных, переход от индексной формы выражения глубин к записи в метрах целесообразно предусмотреть в диспетчере или в одной

из подпрограмм, вызываемой после подпрограммы расчленения. Поэтому мы не будем включать этот оператор в наш алгоритм.

Таким образом, мы переходим к следующему алгоритму.

А л г о р и т м I

```

begin real array a; integer array g;
integer n, t, i, l1, k0, j0; procedure           Сл.Экстр;
  g[t]:=t:=j0:=1;
  for i:=2 step 1 until n do
    if a[i]=a[l1] then j0:=j0+1
      else goto M0;
      goto Просмотр кривой закончен;
M0: k0:=j0;
  if a[j0+1]<a[j0] then           Сл.Экстр. (j0, false, k0, z );
M1: Сл.Экстр. ( k0, true, i1, z );
  max:=a[l1];
  Сл.Экстр. ( i1, false, k, z );
  min:=a[k];
  if max-min > eta then
    begin t:=t+1;
      g[t]:=-i1 end
      k0:=k;
      goto M;
Просмотр кривой закончен: t:=t+1;
  g[t]:=n end.

```

Описанный алгоритм выделяет лишь подошвы высокоомных пластов (кровли низкоомных) по резкому спаду после точки максимума. Однако если в него внести некоторые коррективы, то этот алгоритм можно использовать и для выделения кровли пластов высокого сопротивления. Последнее основано на следующем: если все элементы массива a взять с обратным знаком, то максимумы станут минимумами и резкому подъему кривой, характерному для кровли высокоомного пласта, будет соответствовать резкий спад, т.е. особенность конфигурации, для выделения которой и приспособлен алгоритм I.

Таким образом, в алгоритм I должны быть включены операторы, осуществляющие "переворот" кривой на 180° вокруг оси глубин. Чтобы массив a после обращения к программе расчленения градиент-зонда оставался таким же, каким он был до обращения, изменение знака у элементов массива следует производить дважды: "перевернуть" кривую КС, выделить кровли высокоомных пластов, затем опять изменить

знак и выделить подошвы пластов. Для определения того, какие границы пласта отбиваются, вводится логическая переменная β , являющаяся истинностным значением высказывания "Выделяются кровли высокоомных пластов".

Вместо оператора:

„MO: k0:=j0;”

в алгоритм вводится группа операторов:

```

„MO:  $\beta$ :=true;
  for i:=1 step 1 until n
    do a[i]:=-a[i];
    k0:=j0”;

```

(4)

а вместо

„z: Просмотр кривой закончен: t:=t+1;
g[t]:=h end”

вводится группа операторов:

```

„z: if  $\beta$  then
  begin  $\beta$ := $\neg$  $\beta$ ;
        eta:=eta+1;
        goto MO end;

```

(5)

Просмотр кривой закончен: t:=t+1;
g[t]:=n end.

Поскольку вначале в массив g заносятся кровли пластов, а затем подошвы, для упорядочения его массива границ следует воспользоваться алгоритмом II, гл. II, который мы перепишем так:

```

„p:=1;
SM2: w2:=g[p]; s:=p+1;
SM1: w1:=g[s];
  if w2>w1 then begin g[p]:=w1;
                  g[s]:=w2;
                  w2:=w1 end;
s:=s+1; if s<t then goto SM1;
p:=p+1; if p<t-1 then goto SM2”

```

Таким образом, мы приходим к следующему алгоритму:

А л г о р и т м 2

begin real array a; integer array g; real eta, eta+1;
integer n, t, i, i1, k0, j0, p, s, w1, w2, label z, Boolean beta;
procedure Сл. Экстр;

```

  g[t]:=t:=j0:=1;
  for i:=2 step 1 until n do
    if a[i]=a[i-1] then j0:=j0+1
    else goto MO;

```

goto Просмотр кривой закончен;
 M0: $\beta := \text{true}$;
 for $i := 1 \text{ step } 1 \text{ until } n$
 do $a[i] := -a[i]$;
 $k := j_0$;

if $a[j_0+1] < a[j_0]$ then Сл. Экстр. (j_0, false, k, z);

M1: Сл. Экстр. (k, true, i, z); $\max := a[i]$;

Сл. Экстр. (i, false, k, z); $\min := a[k]$;

if $\max - \min > \epsilon$ then

begin $t := t+1$;

$g[t] := i$ end;

$k := k$;

goto M;

z: if β then begin $\beta := \neg \beta$;

$\epsilon := \epsilon_1$;

goto M0 end.

Просмотр кривой закончен: $t := t+1$;

$g[t] := n$;

$p := 1$;

SM2: $w_2 := g[p]$; $s := p+1$;

SM1: $w_1 := g[s]$;

if $w_2 > w_1$ then begin $g[p] := w_1$;

$g[s] := w_2$;

$w_2 := w_1$ end;

$s := s+1$; if $s \leq t$ then goto SM1;

$p := p+1$; if $p \leq t-1$ then goto SM2 end.

Как видим, в алгоритме 2 значения критерия ϱ (ϵ) могут быть различны при выделении кровли высокоомных пластов и их подошвы.

В первом случае проверяется условие:

$$\max - \min > \varrho,$$

во втором —

$$\max - \min > \varrho_1.$$

Параметры ϱ и ϱ_1 (ϵ и ϵ_1) задаются заранее.

§ 3. Амплитудная фильтрация

В алгоритмах I и 2 границы отбивались в зависимости от амплитуды спада после точки максимума или амплитуды подъема после точки минимума, т.е. по величине амплитуды отклонения против выделяемого пласта. Если эта амплитуда больше, границы отбиваются, если

же недостаточно велика – выделение границ не производится. Такой способ выделения пластов в зависимости от амплитуды отклонения против них получил название амплитудной фильтрации.

При амплитудной фильтрации осуществляется проверка условий вида:

$$a_2 - a_1 > \psi \quad (6)$$

или

$$a_2 - a_1 < \psi, \quad (7)$$

где a_2 – большая, а a_1 – меньшая из сравниваемых координат.

Если в качестве величины ψ взята константа, то расчленение кривых КС не всегда удается произвести с достаточной эффективностью. При малом значении ψ расчленение оказывается излишне детальным, перегруженным большим количеством маломощных пропластков, выделение которых не представляет интереса при интерпретации. При высоком же значении ψ возможен пропуск интересных пластов. Поэтому желательно использовать ψ , зависящие от a_1 :

$$a_2 - a_1 > \psi(a_1) \quad (8)$$

или

$$a_2 - a_1 < \psi(a_1). \quad (9)$$

На практике удобно использовать функцию $\psi(a_1)$:

$$\psi(a_1) = \begin{cases} \psi_0 & \text{при } a_1 \leq a^* \\ k a_1 & \text{при } a_1 > a^* \end{cases} \quad (10)$$

причем $a^* = \psi_0 / k$, $k = \psi_0 / a^*$,

т.е. при малых значениях a_1 параметр ψ имеет постоянное значение, а при больших ($a_1 > a^*$) – прямо пропорционален a_1 .

Нетрудно убедиться, что условие (8), где функция $\psi(a_1)$ определяется равенством (10), эквивалентно конъюнкции двух простых условий $a_2 - a_1 > \psi_0$ и $\frac{a_2}{a_1} > \xi$, где $\xi = k + 1 = \frac{\psi_0}{a^*} + 1$:

$$a_2 - a_1 > \psi_0 \wedge \frac{a_2}{a_1} > \xi. \quad (11)$$

Аналогично записывается условие (9) для функции $\psi(a_1)$ вида (10)

$$a_2 - a_1 < \psi_0 \wedge a_2 / a_1 < \xi. \quad (12)$$

В принципе можно применять и другие возрастающие (неубывающие) зависимости $\psi(a_1)$ и отличные от (10), в частности, параболические зависимости n -го порядка:

$$a_2 - a_1 > k a_1^n + \psi_0.$$

Мы ограничимся рассмотрением алгоритмов с конъюнктивными условиями вида (11) и (12). Замена простого условия амплитудной фильтрации (6) конъюнктивным (11) требует замены оператора (2) в алгоритмах 1 и 2 группой операторов:

```

„if beta then u := min/max else u := max/min;
  if max-min > eta ∧ u > ksi then
    begin t := t+1;
      g[t] := i end”

```

а во фрагменте алгоритма (5) необходимо предусмотреть обновление не только значения eta ($eta := eta \cdot 1$) но и ksi ($ksi := ksi \cdot 1$).

§ 4. Точки существенного экстремума

Как мы видели, при расчленении кривой КС, границы отбиваются не по всем экстремальным точкам, а по некоторым, удовлетворяющим специальным требованиям амплитудной фильтрации. Экстремальные точки, удовлетворяющие таким требованиям и позволяющие выделять интересные с точки зрения интерпретации пласты, называются точками существенного экстремума. В зависимости от сложности конфигурации кривой КС против пластов требования могут усложняться.

В алгоритме 1 и 2 амплитудная фильтрация осуществлялась путем проверки требования, чтобы разность ординат точки максимума и ближайшей точки минимума превышала величину ϱ (аналогично – разность ординат точки минимума и ближайшей точки максимума). В тех случаях, когда спад (подъем) кривой осложнен экстремумами (см. рис. 16, б), алгоритмы 1 и 2 не могут дать удовлетворительных результатов. В этом случае требование амплитудной фильтрации усложняется и сводится к проверке условия:

$$max - min_{min} > \varrho,$$

где min_{min} – наиболее глубокий минимум (т.е. ордината точки *minimum minimorum* на участке между данным максимумом и следующим максимумом, соизмеримым по величине с исследуемым максимумом).

Поиск точки *minimum minimorum* и отбивка границ производится по такой схеме.

1. Находится очередной максимум. Он рассматривается как кандидат в существенные максимумы (max_1).

2. Находится следующий минимум (min).

3. Проверяется условие амплитудной фильтрации (II) и, если оно выполняется, то отбивается граница и происходит возврат к пункту 1.

4. Если условие амплитудной фильтрации не выполняется, осуществляется поиск следующего максимума (max_2).

5. Если $max_2 > max_1$, т.е. если мы имеем дело с подъемом кривой КС, осложненным локальными экстремумами, то максимум max_1 затирается, а максимум max_2 рассматривается как кандидат в существенные максимумы и происходит возврат к пункту 2.

Следует отметить, что для того, чтобы убедиться в справедливости условия (II), далеко не всегда нужно находить точки *minimum minimumum*. Для этого бывает достаточно найти ближайший к *max*, минимум, удовлетворяющий условию (II). Этот минимум может и не быть точкой *minimum minimumum*.

Рассмотрим как алгоритмически описать приведенную схему отбивки границы. К этому месту программы с помощью предыдущих операторов найдена отправная точка *K0* для поиска очередного максимума – кандидата в существенные максимумы.

M1: Сл.Экстр. (*k0, true, i1, z*); *max1 := a[i1]*; *ii := i1*;

comment Найден кандидат в существенные максимумы. Его ордината *max1*, абсцисса – *ii*;

M2: Сл.Экстр. (*i1, false, k*); *min := a[k]*;

comment Найдена ордината очередного минимума;

if beta then u := min/max1 else u := max1/min;

if max1 - min > eta ∧ u > ksi then

begin t := t+1; g[t] := ii;

ko := k; goto M1 end;

comment Граница отбита. Управление передается метке M1;

else begin Сл.Экстр. (*k, true, i2*); *max2 := a[i2]*;

if max2 > max1 then begin max1 := max2;

ii := i2 end.

S := i1 := i2; goto M2 end;

comment. Если старый максимум меньше нового, то последний рассматривается в качестве кандидата в существенные максимумы – операторы „*max1 := max2*” и „*ii := i2*”. В качестве отправной точки для поиска следующего минимума принимается точка *i2* и управление передается оператору M2.

Еще больше усложним понятие существенного экстремума. Предположим, что если за максимумом на большом участке продолжается спад кривой (нет максимумов с большей ординатой), то такой максимум будем считать существенным (см. рис. I6, г). Чтобы убедиться, что такое условие удовлетворено, для каждого очередного максимума осуществляется проверка разности абсцисс точек максимума (*ii*) и точки минимума (*i2*):

$$i2 - ii > \zeta. \quad (I3)$$

Если условие (I3) выполняется, программа переходит к отбивке границы.

Затем потребуем, чтобы границы пластов удовлетворительно отбивались в случаях, когда конфигурация кривой КС имеет вид, показанный на рис. 16, д и 16, е. Для указанных случаев характерно, что после максимума-"лидера", т.е. максимума с наибольшей ординатой, есть один или несколько максимумов с близкой ординатой, причем между ними и "лидером" нет минимумов, удовлетворяющих условию амплитудной фильтрации. Подошву пласта в этом случае целесообразно проводить по последнему из максимумов такого рода. Участок пласта между "лидером" и подошвой пласта назовем "добавочным участком". Если мощность добавочного участка мала, то лидер не рассматривается в качестве существенного экстремума и граница по нему не отбивается (см. рис. 16, е). Если же мощность добавочного участка достаточно большая (больше ζ_2), то его следует выделить в самостоятельный пласт, отбив границу по максимуму-"лидеру" (см. рис. 16, д). Расширив таким образом понятие существенного максимума, мы должны дополнить схему отбивки границ такими пунктами:

6. Если $max 2 < max 1$, проверяется условие (I3). При выполнении этого условия отбивается граница.

7. Если условие (I3) не выполнено, проверяется условие:

$$max 1 - max 2 \leq chi \wedge \frac{max 1}{max 2} < shi. \quad (I4)$$

При выполнении этого условия, абсцисса максимума запоминается в качестве конца "добавочного участка" (в ячейку *ii2* засылается *ii*).

8. Переход к пункту 2.

Прежде чем перейти к новому, усложненному варианту алгоритма расчленения кривой градиент-зонда, рассмотрим блок отбивки границ.

Исходной информацией для работы блока отбивки границ являются:

t - порядковый номер последней записанной границы, *ii* - абсцисса точки существенного максимума, *ii2* - конец "добавочного участка" (если "добавочного участка" нет = 0).

Есть три варианта отбивки границ пласта:

1) по абсциссе точки существенного максимума

„ *t* := *t* + 1;
g[*t*] := *ii* ;”

2) по концу "добавочного участка"

if *ii2* ≠ 0 and *ii2* - *ii* < *dz2* then
begin *t* := *t* + 1;
g[*t*] := *ii2* ;
ii2 := 0 end ;

3) отбивка двух границ по точке существенного максимума (по "лидеру") и по концу "добавочного участка":

```

if  $ii2 \neq 0 \wedge ii2 - ii > dz2$  then
  begin  $t := t + 1$ 
     $g[t] := ii$ ;
     $t := t + 1$ ;
     $g[t] := ii2$ ;
     $ii2 := 0$  end.

```

Эти три варианта отбивки границ можно совместить в виде такой группы операторов:

```

   $t := t + 1$ ;
  if  $ii2 = 0$  then  $g[t] := ii$ ;
  else begin if  $ii2 - ii < dz2$  then
     $g[t] := ii2$ 
  else begin  $g[t] := ii$ ;
     $t := t + 1$ ;
  end;
   $g[t] := ii2$  end;
   $ii2 := 0$  end.

```

Разобрав детали нового, усложненного алгоритма расчленения, запишем на языке АЛГОЛ-60 основную часть этого алгоритма. Сделаем предварительно замечание. Этот фрагмент алгоритма используется для выделения как подошвы высокооного пласта, так и кровли (путем "переворота" кривой КС). В последнем случае можно говорить о "лидирующем" минимуме.

```

   $ii2 := 0$ ;
M1: Сл Экстр (  $k0$ , true,  $i1, z$ );  $max1 := a[i1]$ ;  $ii := i1$ ;
M2: Сл Экстр (  $i1$ , false,  $k, z$ );  $min := a[k]$ ;
  if  $\beta > 0$  then  $u := min/max1$ 
    else  $u := max1/min$ ;
  if  $max1 - min > \epsilon \wedge u > \kappa$  then
M3: begin  $t := t + 1$ ;
  if  $ii2 = 0$  then  $g[t] := ii$ ,
  else begin if  $ii2 - ii < dz2$  then
     $g[t] := ii2$ 
  else begin  $g[t] := ii$ ;
     $t := t + 1$ ;
  end;
   $g[t] := ii2$  end;
   $ii2 := 0$  end
   $k0 := k$ ; goto M end

```

```

else begin  Сл Экстр ( k, true, i2, z );
              max 2 := a[i2];
              if max 2 > max 1 then
                begin max 1 := max 2
                      ii := i2;
                      i2 := 0;
                      goto 3 end
              if i2 - ii > dzeta then goto M3;
              if beta then u := max 2 / max 1
                else u := max 1 / max 2;
              if chi > max 1 - max 2  $\wedge$  u < shi then i2 := i2;
              S := i1 := i2; goto M2 end".

```

Наконец, рассмотрим еще одно уточнение алгоритма расчленения кривой КС по точкам существенного максимума. Против кровли высокоомных пластов, особенно против тонких, нередко наблюдается плохо выраженный минимум, который нельзя отнести к "лидерам". Это приводит к сдвигу отбиваемой кровли вверх и соответствующему завышению мощности пласта (рис.17).

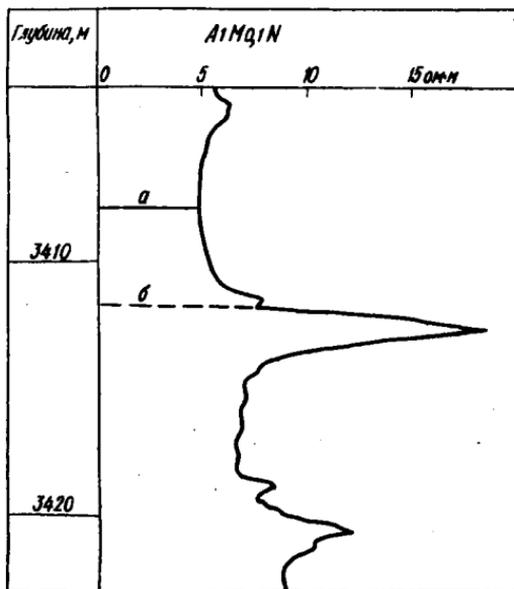


Рис.17. Уточнение границ тонких пластов:

а - кровля пласта, выделенная программой РГЗ без блока уточнения границ; б - кровля пласта, выделенная программой РГЗ с блоком уточнения границ.

Чтобы этого не происходило, применяется такой способ уточнения положения кровли пласта.* Справа и слева от существенного максимума max находятся минимумы — min лев. и min пр.

$$\frac{max}{min\ лев} \geq 2 \wedge \frac{max}{min\ пр} \geq 2, \quad (I5)$$

т.е. если отклонение кривой против пласта оканчивается достаточно резкой пикой, то подошва пласта отбивается по минимуму min лев.

Проверку условия (I5) целесообразно проводить в тех случаях, когда кровля отбивается по точке существенного минимума, а подошва — существенного максимума. Для этого целесообразно предусмотреть булев массив max , каждый элемент $max[i]$ которого является истинным значением высказывания: " i -ая граница отбита по точке максимума". Определение значений массива max следует производить в операторе, помеченном меткой z (этот оператор включается в работу после того, как кривая КС просматривается в первый раз):

```

      „z: if beta then
      begin for i:= tstep 1 until t do max[i]:= false;
            beta := 1 beta;
            ksi := ksi 1;
            eta := eta 1;
            chi := chi 1;
            shi := shi 1;
            tt := t;
            goto MO end
      else for i:= tt+1 step 1 until t do Max[i]:= true"
  
```

Описанная выше коррекция кровли пласта осуществляется с помощью следующего оператора цикла (j , $j1$, $j2$ — это абсциссы экстремумов max , min лев и min пр соответственно):

```

      for i:= 3 step 1 until t-1 do
      begin if Max[i]  $\wedge$   $\neg$  Max[i-1] then
      begin j:= j1:= j2:= g[i];
            A: j1:= j1+1;
            if a[j1+1]-a[j1]<0 then goto A;
            B: j2:= j2-1;
            if a[j2-1]-a[j2]<0 then goto B;
            if a[j]/a[j1]  $\geq$  2  $\wedge$  a[j]/a[j2]  $\geq$  2
            then g[i-1]:= j2 end.
      end
  
```

* Это уточнение предложено А.Л.Ханкиным.

Подводя итоги, дадим следующее определение точкам существенного экстремума.

Существенным максимумом будем называть такой максимум, для которого удовлетворяются условия 1 и хотя бы одно из условий 2, 3, 4, 5 или же условие 6.

Условие 1. На участке между ним и ранее выделенным существенным максимумом (или началом кривой) он является *maximim maximorum*.

Условие 2. Следующий за ним минимум ($M_{n_{i+1}}$) удовлетворяет условию:

$$A(Mx_i) - A(M_{n_{i+1}}) > \varrho, \quad (I6)$$

где $A(x)$ — значение регистрируемого параметра в точке x .

Условие 3. Один из следующих за Mx_i минимумов (M_{n_k}) удовлетворяет условию:

$$A(Mx_i) - A(M_{n_k}) > \varrho, \quad (I7)$$

причем на участке $[Mx_i, M_{n_k}]$ нет таких максимумов (Mx_j), для которых выполняется неравенство:

$$A(Mx_i) - A(Mx_j) \leq \chi. \quad (I8)$$

Условие 4. На участке $[Mx_i, Mx_i + \zeta]$ нет максимумов, удовлетворяющих неравенству (I8).

Условие 5. За максимумом Mx_i есть такой максимум Mx_k , что: а) для него удовлетворяется хотя бы одно из условий 2, 3, 4; б) на участке $[Mx_i, Mx_k]$ значения ординаты не опускаются ниже $A(Mx_i) - \chi$ и других максимумов, удовлетворяющих условиям 2, 3, 4, нет; в) $Mx_k - Mx_i \geq \zeta_2$; (I9).

Условие 6. Максимум Mx_i не есть *maximim maximorum*, но: а) ему предшествует максимум Mx_s , который является *maximim maximorum* и удовлетворяет хотя бы одному из условий 2, 3, 4; б) на участке $[Mx_s, Mx_i]$ ордината A находится в пределах:

$$A(Mx_s) \geq A \geq A(Mx_s) - \chi;$$

в) $Mx_i - Mx_s < \zeta_2$.

§ 5. Подпрограмма расчленения кривых КС градиент-зонда

Приняв во внимание все усложнения алгоритма, рассмотренные в предыдущем параграфе, мы приходим к следующему варианту подпрограммы расчленения кривой КС градиент-зонда по точкам существенного экстремума.

А л г о р и т м 3

$$A(Mx_s) - A(Mx_i) \leq \chi.$$

```

procedure P13 (a, delta, ho, ksi, ksi1, eta, eta1, chi, chi1, shi, shi1,
dzeta, dz2, n, g, t, Max, Cx 3xcmp);
real array a; real ksi, ksi1, eta, eta1, chi, chi1, shi, shi1, delta, ho;
integer array g; integer dzeta, dz2, n, t;
Boolean array Max; procedure
begin t:=g[1]:=j0:=1, beta:=true;
  for i:=2 step 1 until n do
    if a[i]=a[i-1] then j0:=j0+1
      else goto M0;
    go to P;
M0: for i:=1 step 1 until n do a[i]:=-a[i];
    k:=j0;
    if a[j0+1]<a[j0] then (j0, false, k0, z);
    ii2:=0;
M1: (k0, true, i1, z); max:=a[i1]; ii:=i1;
M2: (i1, false, k, z); min:=a[k];
    if beta then u:=min/max else u:=max1/min;
    if u > ksi  $\wedge$  max1-min > eta then
M3: begin t:=t+1;
      if ii2=0 then g[t]:=ii;
      else begin if ii2-ii < dz2 then
        g[t]:=ii2
        else begin g[t]:=ii;
          t:=t+1;
          g[t]:=ii2 end;
          ii2:=0 end
          k0:=k;
          go to M1 end
      else begin (k, true, i2);
        max2:=a[i2];
        if max2 > max1 then
          begin max1:=max2;
            ii:=i2;
            ii:=0;
            go to S end;
          if i2-ii > dzeta then go to M3;
          if beta then u:=max2/max1
            else u:=max1/max2;
          if chi > max1-max2  $\wedge$  u < shi then ii2:=i2;

```

```

S: i1:=i2; goto M0 end;
z: if beta then
  begin for i:=1 step 1 until t do Max[i]:=false;
    beta:= $\neg$  beta;
    kai:=ksl 1;
    eta:=eta 1;
    chi:=chi 1;
    shi:=shi 1;
    tt:=t;
    goto M0 end
  else for i:=tt+1 step 1 until t do Max[i]:=true;
    p:=t+1; g[t]:=n;
    p:=1;
    SM2:w2:=g[p]; v2:=Max[p]; s:=p+1;
    SM1:w1:=g[s]; v1:=Max[s];
    if w2>w1 then begin g[p]:=w1;
      Max[p]:=v1;
      g[p]:=w2;
      Max[s]:=v2;
      w2:=w1;
      v2:=v1 end
    s:=s+1; if s<t then goto SM1;
    p:=p+1; if p<t-1 then goto SM2;
  for i:=3 step 1 until t-1 do
    if Max[i]  $\wedge$  Max[i-1] then
      begin j:=j1:=j2:=g[i];
        A:jk:=j1+1;
        if a[j1+1]-a[j1]<0 then goto A;
        B:j2:=j2-1;
        if a[j2-1]-a[j2]<0 then goto B;
        if a[j]/a[j1]  $\geq$  2  $\wedge$  a[j]/a[j2]  $\geq$  2
          then g[i-1]:=j2 end
        end P13.

```

Алгоритм 3 дает хорошее расчленение кривых коротких и средних градиент-зондов. Применение его для расчленения кривых длинных зондов в разрезах, где встречаются пласты малой и средней мощности, может оказаться не эффективным, поскольку в этом случае конфигурация кривых кажущегося сопротивления сильно усложнена за счет появления экранных максимумов и минимумов.

Расчленение кривых КС длинных градиент-зондов возможно на основе применения дополнительных специальных алгоритмов, выделяющих экранные максимумы и минимумы, в том числе образованные вследствие анизотропных пластов.

Однако, как показывает практика машинной интерпретации, в большинстве случаев достаточно расчленения по одному зонду длиной порядка 1 м или меньше.

§ 6. Адаптирующийся блок расчленения кривой градиент-зонда

Детальность расчленения кривой КС градиент-зонда по точкам существенного экстремума зависит от выбранных значений параметров, определяющих амплитудную фильтрацию ($F_1, F_2, \rho, \rho_1, \lambda, \lambda_1, sh_1, sh_2$). Выбор этих значений требует соответствующего анализа каротажных диаграмм и отнимает много времени. Желательно, чтобы эта работа выполнялась ЭВМ. Для этого в систему автоматической интерпретации целесообразно включить блок, который по каротажным материалам оценивал значения указанных параметров и, таким образом, "приспосабливался", "адаптировался" к фактическим условиям исследований.

Схема работы адаптирующего блока такова:

1. По кривой КС находятся базовые значения и длина интервала между ними (длина базового интервала). Может быть введен некоторый параметр c , от которого зависят базовые значения и, соответственно, длина базового интервала.

2. Определяются значения параметров фильтрации на основе заранее установленных зависимостей их от базовых значений или длины базового интервала. Варьируя значениями параметра c (только одного параметра!), можно менять детальность расчленения.

А.Л.Ханкиным были предложены формулы, связывающие параметры $\xi, \xi_1, \varrho, \varrho_1, x, x_1, sh_1, sh_1$ со среднеоптимальными значениями Max_{cp} и Min_{cp} :

$$\xi = \begin{cases} 3, & \text{если } \sqrt{Max_{cp}/Min_{cp}} > 3 \\ \sqrt{Max_{cp}/Min_{cp}}, & \text{если } 3 \geq \sqrt{Max_{cp}/Min_{cp}} \geq 1,5 \\ 1,5, & \text{если } \sqrt{Max_{cp}/Min_{cp}} < 1,5 \end{cases}$$

$$\varrho = \frac{Max_{cp} - Min_{cp}}{4}$$

$$\xi_1 = \xi, \quad \varrho_1 = \varrho, \quad x = \frac{\varrho}{2}, \quad x_1 = \varrho$$

$$sh_1 = 1,25, \quad sh_1 = 1,5$$

Базовые (среднеэкстремальные) значения зависят от числа S наибольших экстремумов, по которым производится осреднение. Число S находится по формуле:

$$S = \text{entier}\left(\frac{\Delta H}{c} + 0,5\right), \quad (21)$$

где $\text{entier}(x)$ – целая часть числа (x),

$$\Delta H = H_{кон} - H_{нач}.$$

Из формулы следует, что S есть округленное до целого частное от деления интервала глубин, в котором записана кривая КС на параметр C .

На языке АЛГОЛ-60 адаптирующийся блок расчленения кривой КС может быть записан следующим образом:

А л г о р и т м 4

```

begin real Hкон, Hнач, delta, Maxcp, Mincp, ksi, eta;
  delta := Hкон - Hнач;
  n := entier(delta/delta + 0,5);
  S := entier(delta/c + 0,5);
  Обз(a, S, 9, true, true, Maxcp, Mincp);
  ksi := sqrt(Maxcp/Mincp);
  if ksi > 3 then ksi := 3 else
  if ksi < 1,5 then ksi := 1,5;
  eta := (Maxcp/Mincp) 0,25;
  ПГЗ(a, delta, Hнач, ksi, ksi, eta, eta-0,5, eta,
    1,25, 200, 100, q, t, Max) end.
  
```

§ 7. Расчленение кривых кровельного градиент-зонда

Характер обработки кривой КС градиент-зонда зависит от того, является ли зонд подошвенным или кровельным. В первом случае при выделении пластов кривая анализируется сверху вниз, во втором - снизу вверх. Как известно, кривая КС кровельного зонда для некоторого геоэлектрического разреза, будучи "обращена", т.е. повернута на 180° около некоторой прямой, перпендикулярной оси глубин, совпадает с кривой подошвенного градиент-зонда для геоэлектрического разреза, полученного из первого путем такого же "обращения". Эта особенность может быть использована для того, чтобы обрабатывать кривую КС как кровельного, так и подошвенного зонда с помощью одной и той же программы. Программа составлена для обработки кривой КС подошвенного зонда, а в тех случаях, когда возникает необходимость обработки кривой кровельного зонда, последняя предварительно "обращается": первое число массива, соответствующего кривой, меняется местами с последним, второе с предпоследним и т.д. Алгоритмически эта процедура выглядит следующим образом:

А л г о р и т м 5

procedure Обращение 1(a, n); array a ; integer n ;

begin integer n ;

for $i := 1$ step 1 until $n \div 2$ do

begin $r := a[n-i+1]$

$a[n-i+1] := a[i]$;

$a[i] := r$ end.

В результате расчленения получается массив глубин $g[1:t]$ в индексной форме.

Если обработке подвергалась кривая подошвенного зонда, то этот массив является массивом фиктивных глубин. Действительная глубина g_i действ. связана с фиктивной g_i фикт соотношением:

$$g_i^{\text{действ}} = n - g_i^{\text{фикт}} + 1. \quad (22)$$

Преобразование массива фиктивных глубин сводится к расчету действительных глубин по формуле (22) и последующему обращению полученного массива. Это может быть осуществлено с помощью следующего алгоритма:

А л г о р и т м 6

procedure Обращение 2(g, t, n); array g ; integer t, n ;

begin integer i ;

```

for i := 1 step 1 until t do
  g[i] := n - g[i] + 1;
for i = 1 step 1 until t + 2 do
  begin
    r := g[t - i + 1];
    g[t - i + 1] := g[i];
    g[i] := r end end.

```

Поясним сказанное простым примером. Пусть кривая КС кровельного градиент-зонда представлена массивом из десяти чисел:

2,5,10,7,3,1,2,3,3,3. (23)

В результате расчленения должны быть выданы границы - глубины, связанные с экстремальными точками. В данном случае границы должны быть сопоставлены с максимальной точкой (третье число) и с минимальной (шестое число). Так что конечным результатом должен быть такой массив глубин:

1,3,6,10. (24)

Заметим, что массив глубин всегда должен начинаться с 1 и кончатся числом, равным длине массива КС.

После обращения массива (23) мы будем иметь массив:

3,3,3,2,1,3,7,10,5,2. (25)

Проведя расчленение, мы выделим точку минимума (пятую) и точку максимума (восьмую). Таким образом, вместо массива действительных глубин (24) мы получим массив фиктивных глубин:

1,5,8,10. (26)

Преобразуя элементы массива (26) в соответствии с формулой (22), мы получаем массив:

10,6,3,1. (27)

Обрастая массив (27), мы приходим к искомому массиву действительных глубин (24).

§ 8. Отсчет характерных значений

Х а р а к т е р н ы е з н а ч е н и я

В главе II и в § I-7 настоящей главы описывались алгоритмы расчленения каротажной кривой на пласты. Для количественной интерпретации данных, а в определенных случаях и для качественной, с каротажной кривой отсчитываются показания. Так как в общем случае регистрируемая величина против пласта меняется от точки к точке, то необходимо прибегнуть к тому или иному методу отсчета значения, характеризующего показания против пласта. Такие значения принято назы-

вать характерными. Для различных методов геофизических исследований скважин, равно как и в различных условиях, способы отсчета характерных значений могут отличаться. Обычно применяются такие виды характерных значений.

1. Текущие – значение регистрируемого параметра в определенной точке оси глубин.

2. Экстремальные – наибольшее или наименьшее значение, наблюдаемое против пласта. Для положительных отклонений отсчитываются максимальные значения, для отрицательных – минимальные.

3. Средние – осреднение показаний в зависимости от конкретных условий. Может производиться как против всего интервала пласта, так и на некотором его участке.

4. Площадь аномалии против пласта – в некоторых случаях (при интерпретации гамма-каротажа, каротажа ПС и т.д.) является более характерной величиной, чем другие отсчеты.

5. Сложные статистические характеристики (дисперсия, квантили, квантили и др.).

Сводка различных способов отсчета характерных значений с каротажных диаграмм приведена в табл.3.

Алгоритмически отсчет указанных значений не очень сложен. Так, текущее значение ($a_{тек}$) находится с помощью оператора присваивания:

$$"a_{тек} = a[(z-h1)/delta + 1]."$$

Поиск экстремальных значений описан в § 4, гл. II (алгоритм 6). Определение площади аномалии (S) реализуется группой операторов:

$$\begin{aligned} & "S := 0;" \\ & \underline{\text{for } i := 11 \text{ step } 1 \text{ until } i2 \text{ do}} \\ & \quad S := S + a[i]. \end{aligned}$$

Определение среднего значения аналогично – оно отличается тем, что приведенная только что группа операторов дополняется оператором

$$"аср := S / (i2 - i1 + 1)."$$

Фактически алгоритмы имеют несколько более сложную структуру – они являются синтезом указанных алгоритмов, причем усложнение обусловлено необходимостью анализа фактической каротажной диаграммы с точки зрения, какой метод отсчета характерного значения необходимо применить в данном конкретном случае. В качестве сравнительно сложного алгоритма отсчета характерного значения рассмотрим алгоритм отсчета характерных значений с кривой КС градиент-зонда.

А л г о р и т м о т с ч е т а с р е д н и х и о п т и м а л ь н ы х з н а ч е н и й

Характерные значения с кривых КС отсчитываются главным образом для интерпретации по палеткам бокового каротажного зондирования. Имеется два класса палеток – палетки БКЗ и палетки ЭКЗ. Первые представляют собой семейство теоретических кривых для пласта неограниченной мощности, вторые – для пласта малой мощности. Для интерпретации по палеткам БКЗ в качестве характерных отсчитываются так называемые оптимальные значения ρ_k^{opt} – значения, близкие к $\rho_k^{h=x}$, т.е. к значению КС, которое имело бы место, если бы пласт обладал неограниченной мощностью. Для интерпретации по палеткам ЭКЗ должны быть отсчитаны экстремальные значения.

Один из наиболее распространенных способов отсчета оптимальных значений следующий: в качестве ρ_k^{opt} отсчитывается среднее значение против пласта на участке, исключаяем краевую площадку (краевая площадка – участок, равный длине зонда и отсчитываемый от кровли, см. рис.18). Этот способ отсчета не позволяет, строго говоря, снимать оптимальные значения КС против пластов, мощность которых меньше длины зонда или близка к ней (при $z \approx 0,8h$). Практически из-за этого не удается снять отсчеты $\rho_k^{h=x}$ с кривых КС, снятых длинными зондами БКЗ.

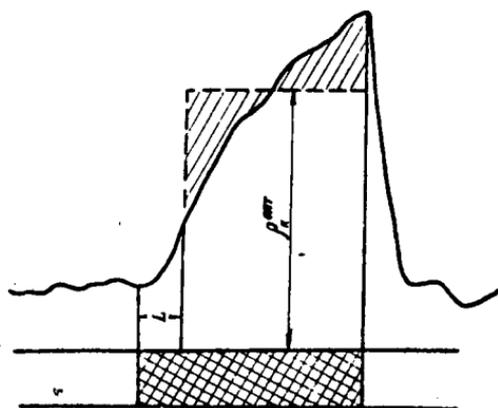


Рис.18. Отсчет оптимального значения кривой КС.

Способы отсчета характерных значений с каротажных диаграмм

Методы каротажа	Значение против центральной площадки	Экстремальное значение	Среднее значение против центральной площадки	Экстремальное значение после осреднения кривой	Площадь аномалии	Текущее значение	Среднее значение против всего пласта	
94 Градиент-зонд	Для кривых типа А ($L \ll h$) в однородном пласте	Для кривых типа В ($L \gg h$) возможно и для кривых типа Б и А (например, при интерпретации по палеткам МКЗ ∞)	Для кривых типа А, если однородность пласта нарушена	Возможно в случае тонких неоднородных пластов	-	В случае плавного изменения удельного сопротивления пласта в осевом направлении, в частности, в случае переходной зоны	В случае кривых типа Б и В при наличии теоретических СКЗ	
	Потенциал-зонд	То же	Для кривых типа Б и В	Для кривых типа А, если пласт недостаточно однороден	В случае недостаточной однородности пласта; используется редко	В случае переходной зоны	-	
95 Каротаж ПС	Против однородного мощного пласта	Против однородного тонкого пласта	Против неоднородного мощного пласта	Против неоднородного тонкого пласта	Против однородного мощного пласта	-	-	
	Гамма-каротаж	То же	-	То же	-	Универсальный метод	При достаточно плавном изменении содержания радиоактивных элементов в породах	
	Нейтронный гамма-каротаж	Для однородных пластов мощностью в несколько ζ	Против тонких пластов	Против неоднородных пластов мощностью в несколько ζ	-	-	При достаточно плавном изменении нейтронных свойств горных пород	Против мощных пластов
	Микрокаротаж	-	То же	-	-	-	При использовании данных для интерпретации НКГ и т.п.	То же
	Каверномер	-	-	-	-	-	При быстром изменении диаметра	Основной способ

Однако при определенных условиях может быть предложен способ отсчета оптимальных значений и против тонких пластов, мощность которых значительно меньше длины зонда. Этот способ основан на следующем. Как известно, семейство теоретических экстремальных кривых зондирования, собранных на палетке ЭКЗ, включает в себя кривую БКЗ для пласта неограниченной мощности. Это связано с тем, что при $\rho_{\text{вм}}^{\text{н}} \approx \rho_{\text{п}}$ различие между кривой БКЗ для пласта неограниченной мощности и экстремальной кривой зондирования пропадает. Поэтому в условиях, когда удельное сопротивление пласта и вмещающих пород не сильно отличаются друг от друга, показания, отсчитываемые против тонкого пласта, правомерно сопоставлять с палетками БКЗ для пласта неограниченной мощности, т.е. рассматривать их в качестве оптимальных. Удельное сопротивление неизменной части пласта очень часто близко к удельному сопротивлению вмещающих пород, поэтому кривые КС, снятые длинными зондами, часто слабо дифференцированы. Это и позволяет в таких случаях производить отсчет оптимальных значений против тонких пластов. Интерпретируемый пласт и примыкающий к нему со стороны удаленного электрода зонда пласт вмещающих пород близкого сопротивления при отсчете характерного значения рассматриваются как один пласт и, если их суммарная мощность больше $z/0,8$, отсчет $\rho_{\text{к}}^{\text{опт}}$ возможен. При этом, если краевая площадка против объединенного пласта не захватывает интерпретируемый пласт, в качестве $\rho_{\text{к}}^{\text{опт}}$ берется среднее значение, получаемое в результате осреднения КС на всем интервале против пласта. Если же краевая площадка заходит в интерпретируемый пласт, то осреднение производится лишь на участке, не затрагиваемом краевой площадкой.

Оптимальное значение, таким образом, может быть выражено формулой:

$$\rho_{\text{к}}^{\text{опт}} = \frac{1}{\rho} \int_{z_{\text{под}} - \rho}^{z_{\text{под}}} \rho_{\text{к}}(z) dz,$$

где $z_{\text{под}}$ - глубина подошвы интерпретируемого пласта,

$$\rho = \begin{cases} \sum_{i=1}^n H_i - L, & \text{если } L > \sum_{i=2}^n H_i \\ H_i, & \text{если } L \leq \sum_{i=2}^n H_i, \end{cases}$$

H_i - мощность i -го пласта, L - длина зонда.

Индекс i соответствует интерпретируемому пласту, индексы $2, \dots, n$ - залегающим выше него $n - i$ пластам близкого сопротивления.

Основная схема алгоритма отсчета характерных значений кривой КС может быть представлена так:

1. Для каждого пласта находятся средние значения. Наличие этого блока позволит использовать этот алгоритм и для отсчета средних значений с других каротажных диаграмм (кавернограмм, диаграмм микрокаротажа и т.д.).

2. В том же цикле для каждого пласта проверяется его мощность. Если мощность достаточная, отсчитывается ρ_K^{opt} .

3. Если мощность интерпретируемого пласта мала, проверяется, покрывают ли его пласты, близкие по сопротивлению, и если такие пласты есть, определяется их число. Если таких пластов нет, отсчет ρ_K^{opt} не производится.

4. При наличии покрывающих пластов, близких по сопротивлению, проверяется, возможен ли отсчет ρ_K^{opt} и если он возможен, производится вычисление оптимального значения.

На языке АЛГОЛ-60 алгоритм отсчета характерных значений (ОХЗ) имеет такой вид.

А л г о р и т м 7

```
procedure ОХЗ(a, l, g, eps, delta, psi, k, t, n, u, Rcp, Romt);  
real array a, l, Rcp, Romt; integer array g; real eps, delta;  
integer k, t, n, u; Boolean psi;  
  begin real LO, LO8, H; integer i, ii, j, ii;  
  Boolean phi;  
  LO8 := entier(L[K]/(q8delta)+0,5);  
  LO := entier(L[K]/delta+0,5);  
  for i := 1 step 1 until t-1 do  
  begin Rcp[i] := 0;  
    H := g[i+1] - g[i];  
  for j := g[i] step 1 until g[i+1] do  
    Rcp[i] := Rcp[i] + a[j, k];  
    Rcp[i] := Rcp[i] / (H+1);  
  if psi then goto M4;  
    Romt[i, k] := 0;  
  if H > LO8 then  
    begin ii := g[i] + LO;  
  M1: for j := ii step 1 until g[i+1] do  
    Romt[i, k] := Romt[i, k] + a[j, k];  
    Romt[i, k] := Romt[i, k] / (g[i+1] - ii + 1) end  
  else begin phi := false; ii := i;
```

```

M2: if  $ii=1$  then
      begin if  $\phi$  then goto M3
            else goto M4 end;
if  $abs(R_{cp}[i]-R_{cp}[ii-1]) < eps$  then
      begin  $\phi := true$ ;
             $ii := ii - 1$ ;
            goto M2 end
      else M3: if  $g[i+1]-g[ii] \geq L08$ 
      then begin if  $0 \leq g[i]-g[ii]$  then
        begin  $R_{opt}[i,k] := R_{cp}[i]$ ;
              goto M4 end
        else  $i1 := g[ii] + L0$ ;
              goto M1 end
        else goto M4 end
      M4: end end

```

Объясним алгоритм 7.

Исходной информацией является:

- двумерный массив a - кривые КС комплекса БКЗ;
- $g[i+1]$ - массив границ (в индексной форме);
- числовые величины: δ - шаг квантования, ϵ - критерий близости показаний, k - номер кривой КС;
- логическая величина ϕ , определяющая режим работы алгоритма: при $\phi = true$ производится отсчет средних значений, при $\phi = false$ - отсчет оптимальных значений.

В результате работы алгоритма вычисляется массив средних значений R_{cp} или же массив оптимальных значений R_{opt} (массив R_{opt} двумерный и за одно обращение заполняется лишь один столбец, соответствующий k -той кривой КС комплекса БКЗ).

Оптимальное значение вычисляется путем осреднения кривой КС в интервале от $i1$ до $g[i+1]$. Если пласт одиночный (покрывающие пласты существенно отличаются по сопротивлению), то $i1 = g[i] + L0$. Если же есть примыкающие пласты и кровля последнего из них записана в ii -ой ячейке массива g , то

$$i1 = g[ii] + L0.$$

Условие отсчета против одиночного пласта имеет вид:

$$N \geq \text{entier}\left(\frac{L}{\delta \Delta} + 0.5\right), \quad (28)$$

а при наличии примыкающих пластов:

$$g[i+1] - g[ii] \geq \text{entier}\left(\frac{L}{\delta \Delta} + 0.5\right). \quad (29)$$

Напомним, что функция $\text{entier}(x)$ означает целую часть от x . Выражение, стоящее в правой части неравенств (28) и (29), вычисляется в начале работы алгоритма и заносится в ячейку 408.

Условие близости показания кривой КС против интерпретируемого и примыкающего пластов имеет вид:

$$\text{abs}(R_{cp}[i] - R_{cp}[ii-1]) < \text{eps}.$$

Среднее значение записывается в качестве оптимального в случае, когда

$$g[i] - g[ii] > \text{entier}\left(\frac{L}{\Delta} + 0.5\right). \quad (30)$$

Выражение в правой части неравенства также вычисляется заранее и заносится в ячейку 40.

Логическая переменная phi является истинностным значением высказывания: "Имеется по крайней мере один примыкающий пласт". Если $ii = 1 \wedge \text{phi}$, т.е. если кривля интерпретируемого пласта совпадает с началом интервала записи кривой КС и примыкающих пластов нет, то отсчет против данного маломощного пласта невозможен и управление передается на конец цикла - к пустому оператору, намеченному меткой M4, т.е. осуществляется переход к следующей итерации цикла.

Отсчеты экстремальных значений

Отсчет экстремальных значений $\rho_k^{\text{экстр}}$ ($R_{\text{экстр}}$) в случае неоднородных пластов сложен и не всегда точен. Мы здесь рассмотрим более простой случай, когда тонкий пласт достаточно однороден и изотропен, и на кривых КС всех зондов он выделяется положительным отклонением с максимумом в районе подошвы. В этом случае может быть использован следующий алгоритм поиска экстремального (максимального) значения.*

А л г о р и т м 8

```

begin real array a[1:n]; R_экстр[1:t-1, 1:u];
integer array g[1:t]; Boolean array Max[1:t-1];
integer i, j, p;
for i:=3, step 1 until t-1 do
begin R_экстр[k,i]:=0;
if Max[i] then
begin for j:=g[i]+1 step 1 until g[i-1]+1 do
if a[j] > a[j-1] ∧ a[j] > a[j+1] then
begin p:=j;
M: p:=p-1;

```

* Алгоритм 8 и его дополнение (31) составлены А.Л.Ханкиным.

```

if  $a[j] = a[p]$  then goto  $N$ 
  else if  $a[j] > a[p]$  then
    begin  $R_{\text{экстр}}[k, i] := a[j];$ 
      goto  $M$  end end end
   $M: \text{end end.}$ 

```

Логическая величина $Max[i]$ является истинностным значением высказывания: "Подойма i -го пласта отбита по точке существенного максимума". Если необходимо отсчитать максимальное значение, наблюдаемое против пласта, то значение $R_{\text{экстр}}$ можно скорректировать с помощью такого блока:

```

begin real  $Max;$ 
   $Max := 0$ 
  for  $j := g[i] + 1$  step  $-1$  until  $g[i - 1] + 1$  do
    if  $a[j] > Max$  then  $Max := a[j];$ 
       $R_{\text{экстр}}[k, i] := Max$  end.

```

(31)

С тупенчатая функция на базе
кривой КС

С помощью алгоритмов 3 и 7 мы разбиваем интервал записи кривой КС на пласты и находим характерные значения для выделенных пластов, т.е. получаем массивы $g[1:t]$ и $R_{\text{отр}}[1:t-1]$. Эти два массива можно рассматривать как ступенчатую функцию. Ступенчатая кривая, построенная на базе кривой КС, может быть использована для дальнейшей обработки, в частности, с помощью комплексной программы расчленения ступенчатая кривая по уровенным точкам может быть расчленена на более крупные пласты, а это расчленение, в свою очередь, может быть использовано для получения сводного расчленения.

Глава IV. ПОЛУЧЕНИЕ СВОДНОГО РАСЧЛЕНЕНИЯ РАЗРЕЗА БУРОВОЙ СКВАЖИНЫ КАЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРОМЫСЛОВО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

§ I. Произведение расчленений. Формирование характеристических чисел (комплексных кодов)

В результате сингулярного расчленения (по одной каротажной кривой) мы, в общем случае, получаем: а) абсциссы выделенных характерных точек (массив глубин); б) качественную характеристику показаний против выделенных интервалов.

Последнюю наиболее просто представить в виде булева массива, длина которого равна числу выделенных интервалов на оси глубин. Низкие показания будем обозначать кодом "0" (*false*), высокие – кодом "1" (*true*). Графически расчленение удобно изображать в виде вертикальной прямой (оси глубин) с выделенными на ней границами пластов и кодами, поставленными в соответствие интервалам (рис.19,а). Начальную и конечную точки анализируемой части оси глубин также удобно относить к числу границ. Таким образом, расчленение задается двумя массивами – глубин $z[1:m]$ и кодов $u[1:m-1]$ (число интервалов на единицу меньше числа границ). Поскольку код, соответствующий интервалам, может быть комплексным, т.е. представлять собой некоторый булев массив $u[1:p]$, то в общем случае массив кодов является двумерным булевым массивом $u[1:p, 1:m-1]$.

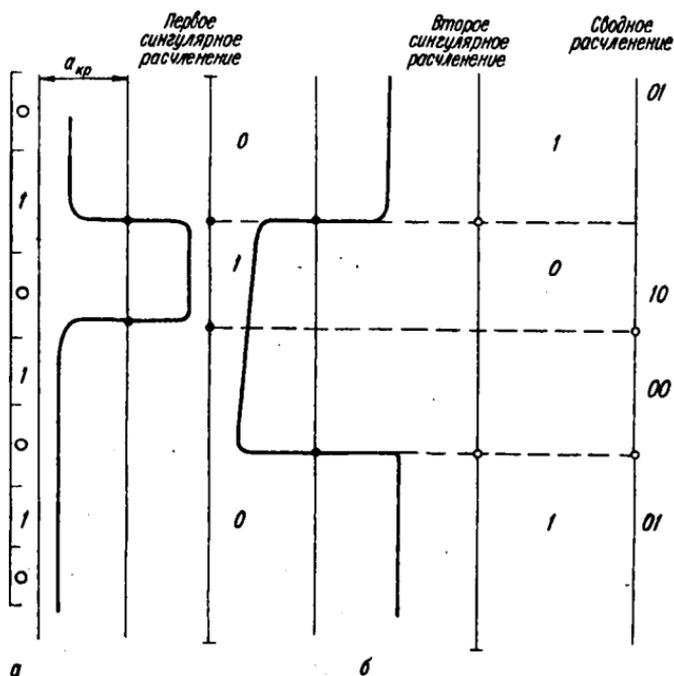


Рис.19. Схематическое изображение расчленений и произведения расчленений:

а – изображение сингулярного расчленения с кодами; б – построение сводного расчленения.

На основе двух и более расчленений нетрудно получить сводное расчленение. Сводное расчленение получается так.

1. Все выделенные границы пластов включаются в массив глубин сводного расчленения.

2. Каждому интервалу на сводном расчленении соотносится комплексный код, составленный из кодов, соответствующих этому интервалу в частных расчленениях. На рис.19,б схематично показано, как строится сводное расчленение. На кривой КС выделяется нефтеносный пласт на фоне низкоемных пород – аргиллитов и водоносных песчаников. На кривой ПС – коллектор (песчаник). На сводном расчленении выделяются три границы – кровля пласта-коллектора (есть на обоих частных расчленениях), подошва пласта-коллектора (выделена на кривой ПС) и границы между нефтеносной и водоносной частями песчаника (выделена по кривой КС). Аргиллитам, характеризующимся низкими показаниями на кривой КС (код "0") и высокими – на кривой ПС, код "1"), соотносится комплексный код "01", водоносному песчанику – код "00" (низкие показания на обоих кривых), нефтеносному песчанику – код "10" (высокие значения кажущегося сопротивления и низкие значения потенциала самопроизвольной поляризации).

Алгоритм, позволяющий на основе двух исходных расчленений:

$$z1[1:m1], u1[1:p1, 1:m1-1]$$

и

$$z2[1:m2], u2[1:p2, 1:m2-1]$$

получить их произведение:

$$z[1:m], u[1:p, 1:m-1], (p-p1+p2)$$

опубликован в работе [25]. Он широко используется в системах автоматической интерпретации промыслово-геофизических данных.

§ 2. Укрупнение сводного расчленения

Марковские формулы

Сводные расчленения часто оказываются перегруженными ненужными излишними деталями и требуют укрупнения.

Укрупнение сводного расчленения может осуществляться путем присоединения маломощных интервалов к соседним (см. алгоритм 2 в [25]), а также заменой последовательности кодов новым кодом. В последнем случае укрупнение удобно производить с помощью так называемых марковских формул (используемых при описании нормальных алгоритмов А.А.Маркова).*

* Нормальные алгоритмы А.А.Маркова играют в теории алгоритмов исключительно важную роль, поскольку любой алгоритм может быть нормализован (т.е. представлен в виде нормального алгоритма).

Комплексный код удобно изображать в виде слова (сочетания символов), а расчленение, представляющее последовательность комплексных кодов, в виде строки, например:

$$AI-B3-H2-C8-AI-AI-C8-AI-B3-AI. \quad (1)$$

Марковские формулы записываются в таком виде:

$$\left. \begin{array}{l} AI \rightarrow ZO \\ B3 \rightarrow ZO \\ H2 \rightarrow XX \\ C8 \rightarrow XX \\ ZO-ZO \rightarrow ZO \\ XX-XX \rightarrow XX \end{array} \right\} \quad (2)$$

Они имеют такой смысл. Обрабатываемая строка просматривается, и если в строке есть комбинация слов, стоящая слева от стрелки, то она заменяется комбинацией слов, стоящей справа от стрелки. Так, после обработки строки (1) в соответствии с первой марковской формулой мы получаем строку:

$$ZO-B3-H2-C8-ZO-ZO-C8-ZO-B3-ZO.$$

После обработки по формулам, получаем строки:

$$ZO-ZO-H2-C8-ZO-ZO-C8-ZO-ZO-ZO$$

$$ZO-ZO-XX-C8-ZO-ZO-C8-ZO-ZO-ZO$$

$$ZO-ZO-XX-XX-ZO-ZO-XX-ZO-ZO-ZO$$

$$ZO-XX-XX-ZO-XX-ZO$$

$$ZO-XX-ZO-XX-ZO.$$

Пусть код *ZO* соотносится с непродуктивными пластами, а код *XX* - с продуктивными. Тогда, обрабатывая кодовую строку по марковским формулам (2), мы получаем укрупненное расчленение разреза на продуктивные и непродуктивные пласты.

Если применять различные наборы марковских формул, то преобразованием одной и той же исходной кодовой строки можно получить различные расчленения, в зависимости от поставленной задачи - литологическое расчленение, расчленение разреза на коллекторы и не коллекторы, на продуктивные и непродуктивные пласты и т.д.

Алгоритмы укрупнения расчленений приведены в работе автора [25].

§ 3. Переход от комплексных кодов к литологии пласта

Замена комплексных кодов символическими

После того, как разрез расчленен на пласты и для каждого пласта оформлен комплексный код, может быть установлено соответствие между комплексным кодом и литологией. Например, в табл.4 приведены качественные характеристики пород различного литологического состава. Ставя соответственно словам "высокий" - код I, "низкий" -

код "0", словам "суженный", "увеличенный" и "номинальный" соответственно коды 00, II и 0I, эту таблицу можно представить в ином виде (табл.5). В левом столбце таблицы помещены комплексные коды, в правом - соответствующие им литологии. Связь между комплексными кодами и литологией пород обычно устанавливается по экспериментальным данным. Переход от комплексных кодов к литологии наиболее просто производится следующим образом.

I. Комплексный код заменяется символическим. Это производится в соответствие с марковской формулой вида:

$$k \rightarrow sl, \quad (3)$$

где k - комплексный код, sl - соответствующий ему символический код литологии.

Т а б л и ц а 4

Связь литологии с качественными каротажными характеристиками

П о р о д а	П о к а з а н и я		
	КС	ПС	Диаметр
Песок водоносный	Низкие	Низкие	Суженный
Песок нефтеносный	Высокие	"	"
Глина	Низкие	Высокие	Размытый
Известняк	Высокие	Низкие	Номинальный

Чтобы различать комплексный код от символического литологического, общее число разрядов, отводимых под запись комплексного кода, увеличивается на один дополнительный разряд, которому в случае комплексного кода присваивается значение I, а в случае символического - 0. Символический литологический код удобнее всего записывать в виде порядкового номера литологии. Каждому порядковому номеру литологии в массиве строк s (в массиве литологических наименований) соответствует определенная строка "песчаник", "известняк", "аргиллит" и т.д. Если символический литологический код (порядковый номер литологии) равен i , то s/i представляет соответствующее литологическое наименование.

Т а б л и ц а 5

Связь характеристических чисел с литологией

Характеристическое число	Порода
0000	Песок водоносный
I000	Песок нефтеносный
0III	Глина
II0I	Известняк

2. Два рядом стоящих литологических кода заменяются одним, причем граница, разделяющая эти два пласта, выбрасывается. Это преобразование соответствует марковской формуле вида:

$$sl - sl \rightarrow sl. \quad (4)$$

3. Если в строке кодов остались комплексные коды (для них не было установлено соответствия с определенной литологией), то они заменяются особым символическим кодом sp , которому соответствует пустая строка - в таблице окончательных результатов соответствующее место в графе "литология" остается пустой. Эта операция соответствует марковской формуле:

$$k \rightarrow sp. \quad (5)$$

В результате выполнения указанных действий строка комплексных кодов преобразуется в строку символических литологических кодов, используемую при формировании таблицы результатов машинной обработки.

§ 4. Примеры расчленения по комплексным кодам

Расчленение диаграмм микрозондов

Во многих разрезах нефтегазоносных областей по диаграммам микрокаротажа хорошо выделяются проницаемые пропластки, характеризующиеся, с одной стороны, достаточно низкими значениями кажущегося сопротивления на кривых градиент-микрозонда, с другой стороны, - достаточно большим положительным приращением, т.е. достаточно большой разностью между показаниями потенциал- и градиент-микрозонда.

Расчленяя разрез по уровенным точкам дважды (по кривой КС градиент-микрозонда и по кривой приращений) и находя произведение расчленений в зависимости от качественной характеристики показаний выделенных пластов, последним ставим в соответствие следующие комплексные коды (табл.6).

Т а б л и ц а 6

Комплексные коды, получаемые при расчленении
диаграмм микрокаротажа

Литология	Показания на кривой градиент-микрозонда	Приращение	Комплексные коды
Глины, аргиллиты и т.п.	Низкие	Небольшое	00
Плотные непроницаемые породы	Высокие	Произвольные значения	10, 11
Проницаемые пласты	Низкие	Большое	01

В случае, когда нас интересует лишь выделение пластов коллекторов, укрупнение исходного расчленения целесообразно производить с помощью таких марковских формул:

$$\begin{array}{lcl}
 00 & \longrightarrow & III \\
 10 & \longrightarrow & III \\
 II & \longrightarrow & III \\
 III-III & \longrightarrow & III
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{lcl} 00 \\ 10 \\ II \\ III-III \end{array}} \right\} \quad (6)$$

Формулы (6) обеспечивают выделение участков, характеризующихся достаточно низкими значениями КС на кривой градиент-микрзонда и достаточно высоким приращением (таким участкам будет соответствовать комплексный код 01).

Пример расчленения диаграмм микрзондов по комплексным кодам приведен на рис.20.

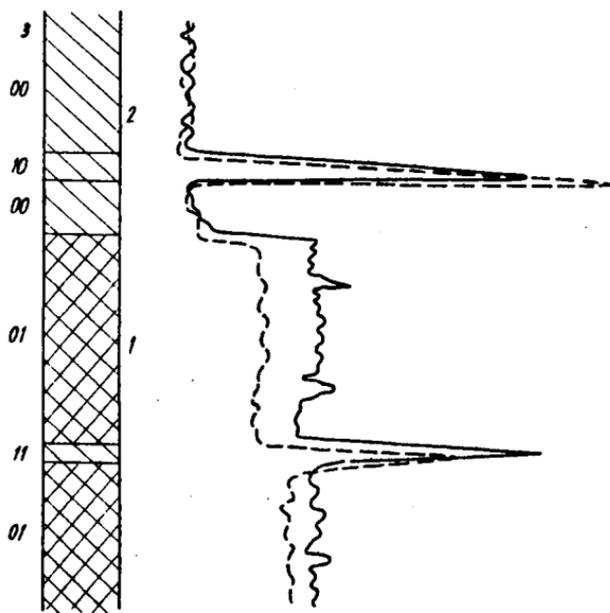


Рис.20. Расчленение диаграмм микрзонда:
 1 - проницаемые пласты, 2 - непроницаемые пласты,
 3 - комплексные коды пластов.

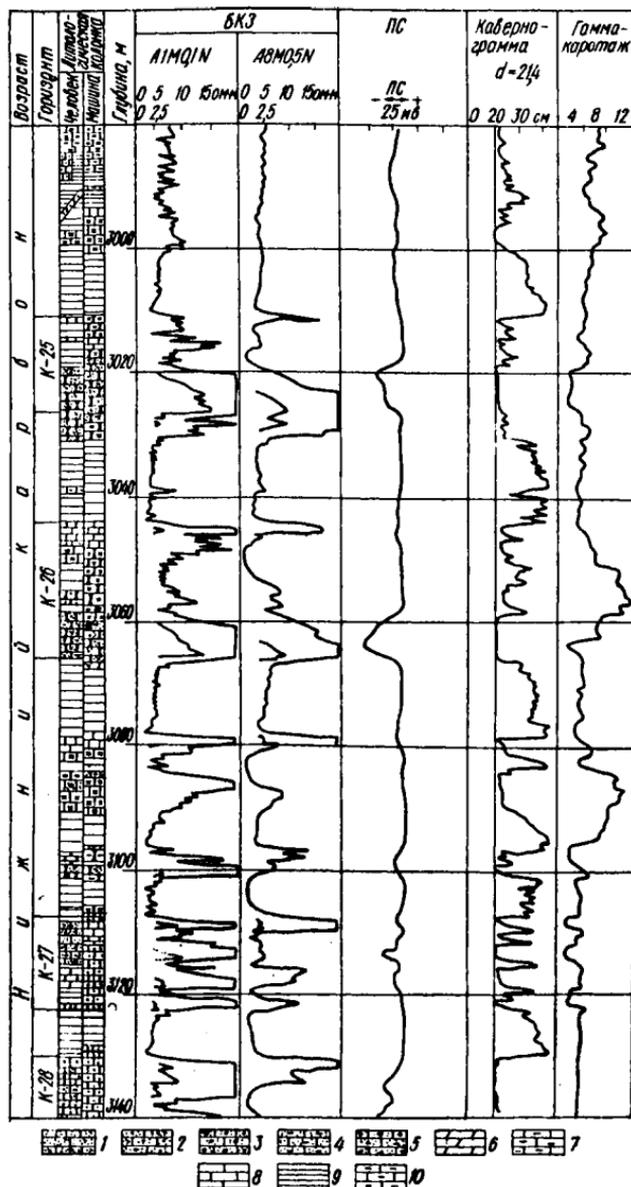


Рис. 21. Литологическое расчленение разреза по скв. Качановка-32.
Машинная интерпретация:

1 - песчаник, 2 - песчаник нефтеносный, 3 - песчаник газо-
воосный, 4 - песчаник глинистый, 5 - песчаник карбонатный,
6 - мергель, 7 - известняк глинистый, 8 - известняк, 9 - аргил-
лит, 10 - алевролит.

Расчленение продуктивного разреза по комплексу каротажных диаграмм

На рис.2I приведены результаты расчленения по комплексным кодам продуктивного разреза по скв. Качановка-32. Расчленение производилось по комплексу каротажных диаграмм, включающему такие кривые: КС, снятую градиент-зондом А1МО, I N ; КС, снятую градиент-зондом АЗМО, 5 N ; кавернограмму, гамма-каротажа.

Кривая КС малого (метрового) градиент-зонда расчленялась по четырем уровенным линиям (с критическими значениями 7,9,13 и 30 ом.м), кривая длинного градиент-зонда - по двум уровенным линиям (7 и 13 ом.м). Кривая ПС и кавернограмма расчленялись также по двум критическим значениям каждая (кривая ПС - по критическим значениям $U_{пс}^{диз} + 80 мв$ и $U_{пс}^{диз} + 90 мв$, кавернограмма - по значениям фактического диаметра 2I и 26 см при номинальном диаметре 2I,4 см). Кривая ГК расчленялась по одной уровенной линии с ординатой 5 мкр/ч. Таким образом, всего производилось II расчленений.

Соответствие между литологическими разностями и комплексными кодами дано в табл.7. Комплексные коды, представляющие собой последовательность из II двоичных разрядов, записаны в виде четырехразрядного восьмеричного числа (последний, двенадцатый разряд восьмеричного числа пуст, поэтому все коды четные).

Т а б л и ц а 7

Соответствие между комплексными кодами
и литологическим разностями (скв.Качановская-32)

Литологические разности	Комплексные коды					
Аргиллит	7700,	7702,	7502	-	-	-
Алевролит, песчаник (водоносный)	7704, 3724,	7604, 3704, 1704,	7500, 3702, 1700.	7400, 3700,	7106, 3506,	4100, 3502,
Известняк	4704, 0704,	3706, 0700,	3502, 0406,	1416, 0404,	1406, 0402,	1400, 0400.
Песчаник нефтеносный	7606, 4706, 4264, 0536, 0106,	7136, 4704, 4234, 0516, 0104.	7126, 4506, 4214, 0504,	6704, 4502, 4114, 0304,	6504, 4274, 4104, 0206,	4716, 4266, 0702, 0126,

В данном случае "пересечения" кодов нет, т.е. каждый комплексный код связан с одним литологическим типом горных пород.

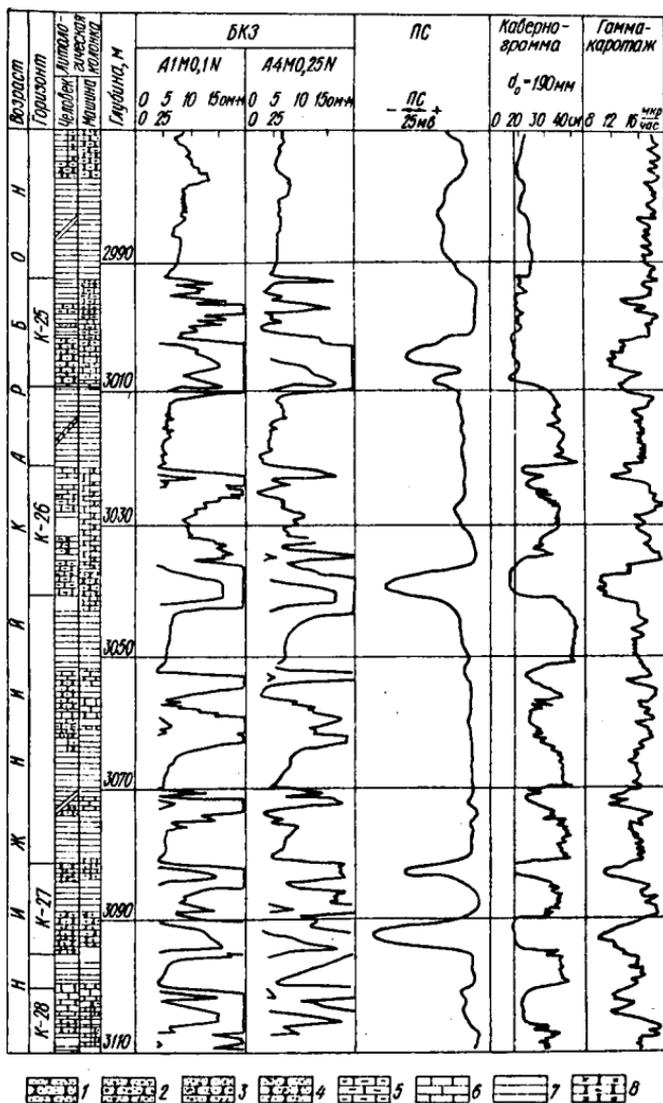


Рис.22. Литологическое расчленение разряда по скв.Качановка-33. Машинная интерпретация. Условные обозначения те же, что и на рис.21.

Следует обратить внимание на то, что общее число формируемых кодов не так уж велико. В то время, как максимально возможное число кодов равно $2 = 2048$, фактически множество сформированных комплексных кодов состоит всего из 55 кодов, т.е. составляет менее 3% максимально возможных.

На рис.22 приведены результаты литологического расчленения по скв. Качановка-33. Критические значения, использовавшиеся в данном случае, даны в табл.8, а соотношение между литологией и комплексными кодами - в табл.9. Комплекс каротажных кривых был почти тот же, но в качестве кривой длинного градиент-зонда была взята кривая КС не восьмиметрового, а четырехметрового зонда. В этом случае также производилось II формирование кода и комплексный код представлен четырехразрядным восьмеричным числом. Общее число сформированных комплексных кодов также невелико - всего 48 (тоже менее 3% максимально возможного числа кодов). При литологическом расчленении по этой скважине наблюдается "пересечение" кодов. Так, комплексные коды 3700, 0704, 0702, 0700, 0404, 0400 соответствуют как известнякам, так и алевролитам, коды 0106 и 0104 - глинистым водоносным песчаникам и известнякам. Впрочем, главный объект расчленения - продуктивные (нефтеносные) песчаники - выделяется однозначно.

Т а б л и ц а 8

Критические значения, использованные при расчленении разреза по скв.Качановка-33

Каротажная кривая	Критические значения
Кривая КС градиент-зонда А1М0, I N	9 ом·м, II ом·м, 15 ом·м, 50 ом·м
Кривая КС градиент-зонда А4М0, 5 N	8 ом·м, 14 ом·м
Кривая ПС Кавернограмма	$U_{\text{баз}} + 80$ мв; $U_{\text{баз}} + 90$ мв 19 см, 24 см (номинальный диаметр - 19 см)
Кривая ГК	13 мкр/час

Т а б л и ц а 9

Соответствие между комплексными кодами
и литологическими разностями (скв. Качановка - 33)

Литологические разности	Комплексные коды				
Аргиллит	7764	7724	7720	7704	7700
	7506	7500	7476	7436	3500
	1500	1400			
Алевролит	3724	3704	3700	3676	3566
	3562	3520	3504	1704	1576
	0704	0702	0700	0404	0400
Песчаник негли- нистый водонос- ный	0300	0116	0000	-	-
Песчаник глинистый водоносный	0106	0104	-	-	-
Известняк	3700	3504	1506	1504	1502
	0704	0702	0700	0506	0504
	0502	0500	0406	0404	0400
	0106	0104	0006	-	-
Песчаник нефте- носный	0176	0174	0164	0100	0076
	0064	-	-	-	-

§ 5. Применение специальных программ
определения типа пласта

Метод комплексных кодов является простейшим методом определения качественной характеристики (типа) пласта. В сложных случаях целесообразно применять более гибкие диагностические программы. Применению диагностических программ (программ распознавания образов) для решения геолого-геофизических и, в частности, промышленно-геофизических задач, посвящена весьма обширная литература, но мы ограничимся лишь общей характеристикой.

Задача диагностики заключается в следующем. Имеется множество S - объектов, каждый из которых может быть охарактеризован n - признаками (качественными или количественными):

$$x_1, x_2, \dots, x_n. \quad (7)$$

Совокупность признаков (7) будем называть признаковым вектором \vec{x} . Множество S разбито на m непересекающихся классов - S_1, S_2, \dots, S_m . Садана эталонная информация - некоторое (q) множество признаковых векторов $\vec{x}_{a_1}, \vec{x}_{a_2}, \dots, \vec{x}_{a_q}$, характеризующих объекты a_1, a_2, \dots, a_q , и принадлежность этих объектов к множествам S_1, S_2, \dots, S_m . Необходимо на основании эталонной информации построить решающее

правило, которое позволило бы для каждого признакового вектора \vec{x}_{a_k} ($a_k \in S$) определять, к какому из классов S_1, S_2, \dots, S_m принадлежит объект a_k . Это решающее правило должно удовлетворять также требованию, чтобы в среднем потери, связанные с неточной диагностикой, были минимальны.

Так как признаковый вектор \vec{x}_{a_i} может быть проинтерпретирован как точка признакового пространства E , то построение решающего правила сводится к выделению в пространстве E m областей $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$ таких, что если $\vec{x}_{a_i} \in \xi_j$, то принимается, что $a_i \in S_j$ (часть пространства E может остаться не соотнесенной с классами S_1, S_2, \dots, S_m ; если вектор \vec{x}_{a_i} попадает в эту часть пространства, то никакого определенного ответа не выдается).

Наиболее важное значение имеет случай, когда $m = 2$. Это так называемая "задача дихотомии". Разделение на m классов может быть в принципе произведено путем последовательной дихотомии.

Задача диагностики (классификации) является типично статистической задачей и еще с сороковых годов (работы А. Вальде, Т. Андерсона и др.) теория классификации разрабатывается математиками-вероятностниками. В послевоенные годы разработка алгоритмов диагностики (распознавания образов) стимулировалась развитием счетной техники и читающих автоматов.

В настоящее время предложено большое число (исчисляемое многими десятками и сотнями) различных алгоритмов распознавания образов. Одни из них носят явно статистический характер, в других статистический характер завуалирован и применены эмпирические (часто называемые "эвристические") методы разделения на классы.

Имеется опыт применения программ распознавания для решения промышленно-геофизических задач в большом числе районов Советского Союза - Волго-Уральской провинции, Северном Кавказе, Украине, Западной Сибири и др. [4, 10, 20, 26, 29 и др.].

Естественно, универсальных диагностических алгоритмов не существует. Эффективность алгоритмов определяется соответствием, с одной стороны, решающего правила закону статистического распределения классифицируемого множества S и, с другой стороны, учетом соотношения цен ошибок первого и второго рода.* Вопросам методики определения цен ошибок и эффективности промышленно-геофизической диагностики посвящены работы [16, 31].

* Ошибка первого рода ("пропуск цели") - когда продуктивный пласт принимается за водоносный, второго рода ("ложная тревога") - когда водоносный пласт квалифицируется как продуктивный.

Как показывает опыт, методы машинной диагностики удобно сочетать с методами визуального комплексного анализа, в частности, с методом визуального образа [36].

Программы распознавания (диагностики) могут включаться как естественная составная часть в системы автоматической обработки каротажных диаграмм.

Глава V. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

§ I. Способы перехода от характерных значений к параметрам пласта

Одним из важнейших этапов обработки промыслово-геофизических данных является переход от характерных значений, отсчитываемых с каротажных кривых (оптимальные или экстремальные значения кажущегося сопротивления, амплитуда отклонения на кривой ПС от линии глины и т.п.), к петрофизическим параметрам пласта (удельное электрическое сопротивление, пористость, нефтегазонасыщенность, проницаемость, минерализация пластовой воды и т.д.).

В простейшем случае этот переход осуществляется по сравнительно несложным формулам и с точки зрения программирования эта задача решается тривиально: в программу включается блок, реализующий вычисление по этой формуле.

Так, связь между статическим потенциалом ПС (E_s), коэффициентом потенциала ПС (K_{nc}), удельным сопротивлением пластовой воды (ρ_g) и фильтрата бурового раствора (ρ_f) во многих случаях с достаточной точностью выражается формулой

$$E_s = K_{nc} \lg \frac{\rho_f}{\rho_g}. \quad (1)$$

Следовательно, если по кривой ПС сделан отсчет E_s , а K_{nc} и ρ_f известны, то минерализация пластовой воды может быть найдена путем вычисления по формуле

$$\rho_c = \rho_f \exp(-0,43429 \frac{E_s}{K_{nc}}). \quad (2)$$

Равенство (2) получается путем решения равенства (1) относительно ρ_c , если учесть, что

$$\lg N = \frac{\ln N}{\ln 10} = 0,43429 \lg N.$$

Очень часто формулы, выражающие связь между характерными значениями и петрофизическими параметрами, находят на основании статистического анализа фактических данных, т.е. эти формулы являются уравнениями регрессии.

Например, широко известна зависимость между относительным удельным сопротивлением ρ , определяемым на основе показаний каротажа сопротивлений, и пористостью пласта

$$\rho = \frac{\sigma}{K^n}$$

Это равенство есть уравнение линейной регрессии между $\lg \rho$ и $\lg K_n$, что ясно видно, если его записать в форме

$$\lg \rho = -n \lg K_n + \lg a.$$

В последние годы все чаще используют уравнения множественной регрессии, когда искомый петрофизический параметр определяется на основе нескольких независимых величин.

Множественная корреляция в благоприятных условиях (исходные величины практически независимы между собой) приводит к так называемому "информационному скачку", когда в отдельности неинформативные или малоинформативные исходные величины в совокупности позволяют со сравнительно высокой точностью определять искомый параметр [45].

К сожалению, далеко не всегда переход от исходных величин к искомому параметру удается свести к вычислению по сравнительно несложным формулам, найденным теоретически или на основе статистического анализа. Очень часто при интерпретации промыслово-геофизических данных приходится использовать громоздкие графики и таблицы, полученные либо экспериментально, либо теоретически - путем осуществления достаточно сложного вычислительного процесса, повторение которого при автоматической обработке данных нежелательно, так как это связано с существенными затратами машинного времени. В этом случае приходится либо заносить в память ЭЦВМ необходимую информацию в виде таблиц и при интерпретации промыслово-геофизических данных применять специальные алгоритмы табличного поиска, либо аппроксимировать экспериментальные или теоретические зависимости достаточно простой для расчета формулой.

Оба указанных пути имеют преимущества и недостатки. Так, использование аппроксимирующих формул позволяет существенно сократить машинное время в процессе интерпретации данных. Однако получение этих формул требует очень большой подготовительной работы по составлению программ аппроксимации и реализации их на ЭЦВМ. При интерпретации на основе аппроксимирующих формул появляется дополнительная, "аппроксимационная", погрешность. Область применения аппроксимирующих формул существенно уже области применения таблиц, на основе которых они получены. Их использование в алгоритмах оказывается значительно менее гибким (например, обратный поиск практически оказывается невозможным).

На данном этапе при машинной интерпретации чаще всего используются алгоритмы табличного поиска, они просты и практичны - их подготовка и внедрение сопряжено с минимумом дополнительных работ. Алгоритмы табличного поиска описаны в работе автора [22].

§ 2. Интерпретация кривых каротажного зондирования

С п о с о б ы и н т е р п р е т а ц и и к р и в ы х Б К З

Боковое каротажное зондирование сводится к записи кривых кажущегося сопротивления зондами различной длины. В настоящее время почти всегда БКЗ производится градиент-зондами. Задачей количественной интерпретации данных БКЗ является определение геоэлектрического разреза в окрестности исследуемой скважины. Построение геоэлектрического разреза сводится к такой процедуре: разрез разбивается на пласты, против пластов отсчитываются характерные замеры КС. Затем совокупность характерных значений, отсчитанных против пласта с кривых КС зондов различной длины (так называемая фактическая кривая каротажного зондирования или, точнее, фактический вектор каротажного зондирования), сопоставляется с теоретическими (палеточными) значениями. В результате находят геоэлектрические параметры пласта - удельное сопротивление неизменной части пласта, диаметр и удельное сопротивление зоны проникновения, а в тех случаях, когда имеет место эквивалентность, определяют параметры зоны проникновения U и A . Этот путь интерпретации получил название метода палеточной интерпретации. В настоящее время метод палеточной интерпретации широко используется при количественном истолковании замеров БКЗ. В то же время стали очевидны ограничения, с которыми сталкивается этот метод интерпретации - при частом чередовании пластов число параметров разреза велико и необходимое количество палеточного материала практически невозможно подготовить.

Предложены [52] и иные, непалеточные, методы интерпретации, основанные на пересчете замеренных в скважине кривых в геоэлектрический разрез на основе численного решения так называемых обратных задач математической физики. Однако эти методы еще находятся в состоянии разработки.

В данной книге мы остановимся лишь на палеточных методах интерпретации данных БКЗ.

При интерпретации данных БКЗ сейчас применяют два типа палеток - палетки БКЗ для пласта неограниченной мощности и ЭКЗ для пластов малой мощности. Для интерпретации по палеткам БКЗ строится "фактическая кривая БКЗ" - отсчитываются оптимальные значения с кри-

вой КС зондов различной длины. При обычной ("ручной") интерпретации фактическая кривая БКЗ сопоставляется с теоретическими кривыми БКЗ и в результате такого сопоставления находится палеточная кривая, наиболее соответствующая фактической.

Против тонких пластов оптимальные значения зачастую нельзя отсчитать; в этом случае в качестве характерных отсчитывают экстремальные значения – максимальные ($\rho_K^{\text{макс}}$) и минимальные ($\rho_K^{\text{мин}}$). Кривая зависимости экстремальных КС от длины зонда называется экстремальной кривой зондирования. Экстремальные кривые могут быть трех типов: максимальные (кривые зависимости максимальных КС от длины зонда), минимальные (кривые зависимости $\rho_K^{\text{мин}}$ от z), а также строящиеся частично по $\rho_K^{\text{макс}}$, частично по $\rho_K^{\text{мин}}$. Последний случай, хотя и редкий, но весьма своеобразный. Он наблюдается при $\rho_n > \rho_{\text{вм}} > \rho_{\text{зп}}$ и $\rho_n < \rho_{\text{вм}} < \rho_{\text{зп}}$ (см. рис. I4, III). На практике наибольшее интерпретационное значение имеют максимальные кривые зондирования.

Экстремальные кривые зондирования сопоставляются с палетками ЭКЗ ("экстремальные кривые зондирования").

Помимо двух основных видов кривых коротажного зондирования – кривых БКЗ, соответствующих пластам неограниченной мощности и экстремальных кривых зондирования, – предложено использовать и другие кривые, не нашедшие пока широкого применения. Таковы, в частности, кривые БКЗ, строящиеся по текущим значениям против переходной зоны. Для этих кривых Н.Н. Сохраниным [43] построены специальные палетки.

С помощью ЭВМ палеточная интерпретация осуществляется двумя способами – способом экстремального (метрического) поиска и средне-взвешенного. Предварительные понятия об этих способах были даны в предыдущем параграфе, более детальное их рассмотрение приводится ниже. Начнем это рассмотрение с математической постановки задачи о количественной интерпретации данных БКЗ.

М а т е м а т и ч е с к а я м о д е л ь к о л и ч е с т в е н н о й и н т е р п р е т а ц и и п р о м ы с л о в о - г е о ф и з и ч е с к и х д а н н ы х

В общем виде задача количественной интерпретации может быть сформулирована так. Дана совокупность характерных значений x_1, x_2, \dots, x_n и априорных параметров u_1, u_2, \dots, u_3 . Связь между искомыми параметрами разреза y_1, y_2, \dots, y_m и перечисленными исходными параметрами задана системой функций:

априорными параметрами. Тройка значений $\langle \ln \frac{\rho_A}{\rho_c}, \ln \frac{\rho_n}{\rho_c}, \ln \frac{D}{d} \rangle$ - прологарифмированные относительные значения удельного сопротивления зоны проникновения и пласта, а также диаметра зоны проникновения - образуют совокупность искомым параметров геоэлектрического разреза.

Чем больше число аргументов функции, тем сложнее организация вычисления ее значений и построение таблиц, описывающих эту функцию. Поскольку, как правило, выполняется условие (II), то система, решенная относительно характерных значений \vec{x} , содержит функции, легче поддающиеся вычислению.

Пусть \vec{f} - вектор-функция, обратная вектор-функции \vec{F}

$$\vec{x} = \vec{f}(\vec{y}, \vec{u}) \quad (I3)$$

или, не выписывая \vec{u} в явной форме,

$$\vec{x} = \vec{f}(\vec{y}). \quad (I4)$$

Система (I3) содержит большее ($n > m$) число уравнений, зато число аргументов в функциях f_1, f_2, \dots, f_n меньше. Причем, сокращение числа аргументов происходит не только в силу (II), но и вследствие того, что большая часть априорных параметров оказывается фиктивной, т.е. фактически выпадает из числа аргументов.

Решенная относительно $\ln \frac{\rho_k^{(i)}}{\rho_c}$ система (I2) записывается в виде:

$$\left. \begin{aligned} \ln \frac{\rho_k^{(1)}}{\rho_c} &= f_1 \left(\ln \frac{\rho_n}{\rho_c}, \ln \frac{\rho_A}{\rho_c}, \ln \frac{D}{d}, \ln \frac{z_1}{d} \right) \\ \ln \frac{\rho_k^{(2)}}{\rho_c} &= f_2 \left(\ln \frac{\rho_n}{\rho_c}, \ln \frac{\rho_A}{\rho_c}, \ln \frac{D}{d}, \ln \frac{z_2}{d} \right) \\ &\dots \dots \dots \\ \ln \frac{\rho_k^{(s)}}{\rho_c} &= f_s \left(\ln \frac{\rho_n}{\rho_c}, \ln \frac{\rho_A}{\rho_c}, \ln \frac{D}{d}, \ln \frac{z_s}{d} \right) \end{aligned} \right\} \quad (I5)$$

Области, в пределах которых могут изменяться аргументы функции \vec{f} , заранее известны:

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq \frac{\rho_n}{\rho_c} \leq \infty \\ 1 &\leq \frac{\rho_A}{\rho_c} \leq \infty \\ 1 &\leq \frac{D}{d} \leq \infty \\ 1 &\leq \frac{z_i}{d} \leq \infty \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} \quad (I6)$$

Практически эти области можно считать конечными:

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq \frac{\rho_n}{\rho_c} \leq \left(\frac{\rho_n}{\rho_c} \right)_{\text{макс}} \\ 1 &\leq \frac{\rho_A}{\rho_c} \leq \left(\frac{\rho_A}{\rho_c} \right)_{\text{макс}} \\ 1 &\leq \frac{D}{d} \leq \left(\frac{D}{d} \right)_{\text{макс}} \\ 1 &\leq \frac{z_i}{d} \leq \left(\frac{z_i}{d} \right)_{\text{макс}} \end{aligned} \right\} \quad (I6')$$

где в качестве максимального удельного сопротивления горной породы $\left(\frac{\rho_n}{\rho_c} \right)_{\text{макс}}$ можно взять, скажем, 10^5 , а в качестве максимальной длины зонда $Z_{\text{макс}}$ - величину 10^2 .

Область, определяемую неравенствами (16), обозначим \hat{y} . Область значений, которые могут принимать величины $\ln \frac{\rho_k^{(i)}}{\rho_c}$, также ограничена:

$$0 \leq \frac{\rho_k^{(i)}}{\rho_c} \leq \frac{\rho_{\max}}{\rho_c}, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (17)$$

Область, определяемую неравенствами (17), обозначим \hat{x} . Каждой конкретной совокупности значений \hat{y}^* и $\hat{\mu}^*$, удовлетворяющей (16'), т.е. каждой точке множества \hat{y} , соответствует определенная точка \hat{x}^* во множестве \hat{x} :

$$\hat{x}^* = \hat{f}(y^*, \mu^*). \quad (18)$$

Точка представляет собой образ точки (y^*, μ^*) . Геометрическое место всех точек в \hat{x} , являющихся образами точек $\hat{y} \in \hat{y}$, есть образ множества \hat{y} , задаваемого отображением (14).

Этот образ множества \hat{y} обозначим \hat{x}_0 . Очевидно, что $\hat{x}_0 \subseteq \hat{x}$. Что касается отображения (13), то образ \hat{x}_0 не охватывает всех его множеств \hat{x} , т.е. $\hat{x}_0 \subset \hat{x}$; \hat{x}_0 является истинным подмножеством \hat{x} . При этом область \hat{x} является n -мерной, а область \hat{y} m -мерной. Поскольку, согласно известной топологической теореме, непрерывное отображение друг в друга областей с различной размерностью невозможно, при $n > m$ образ \hat{x}_0 множества \hat{y} в \hat{x} образует континуум меньшей размерности, чем \hat{x} , например, гиперповерхность. При $n = m$ \hat{x}_0 имеет ту же размерность, что и \hat{x} , образуя в области \hat{x}_0 некоторую подобласть.

Если точке $x^* \in \hat{x}$ соответствует точка $y^* \in \hat{y}$, то точка $\hat{y}^* = \hat{f}^{-1}(x^*)$ называется прообразом точки x^* . В силу того, что область \hat{x}_0 не совпадает с \hat{x} , многие точки не имеют прообраза в \hat{y} . В случае $m = n$ может быть задано решающее правило ψ , позволяющее для каждой точки $x \in \hat{x}$ констатировать ее принадлежность или непринадлежность множеству \hat{x}_0 . Правило ψ может быть определено, например, путем задания уравнений границ подобласти \hat{x}_0 . При $n > m$ почти все точки \hat{x}_0 не имеют прообраза в \hat{y} .

В силу ряда причин (погрешности измерений, неполного соответствия фактического разреза теоретическому и т.д.) фактический вектор характерных значений $\hat{x}_{\text{фак}}$ оказывается состоящим из двух компонент:

$$\hat{x}_{\text{фак}} = \hat{x}_{\text{геор}} + \hat{x}_{\text{сл}}, \quad (19)$$

где $\hat{x}_{\text{геор}}$ - значение, принадлежащее \hat{x}_0 , $\hat{x}_{\text{сл}}$ - погрешности, обусловленные неточностью измерений, неполным соответствием модели фактическому разрезу и т.д.

При избыточности замеров, т.е. при $n > m$, фактический вектор $\vec{x}_{\text{фак}}$ из-за наличия компоненты $\vec{x}_{\text{сн}}$ не попадает в область \hat{X}_0 и, таким образом, система (6) не имеет строгого решения.

Преодолеть эту трудность можно различными путями. Одна модель поиска, к рассмотрению которой мы перейдем, названа нами метрической, другая базируется на уравнивании размерностей пространств \hat{X} и \hat{Y} .

Метрическая модель поиска решения системы (6)

Предположим, что в пространстве векторов \vec{x} , т.е. на множестве \hat{X} , задана некоторая метрика - для каждой пары векторов $\vec{x}_1, \vec{x}_2 \in \hat{X}$ - определяется расстояние между ними $\delta(\vec{x}_1, \vec{x}_2)$.* Тогда в качестве решения системы (8) может быть принята величина

$$\vec{y} = \vec{y}(\vec{x}_{\text{min}}(\vec{a})), \quad (20)$$

где вектор \vec{x}_{min} удовлетворяет следующим требованиям:

$$\left. \begin{aligned} \vec{x}_{\text{min}} \in \hat{X}_0, \\ \delta(\vec{x}_{\text{фак}}, \vec{x}_{\text{min}}) = \text{min}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Говоря другими словами, в качестве решения системы (6) принимается прообраз точки \vec{x}_{min} гиперповерхности \hat{X}_0 , ближайшей к фактической совокупности характерных значений $\vec{x}_{\text{фак}}$.

Итак, мы приходим к следующей модели поиска решения системы (6). Окрестности фактического вектора $\vec{x}_{\text{фак}}$ исследуются в соответствии с метрикой δ и находится точка \vec{x}_{min} , удовлетворяющая (21). Эту модель мы будем называть метрической моделью количественной интерпретации промыслово-геофизических данных.

Следует заметить, что переход от фактического вектора $\vec{x}_{\text{фак}}$ к вектору \vec{x}_{min} позволяет в той или иной степени снизить влияние погрешности $\vec{x}_{\text{сн}}$ и это является важным преимуществом метрического способа решения системы (6). Расхождение δ между векторами $\vec{x}_{\text{фак}}$ и \vec{x}_{min} является своеобразным критерием успешности интерпретации, статистический анализ значений которого позволяет делать объективные заключения об эффективности или неэффективности применяемых методов исследования скважин и обработки получаемых данных.

Во многих случаях для целей практики вместо вектора \vec{x}_{min} достаточно найти близкий к нему вектор \vec{x}_{min}^* и затем определить соответствующий этому вектору ответ $\vec{y}_{\text{отв}}^* = \vec{y}(\vec{x}_{\text{min}}^*)$.

Найти векторы $\vec{x}_{\text{min}}(\vec{x}_{\text{фак}})$ можно различными способами.

Рассмотрим некоторые из них.

* Подробнее о метрике и метрических пространствах см. [18, 40].

Метод сети

Область \mathcal{U} покрывается некоторой сетью \mathcal{E} и для каждого узла \bar{y}_q сети находится расстояние $d(\bar{x}_{\text{фак}}, \bar{f}(\bar{y}_q))$. Узел \bar{y}_p , для которого расстояние $d(\bar{x}_{\text{фак}}, \bar{f}(\bar{y}_p))$ минимально, и принимается в качестве $\bar{y}_{\text{отб}}$.

Метод сети не всегда дает нужную точность и нередко комбинируется с другими методами. С методом сети (правда, не в чистом виде) мы сталкиваемся при интерпретации по "дробным" палеткам БКЗ.^ж Значения параметров зоны проникновения, для которых получены палетки,

$$\frac{D}{\rho_c} = 2, 4, 8, 16$$

$$\frac{\rho_a}{\rho_c} = 5, 10, 20, 40, 100, 200$$

образуют прямоугольную сеть в пространстве $\{ \ln \frac{D}{\rho_c}, \ln \frac{\rho_a}{\rho_c} \}$.

Последовательно сопоставляя совпадение теоретической и фактической кривой БКЗ, находят палетку, где это совпадение наилучшее, т.е., где расстояние $d(\bar{x}_{\text{мин}}^*, \bar{x}_{\text{фак}})$ наименьшее. Параметры зоны проникновения палетки, для которой совпадение фактической кривой с теоретической наилучшее, т.е. $\bar{y} = \bar{f}(\bar{x}_{\text{мин}}^*)$, и выдаются в качестве ответа.^{жж}

Метод сети без полного перебора

Для того чтобы избежать сплошного перебора узлов сети, в ряде случаев удается сформулировать эвристики, позволяющие сократить число проверок. Так, например, если минимум функции единственный, то перебор может быть прекращен как только будет найден узел, где значение функции d меньше, чем во всех соседних узлах.

Метод аппроксимации

Этот метод является дальнейшим развитием метода сети без полного перебора. После того, как найден узел, в котором значение d меньше, чем в соседних узлах, зависимость $d(\bar{y}) = d(\bar{x}_{\text{фак}}, \bar{f}(\bar{y}))$ аппроксимируется некоторой достаточно простой функцией, например, полиномом второго порядка, а затем находится минимум этой функции. Наиболее просто осуществляется аппроксимация и поиск минимума в случае, когда \mathcal{U} является скалярном.

^ж "Дробными" интерпретаторы называют трехслойные палетки БКЗ, в шифре которых значения параметров зоны проникновения представляются в виде дроби, например, БКЗ - 8/20 /3, 14, 19, 38/.

^{жж} В случае, когда имеет место \mathcal{U} - или A -эквивалентность, процесс интерпретации, как мы увидим далее, более сложен.

В этом случае находят три соседних узла y_{i-1} , y_i и y_{i+1} , удовлетворяющих условию:

$$\text{sign}(y_{i-1} - y_i) \neq \text{sign}(y_i - y_{i+1}) \quad (22)$$

и функция $\delta(y)$ аппроксимируется параболой:

$$\delta = ay^2 + by + c. \quad (23)$$

Абсцисса минимума параболы может быть найдена из условия

$$\frac{d}{dy} \delta = 0. \quad (24)$$

Применяя (24) к (23), получаем равенство:

$$2ay_{\min} + b = 0.$$

Таким образом,

$$y_{\min} = -\frac{b}{2a}. \quad (25)$$

Коэффициенты a , b , c параболы находят из системы трех линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} ay_{i-1}^2 + by_{i-1} + c &= \delta_{i-1} \\ ay_i^2 + by_i + c &= \delta_i \\ ay_{i+1}^2 + by_{i+1} + c &= \delta_{i+1} \end{aligned} \right\}. \quad (26)$$

Величины y_{i-1} , y_i , y_{i+1} , δ_{i-1} , δ_i и δ_{i+1} известны.

Система (26) может быть сведена к системе из двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} a(y_{i-1}^2 - y_i^2) + b(y_{i-1} - y_i) &= \delta_{i-1} - \delta_i \\ a(y_i^2 - y_{i+1}^2) + b(y_i - y_{i+1}) &= \delta_i - \delta_{i+1} \end{aligned} \right\}. \quad (26')$$

Решая (26') и подставляя в (25), получаем:

$$y_{\min} = \frac{\delta_{i-1}(y_i^2 - y_{i+1}^2) + \delta_i(y_{i+1}^2 - y_{i-1}^2) + \delta_{i+1}(y_{i-1}^2 - y_i^2)}{2[\delta_{i-1}(y_i - y_{i+1}) + \delta_i(y_{i+1} - y_{i-1}) + \delta_{i+1}(y_{i-1} - y_i)]}. \quad (27)$$

Итак, найдя три соседних узла, удовлетворяющих условию (22) и произведя вычисление по формуле (27), мы определяем искомое значение y_{\min} .

Метод параболической аппроксимации широко используется при машинной интерпретации по палеткам БКЗ и ЭКЗ.

Метод скорейшего спуска

В случае, когда вектор \vec{y} содержит несколько компонент, аппроксимация оказывается не столь удобной и приходится прибегать к методу скорейшего спуска, который заключается в следующем. В пространстве \vec{y} выбирается некоторая "начальная" точка \vec{y}_0 (нулевое приближение). Затем исследуется поведение функции $\delta(\vec{y})$ в окрестности \vec{y}_0 и находится направление, в котором эта функция убывает наиболее быстро. От точки \vec{y}_0 в этом направлении делается шаг и мы попадаем в точку \vec{y}_1 . Аналогичные действия производятся и в точке \vec{y}_1 , от которой переходят в точку \vec{y}_2 . Процесс перемещения

точки ("процесс спуска") продолжается до тех пор, пока не будет достигнут минимум функции $\sigma(\vec{y})$. Метод скорейшего спуска имеет много модификаций. Разновидность этого метода, когда спуск осуществляется по узлам дискретной сети, носит название метода дискретного спуска.

Метод скорейшего спуска особенно эффективен в том случае, когда в области \vec{y} имеется один минимум. К счастью, как показывает анализ фактических данных, в случае интерпретации кривых каротажного зондирования функция расхождения имеет единственный минимум. Пример карты расхождений $\sigma(\vec{y})$ в пространстве параметров зоны проникновения, имевшей место при интерпретации фактических кривых БКЗ, приведен на рис.23.

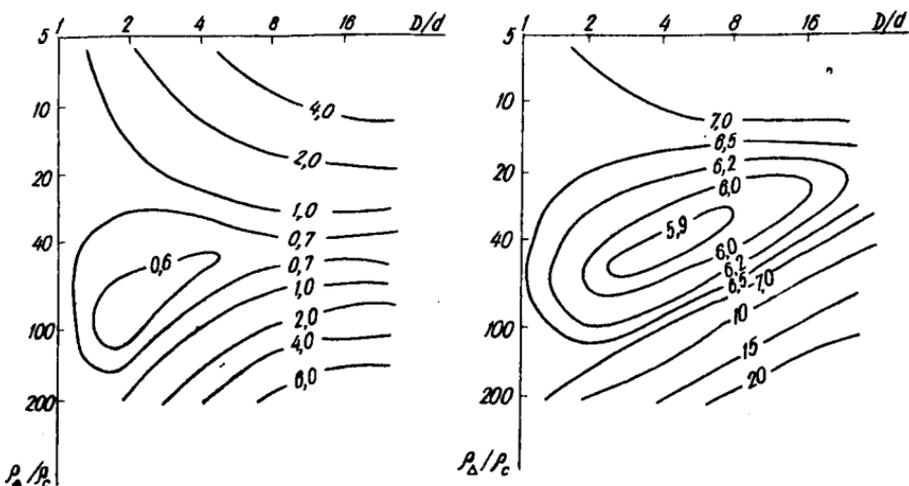


Рис.23. Карты расхождения функции $\sigma = \sigma(\vec{y})$ в пространстве параметров зоны проникновения.

Если в области \vec{y} имеется несколько минимумов функции $\sigma(\vec{y})$, то желательно найти глобальный минимум, характеризующийся наименьшим значением σ (*minimim minimim*). В этом случае вся область \vec{y} своеобразными "водоразделами" разбивается на несколько "частных" областей, из которых одна связана с глобальным минимумом, а остальные — с неглобальными, так называемыми локальными минимумами.* Метод скорейшего спуска обеспечивает

* Теоретически возможны случаи, когда глобальных минимумов несколько.

нахождение минимума, соответствующего той частной области, куда попала начальная точка, независимо от того является ли этот минимум глобальным или локальным. Это большой недостаток метода, поскольку локальные минимумы часто никакого практического значения не имеют. Чтобы добиться определения именно глобального минимума, спуск производят многократно, выбирая начальные точки либо по заранее заданной сети, либо случайным образом.

Метод оврагов

Метод оврагов – это широко известный усовершенствованный вариант метода скорейшего спуска. Геометрия поверхности $\sigma(\vec{y})$ имеет сложный характер. Очень часто наблюдаются "овраги" – вытянутые области. Осуществляя спуск обычным образом, мы "скатываемся" в овраг перпендикулярно его оси и останавливаемся, достигнув этой оси. Слабый наклон поверхности $\sigma(\vec{y})$ вдоль оси оврага при этом не удается определить. Точка же минимума, которую нужно зафиксировать, может находиться в противоположной части оврага, очень далеко от точки, где произошла остановка. "Овражный" поиск заключается в том, что спуск в овраг осуществляется не из одной, а по крайней мере из двух точек, удаленных настолько, что оказывается возможным определить направление наклона вдоль оси оврага и сделать большой шаг в этом направлении.

В связи с явлениями U - и A -эквивалентности, изолинии функции $\sigma(\vec{y})$ при интерпретации фактических кривых каротажного зондирования оказываются вытянутыми, образуя явные овраги, что приходится учитывать при разработке алгоритмов интерпретации данных БКЗ.*

Решение системы $\vec{y} - \vec{\varphi}(\vec{x}_{\text{фак}})$ методом уравнивания размерностей областей X и Y

Мы рассмотрели различные варианты решения системы (6) метрическим методом. Другой метод решения системы (6) заключается в том, что всегда принимается $n = m$. Простейший путь – сокращение замеров в скважине, так, чтобы их число строго равнялось числу параметров, подлежащих определению. В этом случае решение распадается на два этапа:

I. С помощью решающего правила Ψ констатируется возможность или невозможность получения ответа.

* Метод овражного поиска, позволяющий решать экстремальные задачи, применен для интерпретации геолого-геофизических данных. Так, Ш.А. Губерманом и И.М. Чуриновой он был применен для диагностики продуктивных пластов.

2. Вычисляя в соответствии с уравнениями $\vec{y} = \varphi(\vec{x}_{\text{фак}})$, находят искомый вектор \vec{y} .

Этот метод обладает рядом недостатков. Во-первых, из-за отсутствия "избыточности" информации влияние помех (компонента $\vec{x}_{\text{сн}}$) снизить невозможно, что снижает точность интерпретации. Во-вторых, нет объективного контроля успешности интерпретации, что не позволяет критически относиться к примененным методам исследования и обработки.

Дальнейшим развитием метода уравнивания размерностей является метод средневзвешенного. Суть его заключается в следующем. Пусть $n > m$. Образую из компонент вектора $\vec{x}_{\text{фак}}$ k векторов $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_k$, причем

$$k = \text{entier}\left(\frac{n}{m}\right) + 1.$$

Пары векторов \vec{x}_i ($i = 1, 2, \dots, k$) должны максимально отличаться друг от друга. (Если $n = km$, то ни одна из них не должна иметь одинаковых компонент. При $n < km$ некоторые пары могут содержать одинаковые компоненты, но число таких совпадений должно быть минимальным). Каждая из компонент вектора $\vec{x}_{\text{фак}}$ должна входить по крайней мере в один из векторов \vec{x}_i .

Для каждого из векторов \vec{x}_i строится векторное уравнение $\vec{y}_i = \vec{\varphi}(\vec{x}_i)$, так что на основе векторов \vec{x}_i мы получаем ответные вектора \vec{y}_i ($i = 1, 2, \dots, k$). Окончательный ответ получаем по формуле средневзвешенного:

$$\vec{y}_i^{\text{омб}} = \frac{\sum_{j=1}^k \alpha_{ij} \vec{y}_{ij}}{\sum_{j=1}^k \alpha_{ij}}. \quad (28)$$

Ниже показано, каким образом найти коэффициенты α_{ij} . Важно, что оба метода – метрический и средневзвешенный – в известном смысле эквивалентны, т.е. дают одинаковые результаты.

Эквивалентность способов метрического поиска и средневзвешенного

Как мы видели, связь между исходными величинами \vec{x} и параметрами разреза \vec{y} задается вектор-функцией:

$$\vec{x} = \vec{f}(\vec{y}),$$

т.е. системой функций:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= f_1(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ x_2 &= f_2(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ &\dots \\ x_n &= f_n(y_1, y_2, \dots, y_m) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

При интерпретации методом метрического поиска находится расхождение δ^2 между фактическим вектором \vec{x} и теоретическими векторами $\vec{x}^{теор}$. Это расхождение определяется выражением:

$$\delta^2 = \sum_{j=1}^n \beta_j (x_j - x_j^{теор})^2. \quad (30)$$

Весовые коэффициенты β_j зависят от точности измерений. Последняя может быть охарактеризована дисперсией отклонений $(x_j - x_j^{теор})$, рассматриваемых как случайные величины.

Будем считать, что зависимости (29) на участке, определяемом величиной отклонения $x_j - x_j^{теор}$, можно считать с достаточной степенью точности линейными (производными второго и более высокого порядков можно пренебрегать).

Тогда

$$x_j - x_j^{теор} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial f_j}{\partial y_i} (y_{ij}^* - y_i),$$

где y_{ij}^* - значение параметра y_i , найденное на основе интерполяционного поиска по значению x_j , и условие экстремального поиска

$$\delta^2 = \min$$

может быть записано в виде

$$\delta^2 = \sum_{j=1}^n \beta_j (x_j - x_j^{теор})^2 = \sum_{j=1}^n \beta_j \left(\sum_{i=1}^m \frac{\partial f_j}{\partial y_i} (y_{ij}^* - y_i) \right)^2 = \min. \quad (31)$$

Условие (31) приводит к системе уравнений

$$\sum_{j=1}^n \beta_j \left(\frac{\partial f_j}{\partial y_i} \right)^2 (y_{ij}^* - y_i) = 0, \quad i=1, 2, \dots, m. \quad (32)$$

Система уравнений (32) получается дифференцированием по переменным y_1, y_2, \dots, y_m и приравнованием найденного выражения нулю (в точке минимума частная производная по любой из переменных y_i должна быть равна нулю).

Решение системы (32) записывается в виде:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n \beta_j \left(\frac{\partial f_j}{\partial y_i} \right)^2 y_{ij}^*}{\sum_{j=1}^n \beta_j \left(\frac{\partial f_j}{\partial y_i} \right)^2}, \quad i=1, 2, \dots, m. \quad (33)$$

Нетрудно видеть, что (33) совпадает с выражением для средневзвешенного

$$y_i = \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij} y_{ij}^*}{\sum_{j=1}^n d_{ij}},$$

если принять

$$d_{ij} = \beta_j \left(\frac{\partial f_j}{\partial y_i} \right)^2.$$

Таким образом, определяя параметр y_i как средневзвешенное из оценок y_{ij}^* этого параметра, полученных по замерам x_j , мы

находим значения, соответствующие минимуму среднеквадратичной метрики. Отсюда следует, что осуществляя экстремальный поиск или же находя ответ по методу средневзвешенного, мы получаем одинаковые результаты, т.е. оба этих метода эквивалентны.

Определение весовых коэффициентов при вычислении расхождения между фактической и теоретической кривыми каротажного зондирования

Рассмотрим, как определяются коэффициенты β_j . Величины $\xi_j = (x_j - a_j)^2$ можно рассматривать как случайные. Тогда коэффициенты β_j должны быть определены, исходя из требования минимума дисперсии случайной величины $\Xi = \sum_{j=1}^n \beta_j \xi_j$. Последнее требование может быть записано в виде:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_i \beta_j K_{ij} = \min, \quad (34)$$

где K_{ij} - корреляционные моменты системы случайных величин ξ_i . Условие (34) приводит к системе уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \beta_s} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_i \beta_j K_{ij} \right) &= 0, \quad s=1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \beta_i &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

После преобразований, система (35) может быть записана в виде:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \beta_i (K_{nn} - K_{sn} + K_{is} - K_{in}) = K_{nn} - K_{sn}, \quad s=1, 2, \dots, n-1. \quad (36)$$

Таким образом, в общем случае коррелированных случайных величин определение коэффициентов β_j сводится к решению системы из $n-1$ линейных уравнений.

Для практики важен случай, когда величины ξ_i можно считать независимыми. Тогда вместо системы (36) имеем систему ($D_p = K_{pp}$):

$$\beta_j D_j + D_n \sum_{i=1}^{n-1} \beta_i = D_n, \quad j=1, 2, \dots, n-1, \quad (36')$$

решение которой имеет вид:

$$\beta_j = \frac{1}{D_j} \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{D_i}}. \quad (37)$$

Следовательно, весовые коэффициенты β_j определяются дисперсией D_j . Выражение (34) в этом случае может быть записано в виде:

$$\bar{\xi} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i} \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial y_i} \right)^2 y_i^2}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{D_j} \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial y_j} \right)^2}. \quad (37')$$

Из (37') следует, что информативность метода прямо пропорциональна квадрату производной $\frac{\partial \xi_j}{\partial y_j}$ и обратно пропорциональна дисперсии D_j . Если дисперсии D_j близки друг другу, то можно принять $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 1$.

Если к тому же и различием в величине производных $\frac{\partial f_i}{\partial y_j}$ можно пренебречь, то, как следует из (37'), величина y_i находится как среднеарифметическое из замеров

$$\bar{y}_i = \frac{y_{ij}^{\phi}}{n} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^{\phi}. \quad (37'')$$

В настоящее время накоплены большие архивы билогарифмических интерпретационных бланков с результатами сопоставлений фактических кривых каротажного зондирования с палеточными кривыми. Это позволяет набрать достаточную статистику отклонений $x_j - x_j^{теор}$ и вычислить весовые коэффициенты β_j как по упрощенной формуле (37), так и более строгим способом - на основании решения уравнения (36).

Алгоритмов палеточной интерпретации кривых каротажного зондирования на языке АЛГОЛ-60 в связи с ограниченностью объема настоящей книги мы не приводим. Частично соответствующие алгоритмические тексты опубликованы в работе [22].

§ 3. Количественная интерпретация других методов каротажа (микрозонды, НК и др.)

Интерпретация данных микрокаротажа

Микрокаротаж был предложен первоначально как метод определения пористости коллекторов. Основная идея этого метода заключалась в следующем. Микрозонд должен обладать небольшой областью исследования. Поскольку он экранирован от скважины, эта область исследования будет приходиться на так называемую "промытую зону" пласта, где поры практически полностью замещены фильтратом бурового раствора, удельное сопротивление (ρ_{ϕ}) которого известно. Определив с помощью микрозонда удельное сопротивление промытой зоны (ρ_{nn}) и поделив на ρ_{ϕ} , мы получаем относительное сопротивление ("фактор пористости") ρ , так сказать, в "чистом виде":

$$\rho = \frac{\rho_{nn}}{\rho_{\phi}}.$$

Переход же от ρ к пористости представлялся тривиальным на основе формулы

$$K_n^m = \frac{\alpha}{\rho}. \quad (38)$$

Долгое время микрокаротаж был "фаворитом" в отношении определения коллекторских свойств - методика определения пористости по данным микрокаротажа широко пропагандировалась как за рубежом, так и в СССР.

Однако на практике выявился целый ряд трудностей (неполное и нестабильное экранирование от бурового раствора, сильное влияние параметров глинистой корки и т.д.) и во многих случаях точность определения пористости оказалась недостаточной. Поэтому в послед-

ние годы явно наметилось снижение практического интереса к количественной интерпретации данных микрокаротажа.

В то же время отказываться в "праве на жизнь" количественной интерпретации данных микрокаротажа было бы не только преждевременным, но и неправильным. Во-первых, методы микрокаротажа все время совершенствуются (применение гидравлического башмака и других методов более совершенного экранирования скважины; разработка новых модификаций микрокаротажа, таких как боковой микрозонд; разработка теории и, в частности, создание более совершенных методик моделирования микрокаротажа в лабораторных условиях). Во-вторых, разрабатываются методики комплексной количественной интерпретации по совокупности данных различных промыслово-геофизических методов (на основе методов множественной корреляции), позволяющих в ряде случаев получить "информационный скачок", когда порознь малоинформативные данные приводят к достаточно точной оценке интересующего нас параметра. А в том, что данные микрокаротажа информативны в отношении пористости, — сомневаться не приходится.

Алгоритм количественной интерпретации данных микрокаротажа, к описанию которого мы переходим, интересен не только сам по себе. Он является типичным алгоритмом количественной интерпретации по методу "уравненных размерностей" *, которому ранее уделялось мало внимания, но значение которого в практике интерпретации в промыслово-геофизических данных все возрастает.

При микрокаротаже (имеется в виду его обычная модификация) против пласта получают два замера — кажущееся сопротивление градиент-микрозонда ($\rho_K^{ГМЗ}$) и потенциал-микрозонда ($\rho_K^{ПМЗ}$). Удельное сопротивление глинистой корки ($\rho_{ГЛ}$) считается известным.

Палетка микрозондов позволяет по известным значениям $\frac{\rho_K^{ГМЗ}}{\rho_{ГЛ}}$ и $\frac{\rho_K^{ПМЗ}}{\rho_{ГЛ}}$ определять удельное сопротивление промытой зоны ($\rho_{ПЗ}$), отнесенное к $\rho_{ГЛ}$, и толщину глинистой корки ($h_{ГЛ}$):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho_{ПЗ}}{\rho_{ГЛ}} &= \varphi_1 \left(\frac{\rho_K^{ГМЗ}}{\rho_{ГЛ}}, \frac{\rho_K^{ПМЗ}}{\rho_{ГЛ}} \right) \\ h_{ГЛ} &= \varphi_2 \left(\frac{\rho_K^{ГМЗ}}{\rho_{ГЛ}}, \frac{\rho_K^{ПМЗ}}{\rho_{ГЛ}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Область φ изменения неизвестных параметров определяется неравенствами:

$$\left. \begin{aligned} 1,5 &\leq \frac{\rho_{ПЗ}}{\rho_{ГЛ}} \leq \infty \\ 0 &\leq h_{ГЛ} \leq 3 \text{ см} \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

* О методе "уравненных размерностей" см. § 2.

Область $\hat{\lambda}$ изменения исходных величин определяется неравенствами:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \frac{\rho_{\kappa}^{rms}}{\rho_{rH}} \leq 1,5 \\ 0 \leq \frac{\rho_{\kappa}^{rms}}{\rho_{rH}} \leq 1,5 \end{aligned} \right\}. \quad (41)$$

Уравнения (39) определяют отображение области \hat{y} на область $\hat{\lambda}$. При этом, поскольку число исходных и неизвестных параметров совпадает (топологическая размерность областей $\hat{\lambda}$ и \hat{y} одинакова), то прообраз области \hat{y} в области $\hat{\lambda}$ имеет ту же топологическую размерность, что и $\hat{\lambda}$, образуя в $\hat{\lambda}$ некоторую подобласть $\hat{\lambda}_0$. Затеяливая по своей форме фигура на палетке микрозондов (как и на других палетках, использующих метод уравненных размерностей), в пределах которой возможна интерпретация, и есть область $\hat{\lambda}_0$. Метод уравненных размерностей, как уже говорилось, предполагает решение двух задач: констатации того, что количественная интерпретация возможна (т.е. что исходный вектор попадает в область $\hat{\lambda}_0$) и определения искомых параметров.

Первая задача в алгоритме количественной интерпретации микрозондов решается следующим образом: границы области $\hat{\lambda}_0$ аппроксимируются полиномами (параболами). Для конкретного случая - палетка микрозондов ВНИИ Геофизики [41] для скважины с номинальным диаметром 7 3/4" - уравнения границ области $\hat{\lambda}_0$ - имеют вид:

Верхняя граница:

$$y_1 = \begin{cases} 5,53x^2 + 3,033x - 0,002, & \text{если } x \leq 1,5 \\ 0,04x^2 + 0,75x + 0,05, & \text{если } x \geq 1,5 \end{cases} \quad (42)$$

нижняя граница:

$$y_2 = \begin{cases} -0,287x^2 + 0,314x + 0,003, & \text{если } x \leq 2,35 \\ 1,3x^2 - 0,408x + 0,058, & \text{если } x \geq 2,35 \end{cases} \quad (43)$$

Ось x - ось $\rho_{\kappa}^{rms}/\rho_{rH}$, ось y - ось $\rho_{\kappa}^{rms}/\rho_{rH}$.

Решающее правило попадания в область $\hat{\lambda}_0$ в данном случае формулируется следующим образом. Вектор $\{x^*, y^*\} \in \hat{\lambda}_0$, если $y^* \leq y_1(x^*) \wedge y^* \geq y_2(x^*)$, где функции $y_1(x)$ и $y_2(x)$ определяются равенствами (42) - (43).

При решении второй задачи - определение ρ_{min} - сталкиваемся с трудностью, которая нам не встречалась в алгоритмах интерпретации метрическим методом: из-за геометрической сложности фигуры $\hat{\lambda}_0$ и того, что она занимает лишь часть прямоугольника $\hat{\lambda}$ нельзя представить палетку в виде прямоугольной таблицы, рассчитанной на по-

следующий интерполяционный поиск. Поэтому выходной массив (ответное поле) оформляется в виде "составного" одномерного массива, при этом положение каждой элементарной строки фиксируется массивами $ii1$ и $ii2$ ($ii1$ - массив начала строк, $ii2$ - массив конца строк). Длина j -той строки, очевидно, равна $ii2[j] - ii1[j] + 1$.

Алгоритм, реализующий количественную интерпретацию данных микрокаротажа, описанный на языке АЛГОЛ-60, приведен в работе [28].

На рис.24 приведены результаты машинной интерпретации диаграмм микронзондов по скважинам Краснополянского газового месторождения (Степной Крым). ЭЦВМ выделила проницаемые участки $*$, определила удельное сопротивление промытой зоны ρ_m и сделала оценку пористости по формуле: $K_n = \frac{1}{\sqrt{\rho}}$ (частный случай формулы (38), соответствующий $a = 1$, $m = 2$). Для одной скважины (скв.2) из-за некачественности материала количественная интерпретация оказалась невозможной (исходные векторы выходили за пределы области X'_0).

Интерпретация данных радиоактивного каротажа. Трансформация каротажных кривых в кривые кажущейся пористости и кажущейся нефтегазонасыщенности

Количественная интерпретация данных радиоактивного каротажа отличается тем, что она, как правило, всегда требует предварительного преобразования исходных диаграмм. Это преобразование предусматривает.

1. Внесение поправки за инерционность аппаратуры в соответствии с дифференциальным уравнением

$$J' = J + \zeta \frac{dJ}{dz},$$

где J и J' - неисправленные и исправленные показания РК; ζ - "интервал осреднения" (выраженное в метрах произведение скорости радиоактивного каротажа на постоянную времени интегрирующей ячейки $\zeta = v(\tau)$).

2. Внесение поправок за нелинейность по формуле

$$J'' = \frac{J'}{1 - \zeta_p J'},$$

где ζ_p - разрешающее время; J' и J'' - интенсивность до и после внесения поправки. ЖК

* О выделении проницаемых участков по диаграммам микрокаротажа см. § 4 гл.IV.

ЖК Аппаратура ДРСТ имеет специальное счетно-решающее устройство, автоматически вводящее поправку за нелинейность в процессе каротажа.

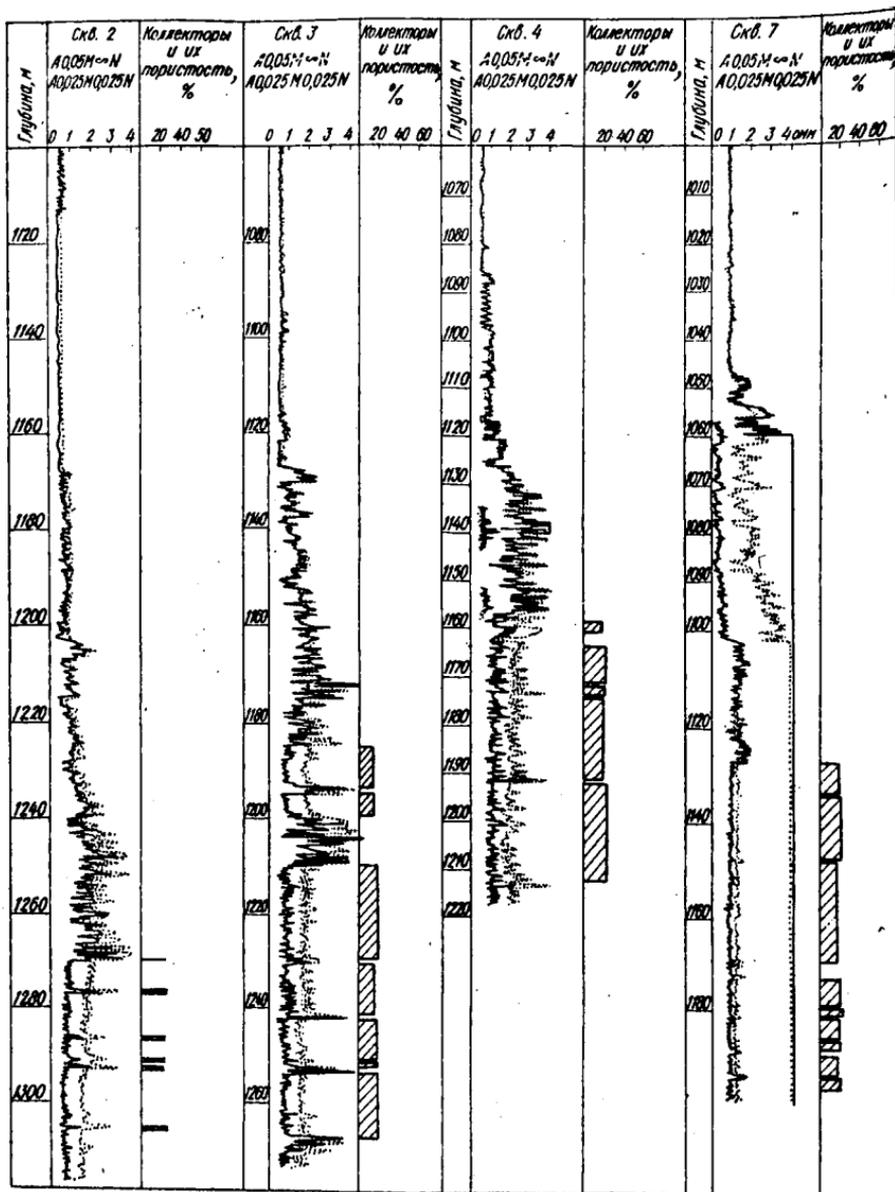


Рис. 24. Результаты машинной интерпретации диаграмм микрозонцов по скважинам Краснополянского газового месторождения (Степной Крым).

3. Вычитание из показаний НГК фона ГК по формуле:

$$J''' = J'' - \alpha J_{ГК},$$

где α_p — коэффициент, учитывающий различие чувствительности индикаторов ГК и НГК.

4. Дробно-линейное преобразование:

$$J'' = \frac{J''' - J_{100}}{J_1 - J_{100}},$$

где J_{100} — показания в воде; J_1 — показания в плотном пласте с $K_n = 1\%$.

Показания нейтронного гамма-каротажа в благоприятных условиях (чистые, неглинистые известняки и др.) позволяют оценить пористость пласта. Хорошие результаты в ряде случаев дает методика определения газонасыщенности по НГК.

Пористость по НГК определяется на основе экспериментальных исследований на специальных моделях. Помимо пористости показания нейтронного гамма-каротажа зависят от ряда других параметров — диаметра скважины, минерализации бурового раствора, толщины глинистой корки:

$$K_n = f(J, h_{ГК}, \rho_c, d_c). \quad (44)$$

Зависимость (44) легко представить в виде таблицы с четырьмя входами и алгоритмически определение пористости сводится к интерполяционному поиску.

Из-за небольшого радиуса области исследования замеры на расстоянии шага квантования в первом приближении можно считать независимыми. Это позволило предложить методику "поточечной" трансформации кривой НГК в кривую пористости [30].

Приведем один из наиболее простых алгоритмов такой трансформации.*

А л г о р и т м I

```

begin integer n, n1, n2, n3, n4;
begin real array НГК, ГК, КВ [1:n],
      ГТ [1:n1], hГК [1:n2], Rc [1:n3], dc [1:4], Kn1 [1:n1, 1:n2, 1:n3,
      1:n4];
real v, tau, delta, alpha, J1, J100, Rc, dc;
for i := n-1 step -1 until 1 do
begin НГК[i] := dzetaх(НГК[i] - НГК[i+1]) / delta;
      НГК[i] := НГК[i] - alpha * ГК[i];
      НГК[i] := (НГК[i] - J100) / (J1 - J100);
      hГК[i] := (КВ[i] - dc) / 2;

```

* Более сложные алгоритмы описаны в работе [30].

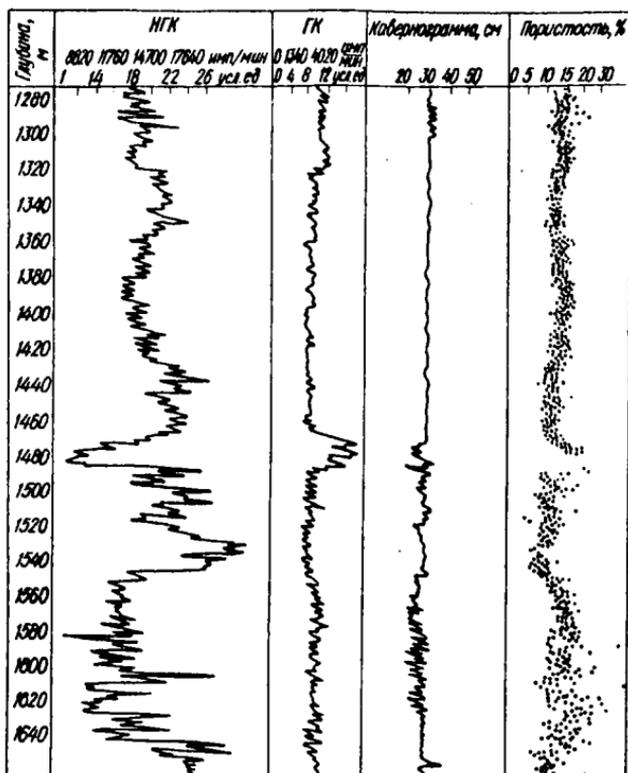


Рис. 25. Результаты машинной обработки диаграмм радиоактивного каротажа. Красноильская площадь (Западно-Украинская нефтегазоносная провинция).

Инт Поиск (НГК[i], hrk, Rc, dc, JT, hrkT, RcT, dcT, KnT, НГК[i])

Поле: (4) end.

На рис. 25 показаны результаты машинной обработки диаграмм радиоактивного каротажа по одной из скважин Красноильской разведочной площади (Западно-Украинская нефтегазоносная провинция). За исключением отдельных прослоев аргиллитов разрез представлен известняками. Кривая НГК преобразована в кривую пористости (при обработке ЭВМ использовали также кривую ГК, кавернограмму и соответствующий палеточный материал). Против глин пористость не определялась - им соответствуют пропуски на диаграмме пористости.

Характерно, что полученная диаграмма пористости отмечает различную степень разброса (дисперсии) значений N_p против разных пластов. Можно полагать, что известняки с интергранулярной пористостью

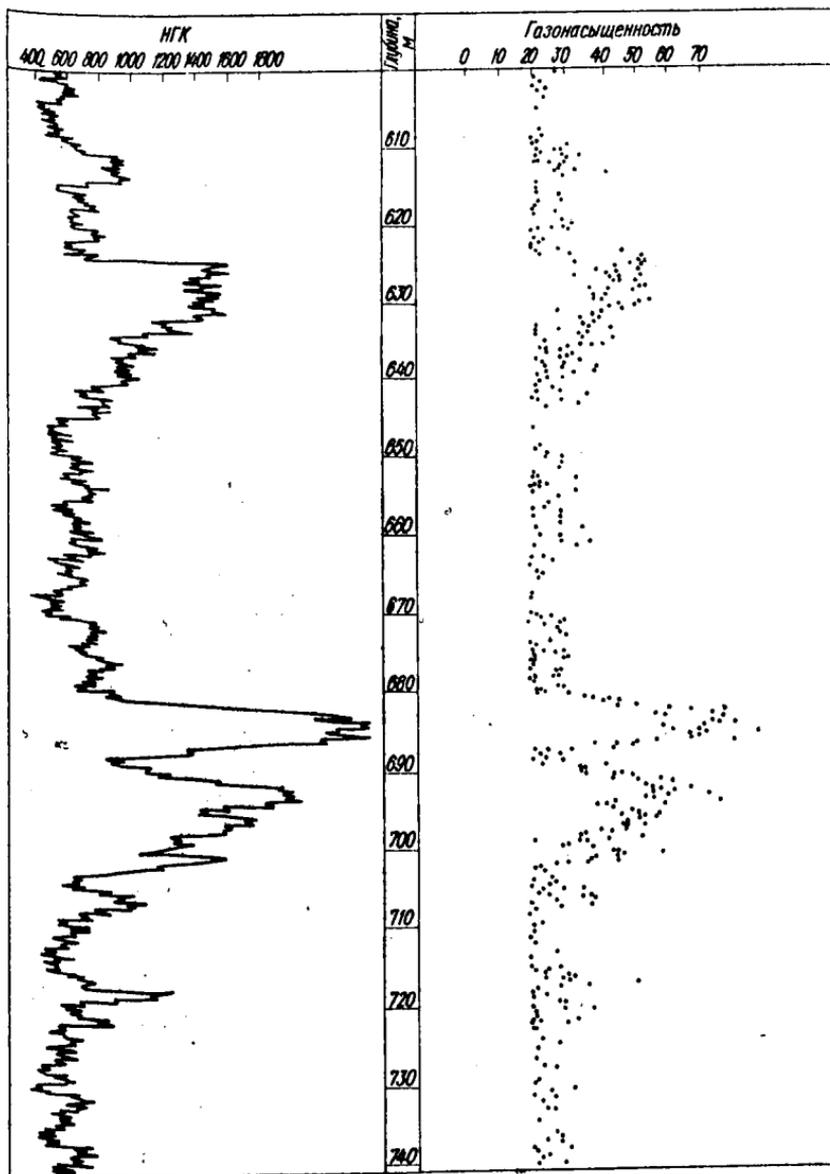


Рис.26. Трансформация диаграмм НПК в кривую газонасыщенности скв. Газли-225.

характеризуются меньшим разбросом значений K_n , в то время как известняки с кавернозной пористостью – большим.

На рис.26 приведены результаты машинной обработки кривой нейтронного гамма-каротажа против мощной толщи газоносных песчаников (месторождение Газли). Кривая НГК преобразована в кривую газонасыщенности. Малопористым пластам, характеризующимся отсутствием газа или малым его содержанием на графике газонасыщенности, соответствуют пропуски – содержащийся в них газ при подсчете запасов не принимается во внимание.

В связи с внедрением машинной обработки сплошное ("поточечное") преобразование каротажных кривых в кривые коллекторских свойств в последнее время применяется все шире (при ручной обработке осуществлять такие преобразования в больших объемах практически невозможно).

По ряду причин (статистический характер связей между коллекторскими свойствами и регистрируемыми при каротаже величинами, влияние соседних участков разреза на показания в данной точке, погрешность измерений и обработки и т.д.), нередко носящих систематический характер, получаемые в результате такой трансформации кривые коллекторских свойств во многих случаях являются фактически кривыми кажущихся коллекторских свойств (кривыми кажущегося параметра) подобно тому, как регистрируемая при каротаже сопротивлений кривая является кривой не удельного электрического сопротивления, а кажущегося. Эту особенность обязательно нужно учитывать, чтобы избежать ошибок.

Преобразование каротажной кривой $a(z)$ или совокупности $\vec{a}(z)$ таких кривых в кривую кажущегося параметра $k(z)$ может быть записано в операторной форме:

$$k(z) = \Omega [\vec{a}(z)],$$

где Ω – оператор преобразования.

Кривая кажущегося параметра $k(z)$ в общем случае отличается от кривой фактического параметра $k_\phi(z)$:

$$k(z) = k_\phi(z) + s(z),$$

где $s(z)$ – кривая помехи.

Раскладывая $\vec{a}(z)$ на две составляющие

$$\vec{a}(z) = \vec{a}_\phi(z) + \vec{a}_s(z),$$

где

$$\vec{a}_\phi = \Omega^{-1} [k_\phi(z)],$$

Ω^{-1} – оператор, обратный Ω , можно выделить исходную помеху $\vec{a}_s(z)$ в каротажных кривых (по отношению к оператору Ω).

Строгий анализ погрешностей - $s(z)$, равно как и $\vec{a}_s(z)$ - весьма затруднен из-за сложности задачи (необходимость решения сложных дифференциальных, интегральных и интегродифференциальных уравнений, описывающих распределение геофизических полей в условиях скважины, статистический характер проблемы, усугубленный необходимостью использования для строгого решения задачи аппарата наиболее сложной и наименее разработанной в математической статистике теории нестационарных случайных функций, недостаток "эталонной" информации, в первую очередь, керновых данных и т.д.). Поэтому эффективность непрерывных трансформаций ($s(z) \approx 0$) в настоящее время может быть гарантирована в отдельных, наиболее благоприятных случаях.

При исследовании нефтяных и газовых скважин представляет интерес получение таких кривых параметра (кажущегося параметра): пористости,* проницаемости, нефтегазонасыщенности, глинистости и т.д.

Непрерывную ("поточечную") количественную интерпретацию неправильно противопоставлять поинтервальной ("попластовой"). Во-первых, расчленение разреза на интервалы необходимо и при поточечной интерпретации - для выделения интервалов для сплошной трансформации в кривую параметра (кажущегося параметра). Нужно также иметь в виду, что для пластов с большой областью исследования (длинные градиентзонды в комплексе БКЗ) поточечная трансформация вообще теряет смысл - в этом случае приходится ограничиваться попластовой интерпретацией. Во-вторых, получаемые в результате трансформации кривые параметра (кажущегося параметра), как и исходные каротажные кривые, требуют дальнейшего расчленения на пласты (выделение пластов, обладающих достаточной пористостью или нефтегазонасыщенностью и т.д.). Оба способа интерпретации имеют свои достоинства и недостатки и, в общем случае, взаимно дополняют друг друга.

§ 4. Вторичная качественная интерпретация

Представление о том, что качественная и количественная интерпретация - это два последовательные этапа обработки, весьма грубо. Практически в процессе детального анализа промыслово-геофизических материалов всегда наблюдается взаимное переплетение звеньев качественной и количественной интерпретации. После качественной интерпретации - предварительного или грубого выделения объектов и отнесения их к более обобщенным классам - следует количественная оценка параметров выделенных объектов, на основе чего происходит

* Возможно построение различных кривых пористости в зависимости от того, какой вид пористости (общей, эффективной, интергранулярной, трещинной, кавернозной, блоковой и т.д.) определяется в данном конкретном случае.

детализация разреза и более точное определение характера выделенных пластов (их литологии, коллекторской типологии и т.д.). Такое чередование, в принципе, может происходить многократно. Качественную интерпретацию, следующую за проведенным количественным анализом, будем называть вторичным качественным анализом.

Вторичный качественный анализ может быть предельно простым — отнесение пласта к числу продуктивных, если определенный в результате количественной интерпретации коэффициент нефтегазонасыщенности больше заранее заданного "критического" значения: $K_N > K_N^{(кр)}$, — но возможно использование более сложных алгоритмов диагностики (распознавания образцов). Часто алгоритмы вторичной качественной интерпретации используют конкретные геофизические особенности ситуации. В качестве примера приведем методику определения характера порового пространства известняков на основе сопоставления результатов определения пористости пласта различными способами — по данным бокового каротажного зондирования, нейтронного гамма-каротажа и керна.

Глава VI. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КАРОТАЖНЫХ ДИАГРАММ

§ I. Общее представление о системах автоматической интерпретации каротажных диаграмм

На основе алгоритмов, реализующих отдельные звенья обработки промыслово-геофизических материалов, можно разработать различные системы автоматической интерпретации данных каротажа. Под системой здесь подразумевается комплекс программ, работающих под контролем программы-диспетчера и выполняющих полностью законченный цикл работ, начиная от контроля качества исходных данных и кончая выдачей на печать конечных результатов.

Программа-диспетчер осуществляет вызовы из внешней памяти в соответствующем порядке подпрограммы обработки, справочные (например, палеточные) массивы, каротажные диаграммы и т.д., производит, если это необходимо, хранение промежуточных данных во внешней памяти, организует печать промежуточных и окончательных данных и т.д.

В секторе промысловой геофизики УкрНИГРИ разработан и разрабатывается ряд автоматических с и с т е м интерпретации промыслово-геофизических данных, а именно:

— система "С-1" количественной интерпретации диаграмм бокового каротажного зондирования для разрезов, где определение параметров тонких пластов не представляет специального интереса;

- "С-2" - литологического расчленения (с выделением продуктивных пластов) по комплексу каротажных диаграмм;
- "С-3" - обработки данных бокового каротажного зондирования, включая интерпретацию как по палеткам БКЗ, так и по палеткам ЭКЗ;
- экспериментальная система "С-4" - обработки каротажных диаграмм по угольным и железорудным скважинам;
- система "С-5" - оперативной интерпретации диаграмм геофизических исследований скважин;
- "С-6" - интерпретации каротажных диаграмм угольных скважин;
- "С-7" интерпретации каротажных диаграмм железорудных скважин и др.

Этапы работы автоматической системы таковы:

1. Предварительная обработка.

Машинная обработка промыслово-геофизических данных с помощью перечисленных систем автоматической интерпретации требует преобразования каротажных диаграмм в цифровую форму с помощью специализированных непрерывнодискретных преобразователей ("Ф-001", "Луч" и т.п.). Информация, считанная с каротажных диаграмм и записанная в цифровой форме на перфоленте, вводится в ЭВМ, где осуществляется контроль вводимой информации, выделяются сбои в записи и, если это возможно, вносятся соответствующие изменения. Массивы чисел, соответствующие каротажным диаграммам, приводятся в стандартную форму с равным числом значений между метками и согласно формату чисел, принятых для данной ЭВМ. Если качество исходной информации неудовлетворительно, она бракуется. Преобразованные в стандартную форму массивы каротажных диаграмм заносятся на магнитную ленту в заранее отводимые для них места.

2. Собственно работа системы.

Согласно заданной программе-диспетчеру режимам работы поочередно вызываются каротажные массивы, подпрограммы, палетки и т.д. и последовательно выполняются все звенья обработки, осуществляется, если это нужно, вывод промежуточных данных и печать таблиц результатов. Работа систем, как правило, не отнимает много времени и занимает 5-15 мин работы ЭЦВМ класса "Минск-22".

Рассмотрим структуру перечисленных систем.

§ 2. Система С-2 литологического расчленения

Система "С-2" рассчитана на обработку девяти каротажных кривых (двух кривых КС градиент-зонда, кривой КС потенциал-зонда, кривой каротажа ПС, кавернограммы, кривых ГК и НКГ, кривых потенциал- и

градиент-микророзондов). Отсутствие одной или нескольких кривых из перечисленного комплекса не исключит возможности работы системы, хотя и может снизить качество получаемых результатов.

Каротажные кривые обрабатываются порознь. В кривые радиоактивного каротажа вносятся необходимые поправки — учет инерционности и нелинейности аппаратуры, вычитание гамма-фона из показаний НКК и т.д. (кривые КС градиент-зонда и кривые РК преобразуются в ступенчатую кривую, последние — по желанию).

Затем производится расчленение по каждой из кривых с присвоением выделенным интервалам комплексного кода. На основе сингулярных расчленений строится сводное, которое укрупняется, согласно критерию достаточной мощности и в соответствии с марковскими формулами. По комплексным кодам сводного расчленения определяется литология и характер насыщения выделенных пластов.

Перечисленные операции осуществляются с помощью таких подпрограмм: расчленения кривой градиент-зонда, отсчета характерных значений КС, комплексной программы расчленения, статистического расчленения, отсчета базовых значений, произведения расчленений, укрупнения сводного расчленения по мощности, укрупнения сводного расчленения по формулам Маркова, трансформации таблицы соответствия комплексных кодов литологическим типом, словарного поиска, выдачи результатов на печать.

Блок-схема системы С-2 приведена на рис. 27. Рассмотрим смысл отдельных блоков.

Блок 1. Контроль и предварительная обработка первичной информации. Запись каротажных диаграмм в накопитель на магнитной ленте (НМЛ).

Блок 2. Вызов кривой КС градиент-зонда с НМЛ.

Блок 3. Расчленение кривой КС градиент-зонда.

Блок 4. Отсчет характерных значений по кривой КС.

Блок 5. Расчленение по комплексной программе.

Блок 6. Проверка, было ли сделано последний раз первое расчленение по первой кривой.

Блок 7. Проверка, нужно ли сделать второе расчленение по первой кривой.

Блок 8. Проверка, нужно ли обрабатывать вторую кривую КС градиент-зонда.

Блок 9. Вызов второй кривой КС с НМЛ.

Блок 10. Произведение расчленений.

Блок 11. Проверка, все ли расчленения обрабатываемой кривой сделаны.

Блок 12. Проверка, нужно ли обрабатывать кривую КС потенциал-зонда.

Блок 13. Вызов кривой КС потенциал-зонда с НМЛ.

Блок 14. Проверка, нужно ли обрабатывать кривую ПС.

Блок 15. Вызов кривой ПС с НМЛ.

Блок 16. Проверка, будет ли производиться расчленение кривой ПС с помощью отсчета базовых значений.

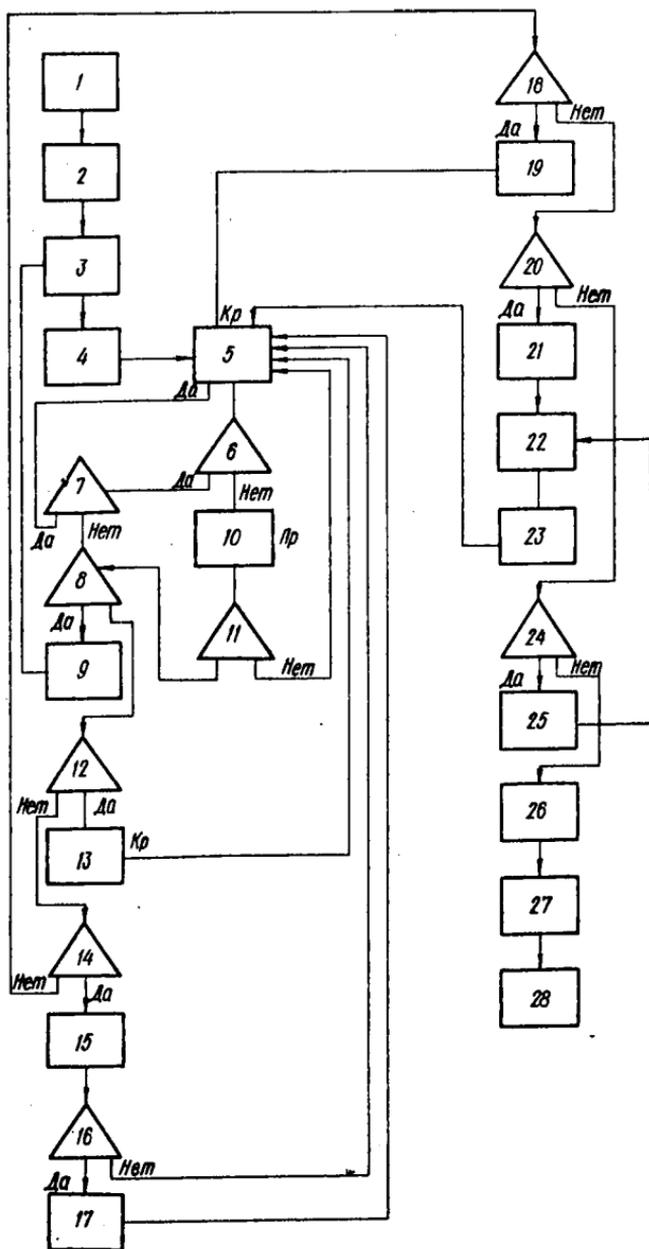


Рис.27. Блок-схема системы С-2.

Литологическое расчленение по скв. Качановка-32-р

Интервал глубины пласта, м	Литология	Характеристика пласта	Интервал глубины пласта, м	Литология	Характеристика пласта
2980 - 2985,99	Алевролит	-	3077,90	Известняк	-
2985,99 - 2986,40	Аргиллит	-	3080,39	Алевролит	-
2986,40 - 2987,80	Алевролит	-	3082,00	Аргиллит	-
2987,80 - 2988,99	Аргиллит	-	3084,00	Известняк	-
2988,99 - 2989,60	Алевролит	-	3085,20	Известняк	Нефтеносный
2989,60 - 2993,60	Аргиллит	-	3088,10	Песчаник	-
2993,60 - 2995,39	Алевролит	-	3091,00	Алевролит	-
2995,39 - 2995,79	Аргиллит	-	3096,59	Аргиллит	-
2995,79 - 3000,39	Алевролит	-	3098,39	Алевролит	-
3000,39 - 3010,39	Аргиллит	-	3099,00	Известняк	-
3010,39 - 3012,80	Алевролит	-	3101,00	Песчаник	Нефтеносный
3012,80 - 3013,40	Аргиллит	-	3101,39	Алевролит	-
3013,40 - 3013,80	Алевролит	-	3101,39	Аргиллит	-
3013,80 - 3014,20	Аргиллит	-	3105,59	Алевролит	-
3014,20 - 3016,19	Известняк	-	3107,59	Известняк	-
3016,19 - 3017,25	Алевролит	-	3109,69	Алевролит	-
3017,25 - 3018,50	Аргиллит	-	3111,30	Аргиллит	-
3018,50 - 3026,60	Песчаник	Нефтеносный	3111,30	Песчаник	Нефтеносный
3026,60 - 3031,00	Алевролит	-	3114,69	Алевролит	-
3031,00 - 3043,69	Аргиллит	-	3116,64	Песчаник	Нефтеносный
3043,69 - 3044,20	Алевролит	-	3119,40	Песчаник	Нефтеносный
3044,20 - 3046,00	Известняк	-	3120,99	Алевролит	Нефтеносный
3046,00 - 3046,60	Алевролит	-	3120,99	Песчаник	Нефтеносный
3046,60 - 3047,19	Аргиллит	-	3122,40	Алевролит	-
3047,19 - 3059,39	Алевролит	-	3123,00	Аргиллит	-
3059,39 - 3065,87	Песчаник	Нефтеносный	3128,19	Алевролит	-
3065,87 - 3066,60	Алевролит	-	3129,99	Известняк	-
3066,60 - 3077,90	Аргиллит	-	3132,79	Песчаник	Нефтеносный
			3137,00	Алевролит	-

Литологическое расчленение по скв. Качановка-33

Интервал глубины пласта, м	Литология	Характеристика пласта	Интервал глубины пласта, м	Литология	Характеристика пласта
2969, 59-2977, 18	Алевролит	-	3051, 78-3051, 99	Известняк	-
2977, 18-2992, 39	Аргиллит	-	3051, 99-3052, 98	"	-
2992, 39-2992, 98	Известняк	-	3052, 98-3053, 99	Алевролит	-
2992, 98-2996, 19	Алевролит	-	3053, 99-3056, 59	Известняк	-
2996, 19-2999, 38	Известняк	-	3056, 59-3060, 39	Аргиллит	-
2999, 39-3001, 78	Алевролит	-	3060, 39-3061, 18	Известняк	-
3001, 76-3002, 29	Алевролит	-	3061, 18-3071, 09	Алевролит	-
3002, 29-3005, 89	Известняк	-	3071, 09-3073, 39	Аргиллит	-
3005, 89-3006, 18	Песчаник глинистый	Нефтеносный	3073, 39-3080, 78	Известняк	-
3006, 18-3007, 54	Песчаник	-	3080, 78-3083, 18	Аргиллит	Нефтеносный
3007, 54-3009, 31	Песчаник глинистый	-	3083, 18-3083, 94	Песчаник	-
3009, 31-3020, 99	Известняк	-	3083, 94-3084, 39	Алевролит	-
3020, 99-3022, 78	Известняк	-	3084, 39-3088, 99	Известняк	-
3022, 78-3022, 99	Песчаник глинистый	Нефтеносный	3088, 99-3090, 63	Аргиллит	-
3022, 99-3035, 19	Песчаник	-	3090, 63-3093, 99	Песчаник глинистый	-
3035, 19-3035, 69	Аргиллит	-	3093, 99-3099, 79	Песчаник	Нефтеносный
3035, 69-3036, 84	Известняк	-	3099, 79-3012, 59	Аргиллит	-
3036, 84-3040, 59	Алевролит	-	3012, 59-3104, 58	Известняк	-
3040, 59-3042, 69	Известняк	-	3104, 58-3105, 78	"	-
3042, 69-3051, 78	Песчаник глинистый	Нефтеносный	3105, 78-3100, 38	Известняк	-
	Алевролит	-		Алевролит	-

- Блок 17. Отсчет базовых значений.
 Блок 18. Проверка, нужно ли обрабатывать кавернограмму.
 Блок 19. Вызов кавернограммы с НМЛ.
 Блок 20. Проверка, нужно ли обрабатывать кривую НГК.
 Блок 21. Вызов кривой НГК с НМЛ.
 Блок 22. Трансформация кривой РК.
 Блок 23. Статистическое расчленение.
 Блок 24. Проверка, нужно ли обрабатывать кривую ГК.
 Блок 25. Вызов кривой ГК с НМЛ.
 Блок 26. Расчленение кривых микрокаротажа.
 Блок 27. Укрупнение сводного расчленения.
 Блок 28. Определение и печать литологии.

Окончательные результаты работы системы литологического расчленения оформляются и выдаются на печать в виде таблиц 10-12.

Т а б л и ц а 12

Литологическое расчленение по скв. Каргалинская-10

Интервал глубины пласта, м	Литология	Характеристика пласта
1930,0-1944,8	Аргиллит	-
1944,8-1959,0	Песчаник	Проницаемый
1959,0-1966,2	Аргиллит	-
1966,2-1967,6	Алевролит	-
1967,6-1972,4	Аргиллит	-
1972,4-1977,0	Алевролит	-
1977,0-1981,4	Песчаник	Проницаемый
1981,4-1983,4	Алевролит	-
1983,4-1986,4	Аргиллит	-
1986,4-1993,2	Алевролит	-
1993,2-1997,6	Аргиллит	-
1997,6-2000,6	Алевролит	-
2000,6-2002,7	Песчаник	Проницаемый
2002,7-2003,5	Аргиллит	-
2003,5-2008,2	Песчаник	Проницаемый
2008,2-2012,9	Алевролит	-
2012,9-2028,4	Песчаник	Проницаемый
2028,4-2031,6	Алевролит	-
2031,6-2038,4	Аргиллит	-
2038,4-2052,6	Известняк	-
2052,6-2063,6	Аргиллит	-
2063,6-2064,6	Алевролит	-

Литологическое расчленение по скв.Кулешовская-7

Интервал глубины пласта, м	Литология	Характеристика пласта
1600 -1617	Известняк	-
1617 -1619,1	Известняк глинистый	-
1619,1 -1623,7	Известняк	-
1623,7 -1627,6	Известняк глинистый	-
1627,6 -1628,5	Известняк	-
1629,5 -1638,0	Известняк	Нефтеносный
1638,0 -1643,1	Глина	-
1643,1 -1646,0	Песчаник глинистый	-
1646,0 -1665,4	Глина	-
1665,4 -1669,2	Песчаник глинистый	-
1669,2 -1688,0	Глина	-
1688,0 -1718,8	Песчаник	Нефтеносный
1718,8 -1728,4	Глина	-
1728,4 -1730,4	Известняк глинистый	-
1730,4 -1776,6	Известняк	Нефтеносный
1776,6 -1780,2	Известняк глинистый	-
1780,2 -1820,2	Известняк	Водоносный

Таблицы 10, 11 выданы ЭЦМ как окончательный результат машинной интерпретации каротажных диаграмм, произведенной системой С-2 по скв. Качановка-32, 33 (Днепроовско-Донецкая впадина). Разрез ниже-каменноугольных отложений по этим скважинам имеет преимущественно терригенный характер. В табл. 12 приведены результаты литологического расчленения по скв. Каргалинка-10 (Куйбышевское Поволжье). Разрез (также преимущественно терригенный, табл. 13) представляет собой результат работы системы С-2 по скв. Кулешовка-7 (Куйбышевское Поволжье). Разрез в этом случае имеет преимущественно карбонатный характер.

На рис. 21, 22, 28, 29 результаты машинной интерпретации каротажных диаграмм по скв. Качановка-32, 33, скв. Каргалинка-10 и скв. Кулешовка-7 даны в графической форме.

§ 3. Системы автоматической интерпретации диаграмм боквого каротажного зондирования

Системы автоматической обработки диаграмм БКЗ предусматривают такую последовательность операций.

1. Геоэлектрическое расчленение разреза (расчленение разреза на пласты, достаточно однородные по удельному сопротивлению).
2. Отсчет характерных значений.
3. Сопоставление фактических векторов каротажного зондирова-

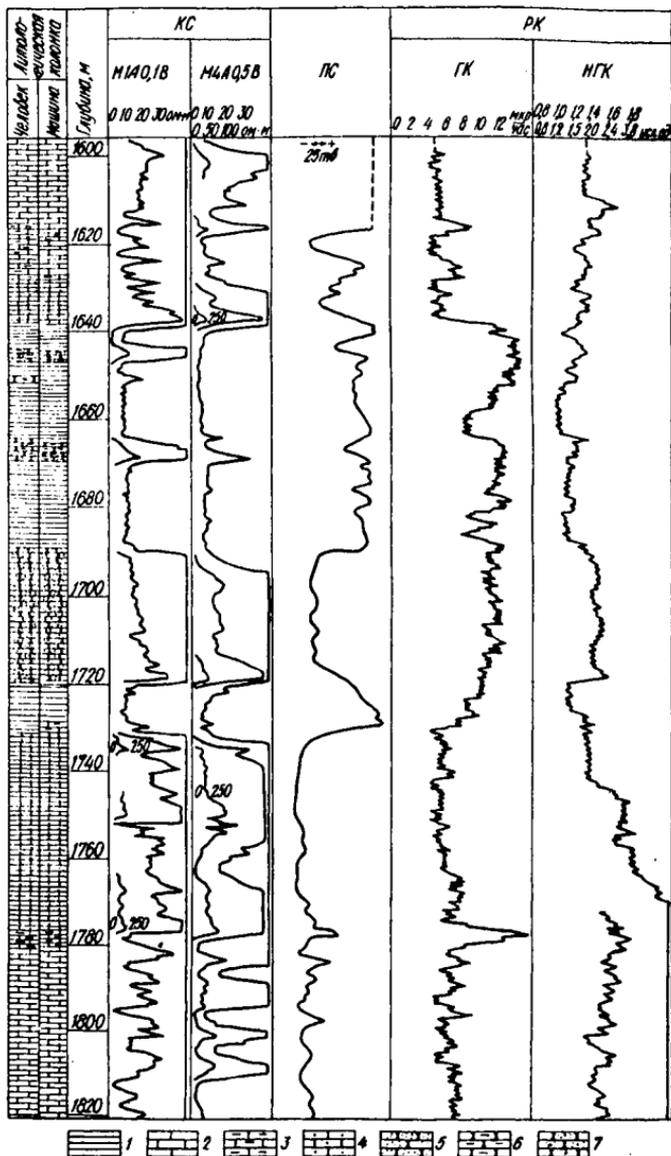


Рис.29. Литологическое расчленение разреза. Машинная интерпретация. Скв. Кулешовская-7:

1 - глина, 2 - известняк, 3 - известняк глинистый,
 4 - известняк нефтеносный, 5 - песчаник, 6 - песчаник глинистый,
 7 - песчаник нефтеносный.

ния с палеточными и определение удельного сопротивления пласта и параметров зоны проникновения.

4. Оформление таблиц результатов и выдача их на печать.

Система С-1

Эта система рассчитана только на интерпретацию по палеткам БКЗ и поэтому предназначалась для разрезов, где интерпретацией тонких пластов можно пренебречь. Однако в связи с тем, что программа отсчета характерных значений (алгоритм 7, гл.Ш) позволяет во многих случаях отсчитывать оптимальные значения КС и против тонких пластов, то они в большинстве случаев оказываются проинтерпретированными (эти данные будут приведены ниже).

Блок-схема системы С-1 приведена на рис.30. Содержание работы различных блоков таково.

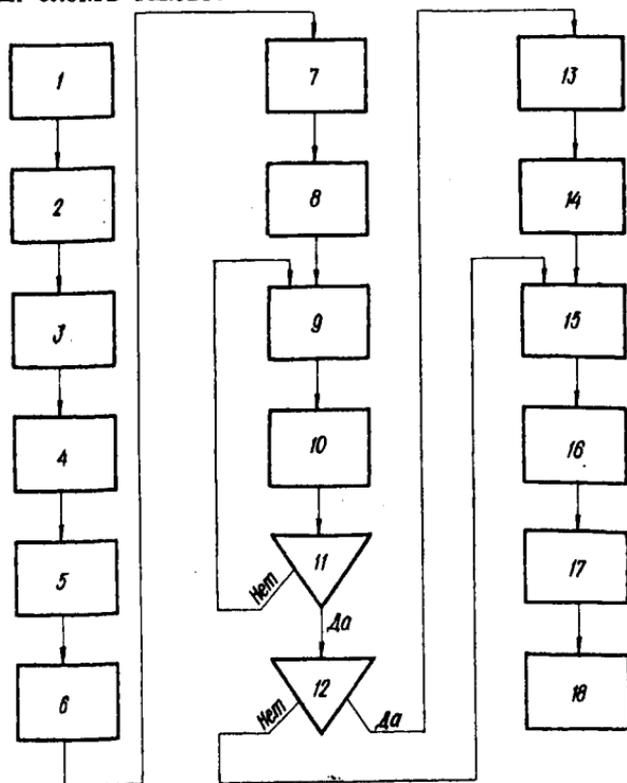


Рис.30. Блок-схема системы С-1.

Блок 1. Контроль и предварительная обработка первичной информации. Запись каротажных диаграмм в накопитель на магнитной ленте (НМЛ).

Блок 2. Вызов программы печати заголовка таблицы с НМЛ.

Блок 3. Печать заголовка таблиц.

Блок 4. Вызов программы выбора кривых с НМЛ и стандартной программой перевода из двоичной системы счисления в десятичную.

Блок 5. Вызов кривой КС опорного зонда с НМЛ.

Блок 6. Вызов программы расчленения кривой градиент-зонда с НМЛ.

Блок 7. Расчленение кривой КС.

Блок 8. Вызов программы отсчета характерных значений.

Блок 9. Вызов очередной кривой КС с НМЛ.

Блок 10. Отсчет характерных значений.

Блок 11. Проверка, все ли кривые КС обработаны.

Блок 12. Проверка наличия кавернограммы.

Блок 13. Вызов кавернограммы с НМЛ.

Блок 14. Отсчет значений фактического диаметра скважины.

Блок 15. Вызов палеток с НМЛ.

Блок 16. Ввод программы палеточной интерпретации.

Блок 17. Палеточная интерпретация.

Блок 18. Печать таблицы результатов.

Первой (нумерованной) строкой печатаются фактические длины градиент-зондов комплекса БКЗ. В качестве примера выходной таблицы системы С-1 приведены результаты интерпретации диаграмм БКЗ по скв. Кулешовка-103 (табл.14).

Работа системы С-1 опробовалась на материалах скважин Днепровско-Донецкой впадины (Качановское, Рыбальцевское и Глинско-Розбышевское месторождения), Восточного Предкавказья (месторождения Малгобек и Хаян-Корт), Куйбышевского Поволжья (Кулешовская, Карагайская и Уваровская площади), Степного Крыма (Краснополянская и Глебовская площади) и других нефтегазоносных районов. Результаты машинной интерпретации диаграммы БКЗ по ряду скважин (скв.Кулешовская-103, Малгобек-863,868,880,882 и Хаян-Корт-37) приведены на рис.31-36.

В табл.15 даны материалы обработки каротажных диаграмм по десяти скважинам, взятым для контроля из разных регионов. Из 361 выделенного пласта 306, т.е. 84,7%, были проинтерпретированы. В переводе на метраж это соотношение выглядит еще более убедительно: из 2080 м общего метража количественная интерпретация была осуществлена для 1973 м, т.е. для 95%.

Сопоставление фактических кривых БКЗ с теоретическими машина производит точнее чем человек. Важное значение имеет и то, что при машинной обработке выдается мера успешности интерпретации - расхождение между фактической и теоретической кривыми.

В то же время анализ результатов опробования системы С-1 позволил отметить такое явление. Поскольку система С-1 выдает ответ

Т а б л и ц а 14

Результаты интерпретации диаграмм БКЗ

скв. Кулешовская-103 ($ДН = 0,273, RC = 4,0$)

Интервал глубины пласта, м	DC	$R_{DIT} (R_{ЭКСП})$					RП	R3П	D	U(-A)
		Z1 0,55	Z2 1,05	Z3 2,37	Z4 4,125	Z5 8,25				
I510 - I511,2	0,26	39,9	0	0	0	0	-	-	-	-
I511,2 - I518,6	0,26	65,5	155,0	226,3	193,5	0	82,75	160	4,38	-
I518,6 - I523,37	0,25	57,0	125,39	188,9	111,0	36,6	32,95	160	2,19	-
I523,37 - I525,6	0,25	51,6	94,9	0	0	33,9	36,2	160	0,547	21,4
I525,6 - I530,8	0,26	69,7	164,3	262,0	213,5	34,7	21,37	160	4,38	-
I530,8 - I537,0	0,26	61,4	132,5	193,1	127,3	40,1	38,2	160	2,19	-
I537,0 - I538,2	0,26	41,6	0	0	0	39,0	-	-	-	-
I538,2 - I540,8	0,26	66,9	157,2	0	0	35,5	19,64	160	4,38	-
I540,8 - I541,6	0,26	22,5	0	138,7	0	0	-	-	-	-
I541,6 - I550,2	0,26	64,2	152,3	243,6	188,5	39,3	17,75	160	4,38	-
I550,2 - I557,8	0,27	59,0	121,17	138,4	76,2	0	41,26	160	1,1	-
I557,8 - I560,0	0,28	39,7	65,7	0	0	0	-	-	-	-
I560 - I566,4	0,28	62,6	140,2	201,6	149,7	0	16,0	160	2,25	-
I566,4 - I567,6	0,28	31,2	0	0	0	38,6	-	-	-	-
I567,6 - I570,6	0,28	56,9	119,5	154,9	0	41,9	42,05	160	1,13	-
I570,6 - I571,6	0,28	37,8	0	104,9	0	0	0	-	-	-
I571,6 - I578,6	0,28	65,4	148,2	210,4	143,5	38,7	18,93	160	4,56	-
I578,6 - I580,6	0,27	51,5	104,9	0	0	38,2	41,53	160	0,556	20,5
I580,6 - I589,4	0,26	71,2	173,9	307,9	287,4	45,3	33,84	160	4,38	4,3
I589,4 - I596,8	0,27	64,2	149,8	208,0	165,5	0	92,19	160	2,19	-
I596,8 - I597,6	0,28	40,7	0	0	0	0	-	-	-	-
I597,6 - I599,6	0,28	62,8	122,0	0	0	0	-	-	-	-
I599,6 - I601,6	0,28	27,39	45,4	84,7	0	0	91,75	20,0	1,12	-
I601,6 - I607,4	0,27	62,7	140,6	217,15	157,7	0	25,6	160	4,38	-
I607,4 - I609	0,27	28,2	36,8	0	0	34,3	32,8	-	-	-
I609 - I610,6	0,28	55,8	109,9	0	0	32,3	30,9	160	1,13	-
I610,6 - I615,6	0,27	39,16	0	0	0	34,5	-	-	-	-
I611 - I615,6	0,27	59,38	133,8	185,9	0	32,4	28,15	160	2,2	-
I615,6 - I622,0	0,26	83,3	224,1	437,3	496,8	0	294,1	-	-	-
I622,0 - I625,6	0,27	18,2	26,4	36,4	0	0	141,6	20,0	4,46	-
I625,6 - I630,2	0,27	36,0	61,2	49,2	0	0	299	80,0	0,552	8,6
I630,2 - I632,4	0,27	16,5	21,9	40,2	37,7	0	37,85	20,0	2,22	-
I632,4 - I634,0	0,28	28,9	49,2	37,9	36,6	0	26,91	40,0	2,29	-
I634,0 - I646,8	0,31	13,0	19,9	34,2	35,6	33,4	32,6	20,0	2,54	-
I646,8 - I649,8	0,31	20,6	47,7	44,3	42,1	40,3	36,6	40,0	1,27	-
I649,8 - I651,0	0,28	45,9	0	0	40,4	30,6	37,05	80,0	1,13	-
I651,0 - I665,2	0,30	14,2	22,65	39,14	40,9	43,7	40,07	20,0	2,44	-
I665,2 - I667,0	0,28	50,6	97,9	0	41,2	35,2	33,94	160	0,579	21,8
I667,0 - I670,0	0,29	12,7	19,7	41,2	38,8	31,1	31,37	20,0	1,19	-
I670,0 - I678,8	0,27	38,0	60,9	75,7	51,9	38,7	42,6	80,0	0,547	6,4
I678,8 - I697,8	0,26	53,6	117,2	164,7	131,3	78,9	83,5	160	0,547	13,2
I697,8 - I709,0	0,28	13,2	196,8	37,7	39,8	35,0	35,15	20,0	2,3	-
I709,0 - I717,0	0,27	60,9	156,8	293,4	283,4	39,6	27,27	160	4,42	-
I717,0 - I718,6	0,26	51,6	114,9	0	0	0	-	-	-	-
I718,6 - I728,4	0,26	74,2	205,4	445,3	505,1	0	289,7	-	-	-
I728,4 - I732,2	0,26	77,5	205,4	457,0	0	0	306,0	-	-	-
I732,2 - I736,8	0,26	64,2	158,5	286,7	0	0	1236	160	4,38	-
I736,8 - I741,0	0,26	87,4	261,6	647,5	0	0	505,0	-	-	-
I741,0 - I745,4	0,27	71,6	184,3	334,0	0	0	245	160	0,547	0,26
I745,4 - I752,6	0,27	82,6	227,1	488,2	560,1	0	323	-	-	-
I752,6 - I754,0	0,27	66,9	941,6	0	0	0	-	-	-	-
I754,0 - I758,2	0,27	78,8	184,8	306,8	0	0	237	160	0,559	0,24
I758,2 - I761,4	0,28	66,4	111,87	122,5	0	0	29,9	160	1,12	-
I761,4 - I764,2	0,28	86,1	222,4	0	0	0	-	-	-	-
I764,2 - I766,0	0,28	45,3	77,4	0	0	0	-	-	-	-
I766,0 - I775,8	0,28	70,2	183,3	345,9	331,2	68,3	56,7	160	4,53	-
I775,8 - I778	0,27	60,6	136,7	0	0	0	-	-	-	-
I778 - I779,2	0,27	43,4	0	0	0	0	-	-	-	-
I779,2 - I785,0	0,27	77,6	207,3	439,5	472,2	0	281,3	-	-	-
I785,0 - I792	0,26	67,9	153,8	230,4	149,4	0	18,3	160	4,38	-
I792 - I793,6	0,26	46,8	81,2	0	0	0	-	-	-	-
I793,6 - I795,0	0,26	70,7	174,16	174,9	0	0	93,15	160	1,095	-
I795,0 - I796,0	0,27	51,24	0	0	0	0	-	-	-	-
I796,0 - I800,2	0,27	74,0	193,2	356,2	0	0	275,7	160	0,547	0,31
I800,2 - I809,8	0,26	68,5	165,5	332,6	336,2	0	161,6	-	-	0,15

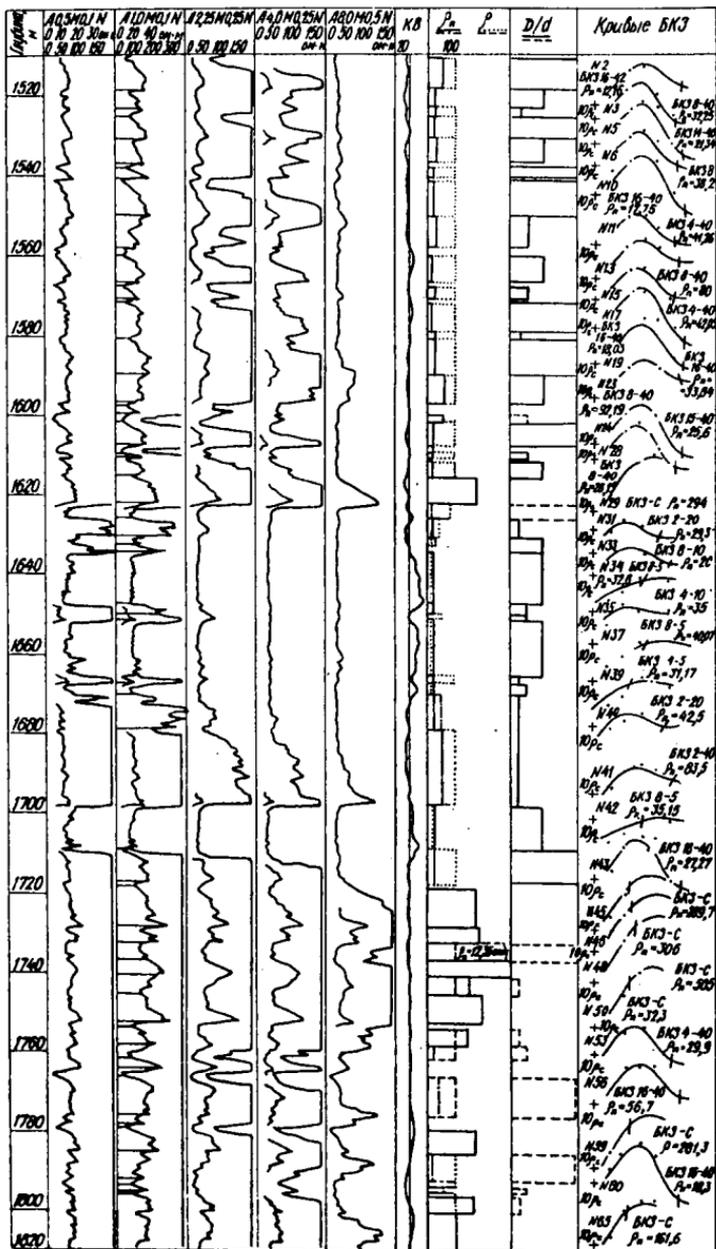


Рис.31. Машинная интерпретация БКЗ, скв. Кулешовская-103.

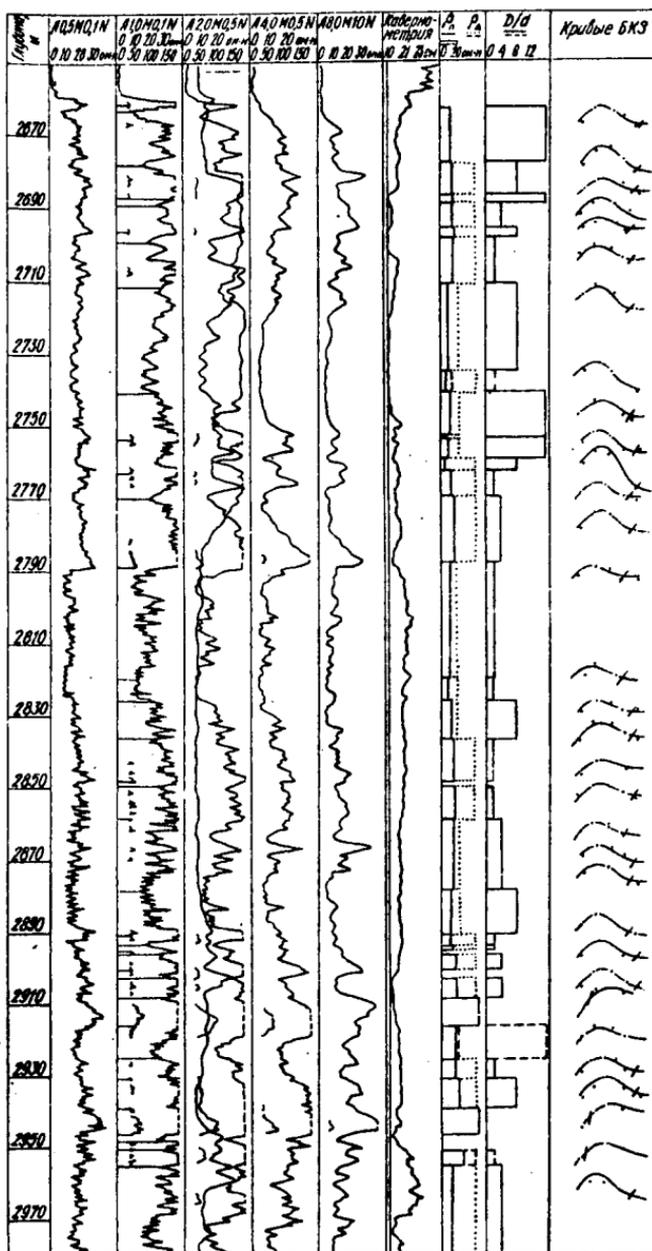


Рис.32. Машинная интерпретация БКЗ, окв. Малгобек-863.

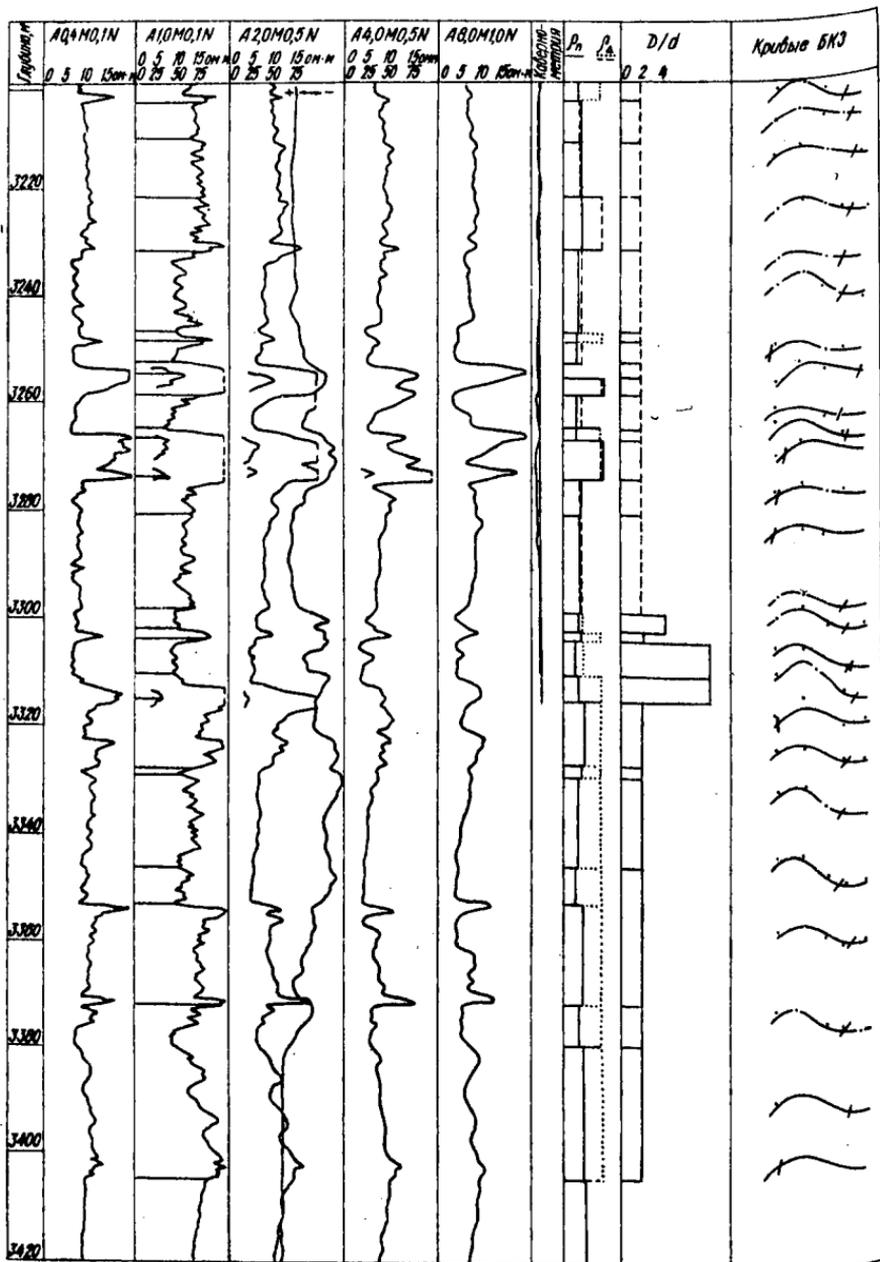


Рис.33. Машинная интерпретация БКЗ, скв. Малгобек-868.

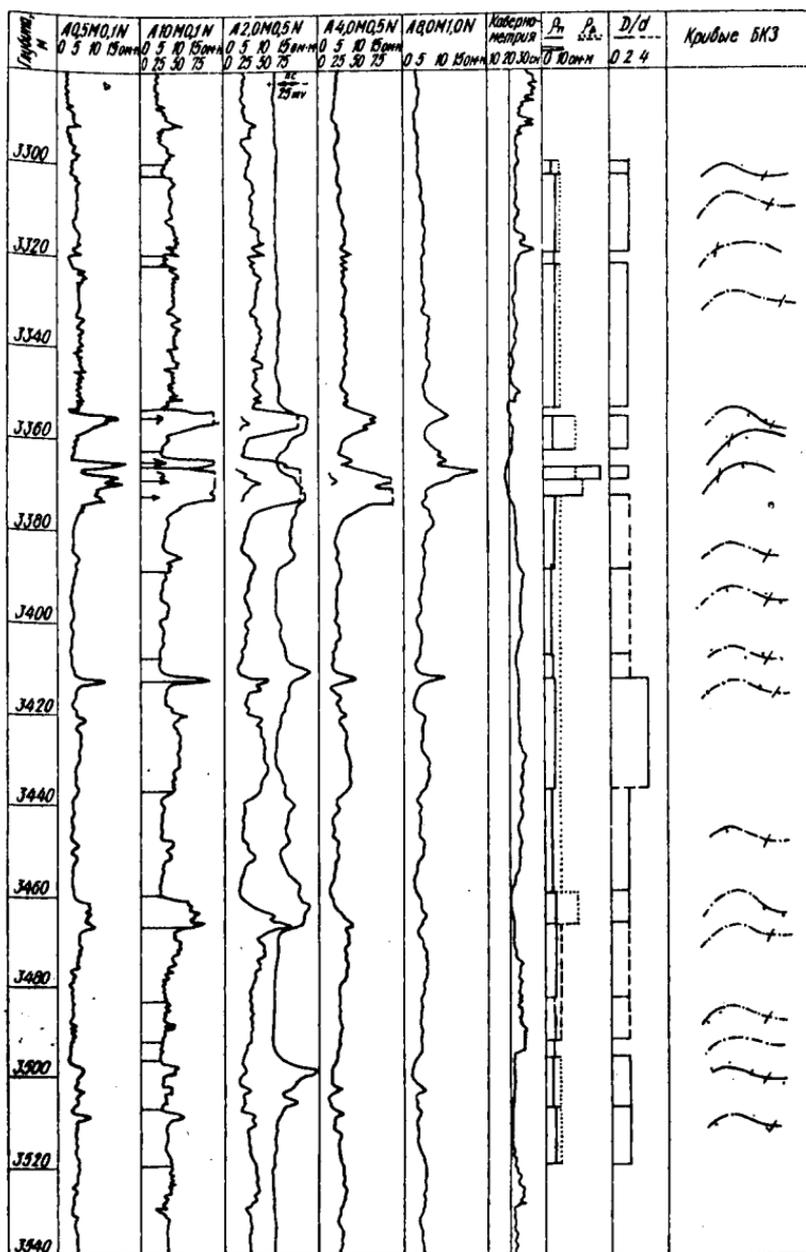


Рис.34. Машинная интерпретация БКЗ, скв. Малгобек-880.

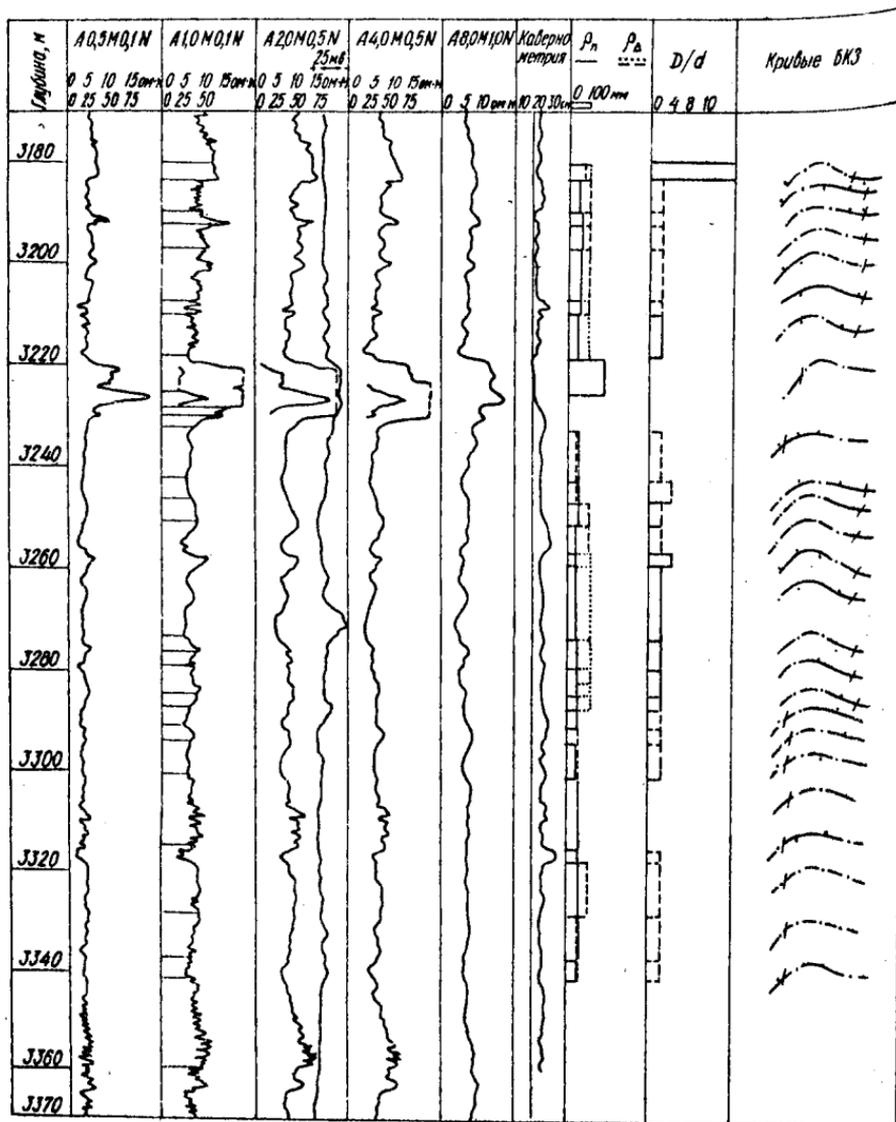


Рис.35. Машинная интерпретация БКЗ, скв. Малгобек-882.

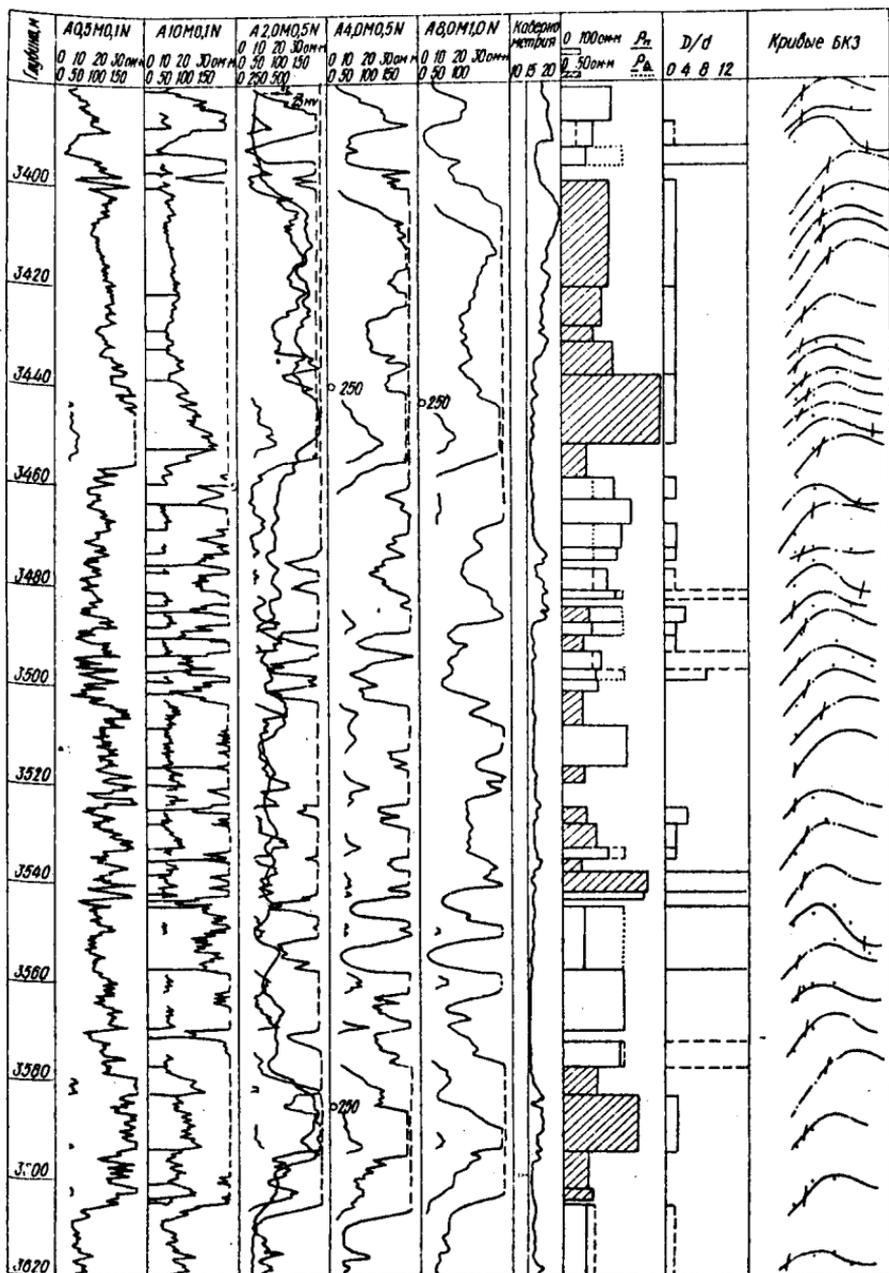


Рис.36. Машинная интерпретация БКЗ, скв. Хатын-Корт-37.

на основе нахождения теоретической кривой БКЗ, минимально уклоняющейся от фактической, из-за влияния погрешностей измерения и отчета кажущихся сопротивлений (влияния "шума") возможно констатация проникновения фильтра бурового раствора в пласт в тех случаях, когда проникновения фактически нет. Это - "шумовое" проникновение. Как видно из приведенных рисунков, во многих случаях машинная интерпретация определяет небольшое проникновение в пластах, считающихся непроницаемыми и при интерпретации обычно всегда принимаемых за пласты без проникновения.

Т а б л и ц а 15

Результаты обработки диаграмм БКЗ с помощью системы С-1

Площадь	Скважина	Количество пластов		% обработки	Метраж, м		% обработки
		выделенных в разрезе	проинтерпретированных		общий	проинтерпретированных пластов	
Кулешовская	103	65	50	77	300	276	91,6
Державская	354	90	81	90	340	324	95,3
Малгобек	868	26	24	92,4	180	174	96,5
"	863	40	32	80	320	303	94,7
"	882	29	26	89,7	180	173	96,2
"	880	21	19	90	220	210	95,4
Хаян-Корт	37	49	38	77,5	240	222	92,6
Глебовская	12	8	8	100	60	60	100
Глинская	103	15	13	86,7	100	96,5	96,5
Краснополянская	4	18	15	83,4	140	134,4	96,0
Итого:		361	306	84,7	2080	1973	95

В принципе ликвидировать "шумовое" проникновение программным путем очень просто: для этого достаточно "заглубить" интерпретацию, предусмотрев в тех случаях, когда количественная оценка расхождения между фактической и теоретической кривыми при интерпретации по двуслойной и трехслойной палетке мало отличается, выдачу результатов, полученных лишь по двуслойной палетке. Другой способ "заглубить" интерпретацию - не переходить к интерпретации по трехслойным палеткам, если при интерпретации по двуслойной палетке наблюдается удовлетворительное совпадение фактической и теоретической кривых (величина расхождения меньше некоторой заранее заданной величины).

Однако вопрос, следует ли всегда прибегать к подобному "заглублению" интерпретации, является спорным. Ведь мы до сих пор не имеем способа объективного анализа "тонкой структуры" интерпрета-

ции и при обычной интерпретации исходили из предвзятой концепции отсутствия проникновения в "непроницаемые" пласты. В действительности же может существовать много объективных процессов и явлений, приводящих к трехслойному виду кривых БКЗ объективно, а не вследствие влияния погрешностей измерений и отсчета КС, — это небольшое проникновение раствора по отдельным проницаемым прослоям, изменение удельного сопротивления части пласта, непосредственно примыкающей к скважине, под влиянием различных процессов (разбухания, растрескивания и т. д.), наконец, влияние анизотропии пласта.

Из полученных материалов можно сделать выводы. Во-первых, "малое проникновение" не носит случайного характера: в песчано-глинистых разрезах наблюдается преимущественно повышающее проникновение (приподнятые кривые БКЗ), обусловленное, по-видимому, небольшим проникновением или же анизотропией пород; в карбонатных же отложениях наблюдаются случаи пониженного проникновения (выположенные кривые БКЗ), что связано, скорее всего, с образованием трещиноватой зоны в прискважинной части пласта. Во-вторых, в некоторых случаях происходит "шумовое проникновение". Особенно уязвимы в этом отношении неполные кривые БКЗ, построенные по трем-четырем точкам. В качестве примера можно указать пласт I622-I625,6 скв. Кулешовская-I03. Литологически этот пласт представлен глинами. Машина же выдала глубокое понижающее проникновение: $\rho_d = 20$ ом·м, $D = 4,46$ м ($D/d = 16$), $\rho_n \approx 141,6$ ом·м.

Система С-3

Эта система является расширением и дальнейшим развитием системы С-1. Она предназначена для автоматической интерпретации диаграмм бокового каротажного зондирования как по палеткам БКЗ, так и по палеткам МКЗ (ЭКЗ). Система С-3 отличается от С-1 такими особенностями.

1- в систему включен самонастраивающийся блок, определяющий параметры подпрограммы расчленения градиент-зонда;

2 - подпрограмма отсчета характерных значений КС осуществляет отсчет не только оптимальных, но и экстремальных (максимальных) значений.

3. Предусмотрена возможность:

- интерпретации не только по палеткам БКЗ, но и по палеткам ЭКЗ;

- интерполяции между палетками при интерпретации фактических кривых каротажного зондирования;

- работы системы как в режиме "загруженной", так и "чувствительной" интерпретации;
- автоматической коррекции удельного сопротивления бурового раствора.

4. модифицирована выходная таблица результатов.

Блок-схема системы С-3 приведена на рис.37.

Содержание отдельных блоков таково.

Блок 1. Предварительная обработка первичной информации и запись ее на НМЛ.

Блок 2. Печать заголовка таблицы результатов.

Блок 3. Считывание с НМЛ базовой кривой КС (кривой КС, по которой производится расчленение).

Блок 4. Отсчет базовых (среднеэкстремальных) значений с кривой КС.

Блок 5. Вычисление параметров подпрограммы расчленения кривой КС.

Блок 6. Расчленение кривой КС.

Блок 7. Чтение с НМЛ очередной кривой КС.

Блок 8. Отсчет характерных значений КС.

Блок 9. Проверка, по всем ли кривым КС сделаны отсчеты.

Блок 10. Оценка удельного сопротивления пласта по показаниям наиболее длинного градиент-зонда.

Блок 11. Проверка наличия кавернограммы.

Блок 12. Перенос кавернограммы из НМЛ в оперативную память.

Блок 13. Отсчет значений фактического диаметра скважины.

Блок 14. Проверка, нужна ли коррекция ρ_c .

Блок 15. Коррекция ρ_c .

Блок 16. Интерпретация по палеткам БКЗ.

Блок 17. Интерпретация по палеткам ЭКЗ.

Блок 18. Печать таблицы результатов.

Система С-3 включает в себя такие подпрограммы: отсчета базовых значений, расчленения кривой КС градиент-зонда, отсчета характерных значений, коррекции значений сопротивления бурового раствора, интерпретации фактической кривой каротажного зондирования по палетке, количественной интерпретации по палеткам БКЗ, определения расхождения между фактическим и теоретическим векторами БКЗ, дискретного спуска, интерполяционного поиска по таблице с n -входами, интерполяционного поиска по таблице с одним входом, определения расхождения между фактическим и теоретическим векторами ЭКЗ, количественной интерпретации по палеткам ЭКЗ.

Общие параметры С-3 таковы: объем около 18 тыс. машинных слов (3 тыс. командных и 15 тыс. машинных слов палеточной информации). Для работы системы нужна память свыше 40 тыс. слов - 8 тыс. слов оперативной памяти (ОЗУ) и 17 зон (34 тыс. слов) накопителя на магнитной ленте. Время обработки данных в зависимости от режима работы системы - 5 - 20 мин. ЭЦВМ "Минск-22".

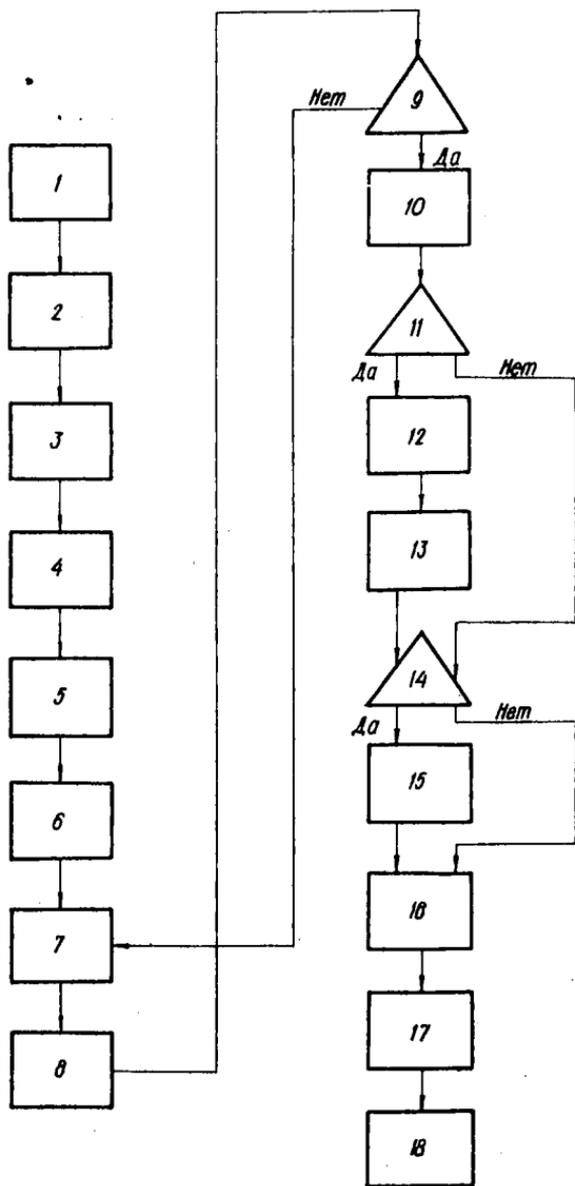


Рис.37. Блок-схема системы С-3.

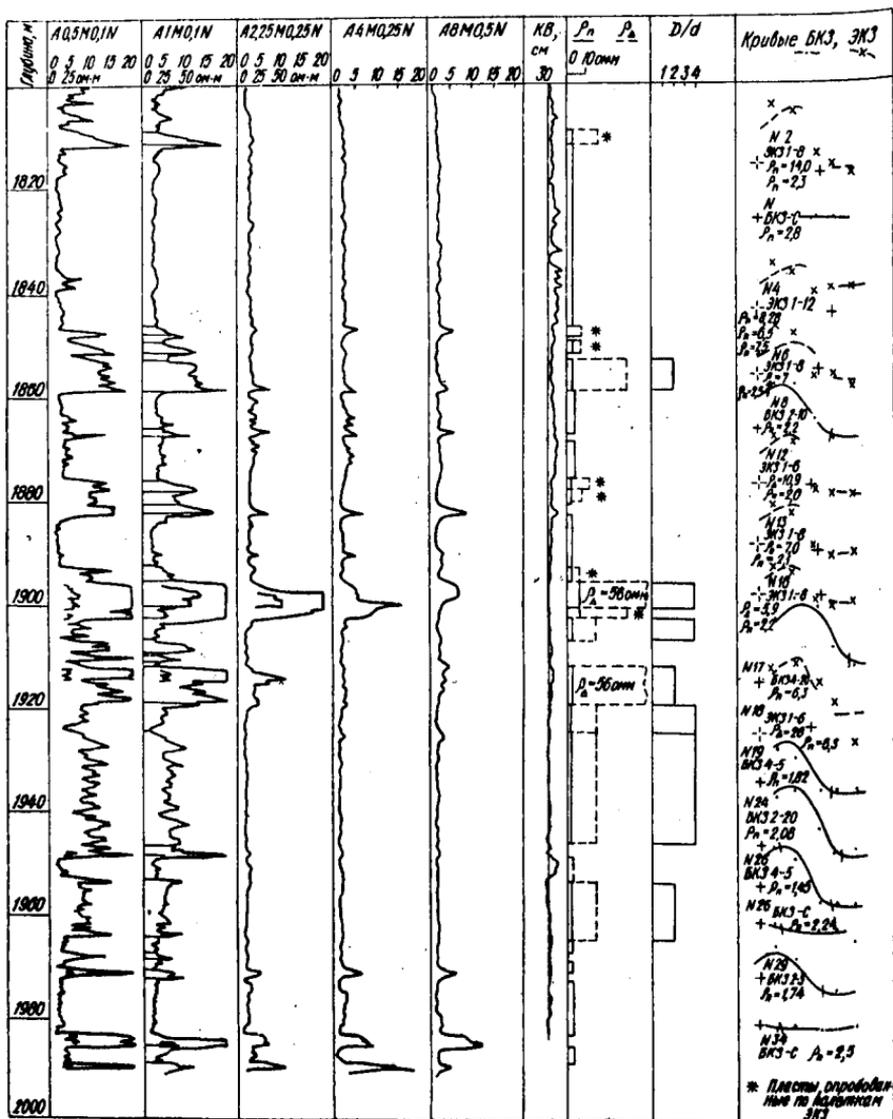


Рис. 38. Машинная интерпретация БКЗ, скв. Рыбальцы - 5-р.

Пример машинной интерпретации диаграмм БКЗ с помощью системы С-3 (по скв. Рыбальды-5) приведен на рис.38.

Структура таблицы результатов интерпретации, выдаваемой системой С-3, отличается следующим. Номинальный диаметр скважины и значение удельного сопротивления бурового раствора вынесены в заголовок таблицы. В таблицу включены графы: мощность пласта (Н), удельное сопротивление вмещающей толщи ($R_{вм}$), расхождение между фактической и теоретической кривыми каротажного зондирования (S).

Для каждого пласта печатается одна (если отсчитываются лишь оптимальные значения КС) или две (если отсчитываются и оптимальные, и экстремальные значения) строки. Значения удельного сопротивления вмещающей толщи печатаются во второй строке. При интерпретации экстремальных кривых зондирования в случае, когда значения удельного сопротивления пласта, определенные по левой и правой ветвям, не совпадают, значение $\rho_{прав}$ записывается в графе $RП$, значение $\rho_{лев}$ - в графе $RЗП$. Численные значения $\rho_{лев}$ и $\rho_{прав}$ помечаются звездочками. Звездочками же помечаются значения удельного сопротивления и диаметра зоны проникновения при наличии U- или А-эквивалентности. Значение параметра эквивалентности U представляется числом без знака, а значение параметра эквивалентности А - числом со знаком минус.

Таблицы 16,17 представляют собой результаты машинной интерпретации диаграмм бокового каротажного зондирования с помощью системы С-3, произведенной по скв. Качановка-2I и 25.

Система С-5

Система автоматической интерпретации С-5 является объединенной системой С-2 и С-3 и осуществляет как качественную, так и количественную интерпретации комплекса каротажных диаграмм. Качественная интерпретация позволяет определить литологию и характер насыщения порового пространства пластов-коллекторов, количественная - определить удельное сопротивление пласта и параметры зоны проникновения и оценить коллекторские свойства пластов-коллекторов (пористость, нефтегазонасыщенность). Результаты интерпретации каротажных диаграмм по алгоритмам системы С-5 по скв. Качановка-2I и 25 приведены на рис.39 и 40.

Результаты интерпретации диаграмм

Интервал глубины пласта, м	Н	ДС	РВМ	Ропт (Рэкстр)			
				Л1	Л2	Л3	Л4
2100,00-2105,60	5,60	,293		550	1,05	2,37	4,12
2105,60-2109,80	4,20	,293		3,07	2,95	2,39	2,00
2109,80-2113,60	3,80	,249		6,50	5,00	2,57	2,46
2113,60-2115,60	2,00	,245	2,57	11,52	13,71	4,92	1,86
2115,60-2121,20	5,60	,260		13,25	15,84	2,85	1,91
2121,20-2126,00	4,80	,282		8,15	7,28	4,67	1,35
2126,00-2128,20	2,20	,284		8,39	7,07	2,13	1,63
2128,20-2132,20	4,00	,279		12,54	11,75	4,75	2,00
2132,20-2138,40	6,20	,301		4,89	4,65	2,44	1,64
2138,40-2139,00	600	,277		8,85	8,50	3,75	1,91
2139,00-2157,00	18,00	,315		3,99	2,64	1,78	1,66
2157,00-2158,00	1,00	,286		7,55	6,96	2,48	1,51
2158,00-2160,40	2,40	,294		8,85	8,25	2,50	1,89
2160,40-2162,40	2,00	,327		5,37	4,69	2,16	1,93
2162,40-2164,80	2,40	,305		6,65	5,00	2,70	
2164,80-2169,60	4,80	,290		3,58	3,09	2,61	2,48
2169,60-2178,20	8,60	,329		11,00		2,38	
2178,20-2179,60	1,40	,287		4,17	3,24	2,41	
2179,60-2196,60	17,00	,307		10,94	9,01	2,88	
2196,60-2201,80	5,20	,313		17,76	12,62	4,22	2,91
2201,80-2233,20	31,40	,331		2,04	2,17	2,35	1,84
2233,20-2236,00	2,80	,270		5,63	5,40	2,76	2,49
2236,00-2245,80	9,80	,374		10,86	11,71	3,00	2,75
2245,80-2256,00	10,20	,277		2,86	2,73	2,43	2,55
2256,00-2258,80	2,80	,253		7,83	7,25	2,00	1,59
2258,80-2265,40	6,60	,250		8,49	8,24	2,42	1,68
2265,40-2268,80	3,40	,286		2,81	2,95	2,25	2,41
2268,80-2276,40	7,60	,250		5,95	6,17	3,26	3,00
2276,40-2282,40	6,00	,248		10,00	9,95	3,99	3,25
2282,40-2284,80	2,40	,255		2,98	2,94	2,50	2,59
2284,80-2285,80	1,00	,251		24,52	43,40		8,75
2285,80-2287,80	2,00	,253		2,78	3,13	3,59	3,35
2287,80-2300,00	12,20	,341		6,80	5,56	1,70	1,25
				12,41	14,66	2,67	1,57
				18,50	25,80	5,50	2,00
				10,40	10,72	3,61	1,78
				6,43	5,40	2,28	1,63
				9,80	9,68	2,58	1,22
				6,58	4,91	1,19	1,41
				6,92	5,33	1,86	1,23
				8,67	6,47	1,17	1,25
				3,47	3,58	1,26	1,31
				7,11	5,55	1,91	1,86
				9,10	7,45	1,48	1,25
				3,50	3,40	2,70	2,40

Таблица 16

БКЗ (окв. Качановка-21, ДН = 2,98, РС = 2,50)

Л5	РН	РН	Д	Палетка	И(А)	С	
8,25							
	2,56	-	-	-	-	,188	
	2,58	12,5*	,586*	2,0/5,00	2,74	,027	
	1,42	17,18	1,49	8,0/5,00	-	,092	
	1,55	7,22*	-	1,0/12,00	-		
	1,75	12,50	1,71	8,0/5,00	-	,260	
	886	14,06	,910	4,0/5,00	-	,066	
	1,41	6,25*	-	5,0/16,00	-		
	1,74	1,55*	-	2,0/5,00	4,53	,241	
	1,03	21,8*	,493*	5,0/16,00	-		
	1,67	14,81	-	5,0/16,00	-		
	1,22	15,6*	,462*	2,0/5,00	2,73	,207	
	1,03	16,9*	,524*	2,0/10,00	6,69	,123	
	1,14	28,2*	-	5,0/12,00	-		
	1,32	4,72*	-	2,0/5,00	4,13	,137	
	1,38	20,3*	,527*	2,0/5,00	2,72	,014	
		12,5*	,553*	2,0/5,00	-	,231	
						,554	
	1,94	2,67	-	2,0/5,00	3,48	,193	
	1,91	1,48*	-	2,0/5,00	2,98	,035	
	1,32	1,82	14,0*	,572*	-		
	1,73	1,67	17,1*	,478*	-		
	2,22	3,44*	25,0*	,654*	2,0/10,00	6,46	
			12,8*	-	1,0/6,00	-	
				-	-	,095	
	1,27	2,10	-	-	2,0/5,00	,305	
	1,85	2,05	14,06	,653	1,0/16,00	-	
		1,83*	5,30*	-	-	,059	
		2,64	-	-	-	,083	
		1,73	12,50	1,07	4,0/5,00	-	
	1,65	1,32*	7,93*	-	1,0/5,00	-	
	1,76	2,40	-	-	-	,201	
	1,24	2,15	15,62	,782	2,0/5,00	,374	
	1,54	1,20*	5,47*	-	1,0/16,00	-	
	1,93	2,56	-	-	-	,169	
	8,95	21,4*	106,8*	-	1,0/8,00	-	
		3,21	-	-	-	,081	
	1,57	1,53	12,50	,832	4,0/5,00	,102	
	1,99	1,80	25,00	,633	2,0/10,00	,237	
	3,16	2,97*	14,4*	-	5,0/8,00	-	
	1,02	1,22	12,50	1,75*	8,0/5,00	,063	
	1,88	1,92	15,6*	,571*	2,0/5,00	,084	
		1,11	28,12	,563	2,0/10,00	,101	
		1,10	14,06	,682	4,0/5,00	,236	
		,535	,776	,764	4,0/5,00	,205	
		500	1,11*	4,61*	5,0/8,00	-	
		,908	1,25	15,6*	,440*	2,0/5,00	,221
		818	,929	12,50	,824	4,0/5,00	,133
		1,00	,998*	7,01*	-	5,0/6,00	-
	1,40	2,55	-	-	-	,393	

БКЗ (скв. Качановка-25, $DN = ,298$, $AC = 1,00$)

Интервал глубины пласта, м	H	ДС	РВМ	R _{опт} (R _{экстр})			
				Л1	Л2	Л3	Л4
				550	1,05	2,37	4,25
2240,00-2243,60	3,60	,310		3,04	3,01	2,45	
2243,60-2244,80	1,20	,302		9,18		2,29	
2244,80-2252,80	8,00	,280		5,68	3,69	1,45	,761
2252,80-2254,00	1,20	,281		12,96		741	,600
			1,03	13,92	14,40	1,44	,960
2254,00-2255,20	1,20	,285		1,08		1,18	,694
2255,20-2260,60	5,40	,275		8,89	7,67	1,87	,401
2260,60-2265,20	4,60	,274		11,24	10,81	2,07	,472
			,794	14,16	15,00	2,28	,600
2265,20-2267,20	2,00	,277		2,98	,813	1,54	,371
2267,20-2268,20	1,00	,279		9,96	4,48	,960	,467
2268,20-2270,20	2,00	,284		3,33	1,04	,633	,513
2270,20-2271,40	1,20	,285		12,78		531	,429
			,700	16,32	11,28	,480	,720
2271,40-2273,40	2,00	,285		2,45	,600	,705	,736
2273,40-2275,60	2,20	,285		17,22	20,98	,765	,398
			,738	22,50	32,50	,960	,760
2275,60-2285,40	9,80	,300		3,96	3,94	2,66	1,56
2285,40-2287,00	1,60	,296		9,36	9,24	3,19	
			1,79	9,36	14,16	5,75	6,24
2287,00-2302,80	15,80	,305		3,45	3,57	3,62	2,49
2302,80-2303,80	1,00	,282		6,12	3,32	3,10	2,54
2303,80-2304,40	,600	,267		1,56	3,09	3,01	3,33
2304,40-2310,00	5,60	,287		4,20	3,58	2,97	2,56
2310,00-2312,60	2,60	,282		6,29	4,86	2,72	2,21
			2,68	8,88	7,68	2,98	2,52
2312,60-2313,20	,600	,275		2,64	4,14	2,76	2,46
2313,20-2316,80	3,60	,279		7,84	5,49	2,94	2,06
			2,45	15,12	10,80	4,14	3,48
2316,80-2320,40	3,60	,297		4,14	4,18	3,29	2,88
			2,25	3,84	4,20	3,72	3,00
2320,40-2325,40	5,00	,302		3,09	2,26	1,91	
2325,40-2326,20	,800	,282		17,16			2,61
2326,20-2328,00	1,80	,273		1,85	1,15	2,53	2,09
2328,00-2331,00	3,00	,274		8,40	7,63	2,19	
			1,95	9,12	9,24	2,52	2,88
2331,00-2332,60	1,60	,287		3,64	2,88	2,33	2,17
2332,60-2338,40	5,80	,286		10,23	12,23	3,03	1,10
			,867	13,92	26,25	3,48	1,32
2338,40-2341,80	3,40	,300		3,04	2,76	1,92	1,91
2341,80-2350,20	8,40	,286		5,13	4,96	2,35	1,94
2350,20-2352,60	2,40	,287		2,24	2,22	2,20	1,91
2352,60-2365,00	12,40	,282		10,93	14,20	4,67	1,57
2365,00-2375,20	10,20	,285		7,31	8,08	2,35	,988
2375,20-2378,40	3,20	,279		1,87	2,27	1,44	1,16

Л5	RП	R3П	D	Палетка	И(А)	С
8,50	2,31*	5,00*	,542*	2,0/5,00	1,50	,019
1,18	1,00*	10,00*	,630*	2,0/10,00	-	,198
1,20	1,505*	5,00*	1,05*	4,0/5,00	-	1,68
1,21	1,24*	25,0*	-	1,0/4,00	-	-
1,42	1,01	-	-	-	-	,253
1,750	,836	17,5*	,550*	2,0/20,00	11,55	,653
1,28	,612	20,0*	,548*	2,0/20,00	13,43	,454
1,858	1,48*	4,03*	-	1,0/16,0	-	-
1,09	1,02	-	-	-	-	1,00
1,904	,722	10,00	,697	2,0/10,00	-	,592
1,598	,648	5,00*	,569	2,0/5,00	3,01	327
1,04	,489	5,00	,784	2,0/5,00	-	1,63
1,982	,700*	5,00*	-	,50/4,00	-	-
1,658	,932	-	-	-	-	,652
1,28	1,500	20,0*	,570*	2,0/20,00	13,51	1,27
	1,11*	28,7*	-	1,0/8,00	-	-
	1,79	6,87	,901	4,0/5,00	-	,104
	1,652*	22,5*	,667*	2,0/20,00	17,55	,166
6,24	16,9*	12,9*	-	2,5/5,00	-	-
3,03	3,10	-	-	-	-	,153
3,06	2,72	6,87	,635	4,0/5,00	-	,254
3,24	2,71	-	-	-	-	,286
	2,59	6,25*	,573*	2,0/5,00	2,53	,074
	2,15	11,2*	,565*	2,0/10,00	6,30	,129
2,88	2,68*	5,62*	-	2,5/8,00	-	-
2,55	2,78	-	-	-	-	,169
2,05	2,11	13,7*	,559*	2,0/10,00	8,06	,177
2,16	2,86*	7,17*	-	2,5/12,00	-	-
	2,86	5,00	965	4,0/5,00	-	,036
3,84	3,77	-	-	2,5/12,00	-	-
	1,75*	5,00*	,566*	2,0/5,00	2,04	,103
2,47	1,90	-	-	-	-	,358
	2,419*	22,5*	,547*	2,0/20,00	15,30	,145
2,16	2,76*	5,00*	-	2,5/12,00	-	-
	2,21	5,00*	,575*	2,0/5,00	1,93	,075
1,67	1,40	20,0*	,573*	2,0/20,00	12,88	,354
1,87	2,63*	5,42*	-	1,0/16,00	-	-
2,46	2,07	5,00*	,563*	2,0/5,00	1,83	,101
1,50	1,76	11,2*	,572*	2,0/10,00	6,57	,083
1,84	2,04	-	-	-	-	,084
1,874	1,996	32,5*	,564*	2,0/40,00	21,83	,166
1,26	1,11	18,7*	,571*	2,0/20,00	12,22	,171
1,898	1,21	9,37*	,419*	2,0/5,00	3,30	,166

Интервал глубины пласта, м	H	DC	РВМ	R _{опт} (R _{экстр})			
				L1	L2	L3	L4
2378,40-2385,40	7,00	,281		7,67	7,08	2,05	,696
2385,40-2387,00	I,60	,285	I,15	12,72	11,52	2,32	3,60
2387,00-2395,20	8,20	,293		2,46	1,32	1,69	,827
2395,20-2396,60	I,40	,276		3,94	3,57	2,01	1,50
2396,60-2401,60	5,00	,302	I,43	12,72	14,24		1,43
2401,60-2403,60	2,00	,286		13,20	16,80	3,36	1,56
2403,60-2408,20	4,60	,286	I,16	4,67	4,85	3,06	2,75
2408,20-2420,80	12,60	,275		3,60	9,96	8,04	5,88
2420,80-2422,20	I,40	,275		1,77	1,80	2,95	2,23
2422,20-2425,40	3,20	,273		6,10	4,53	2,02	1,41
2425,40-2437,00	II,60	,274		10,23	9,49	1,48	,653
2437,00-2439,80	2,80	,270		5,33	4,58	2,02	,720
2439,80-2449,20	9,40	,287		25,26	45,00	19,37	1,35
2449,20-2456,60	7,40	,278		27,50	52,50	32,50	1,80
2456,60-2458,00	I,40	,273		11,05	11,42	2,55	,687
2458,00-2468,40	10,40	,283		4,43	2,33		
2468,40-2477,20	8,80	,281		4,15	3,78	2,13	1,45
2477,20-2481,80	4,60	,286		2,97	2,41	2,12	1,37
2481,80-2482,20	4,00	,310		9,36	6,20	1,87	1,42
2482,20-2490,00	7,80	,475		11,52	9,12	2,64	1,49
			I,61	4,53	3,79	2,42	1,93
				5,36	4,49	2,65	2,26
				4,13	3,69	3,06	1,83
				4,64		3,92	
				3,31	3,34	3,20	2,04

L5	RП	RЗП	D	Палетка	И(А)	S
I,43	I,06	17,5*	,562*	2,0/20,00	11,39	,355
I,28	I,31*	4,25*	-	1,0/24,00	-	,456
I,10	I,36	-	-	-	-	,101
I,16	I,43	6,87	,878	4,0/5,00	-	,670
1,85	1,590	22,5*	,552*	2,0/20,00	15,18	
1,68	2,28*	17,1*	-	1,0/5,00	-	,056
2,16	2,59	5,62	1,20	4,0/5,00	-	
	2,82*	5,58*	-	1,0/16,00	-	
	2,11	-	-	-	-	,229
I,08	I,38	12,5*	,572*	2,0/10,00	7,70	,112
1,883	,832	18,7*	,550*	2,0/20,00	12,42	,473
1,37	,844	7,50	1,23	8,0/5,00	-	,161
I,92	,988	40,0*	,820*	2,0/40,00	42,85	,1,06
I,10	2,91*	25,0*	-	1,0/12,00	-	
1,887	,930	20,0*	,548*	2,0/20,00	13,21	,415
1,928	,580*	8,12*	,608*	4,0/5,00	-	,144
1,62	1,30	12,5*	,539*	2,0/10,00	7,04	,163
I,49	I,67	6,87*	,486*	2,0/5,00	2,91	,122
1,92	I,36	16,2*	,546*	2,0/20,00	10,31	,305
2,13	2,04*	10,5*	-	2,5/5,00	-	
I,78	2,06	5,62	,991	4,0/5,00	-	,079
1,92	2,07	10,0*	,562*	2,0/10,00	5,49	,102
2,72	2,08	6,87*	,788*	4,0/5,00	-	,120
2,38	2,25*	5,00*	1,24*	4,0/5,00	-	,122
	2,21	6,25*	,950*	2,0/5,00	2,79	,124

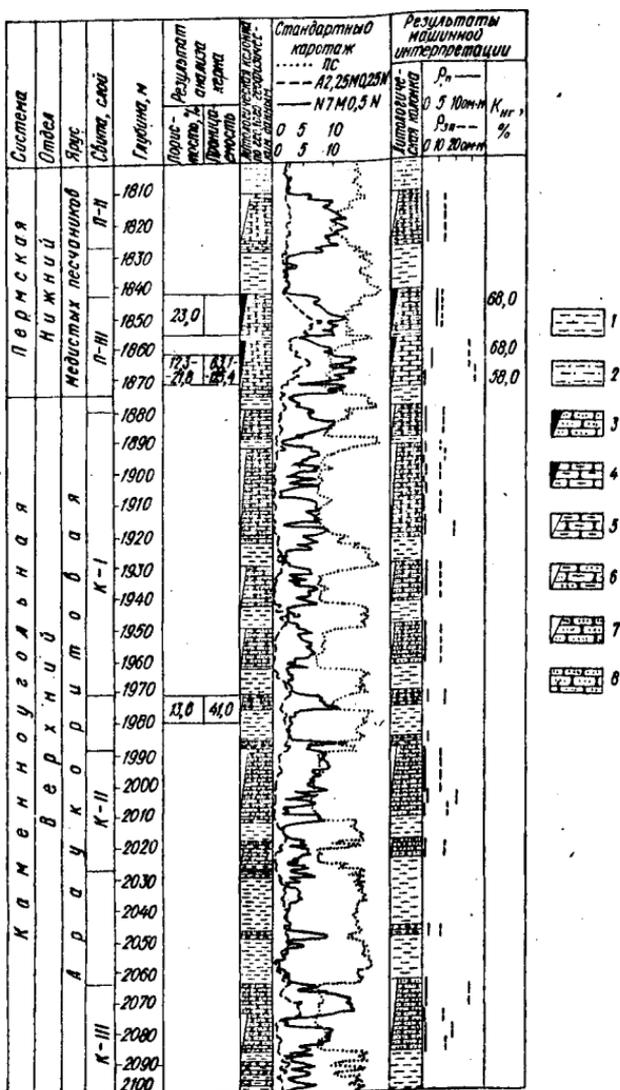


Рис. 39. Результаты машинной интерпретации каротажных диаграмм с помощью системы С-5, скв. Качановка-25:

1 - глина, 2 - глина песчанистая, 3 - песчаник нефтеносный, 4 - песчаник глинистый нефтеносный, 5 - песчаник глинистый водоносный, 6 - песчаник слабоглинистый водоносный, 7 - песчаник водоносный, 8 - песчаник проницаемый.

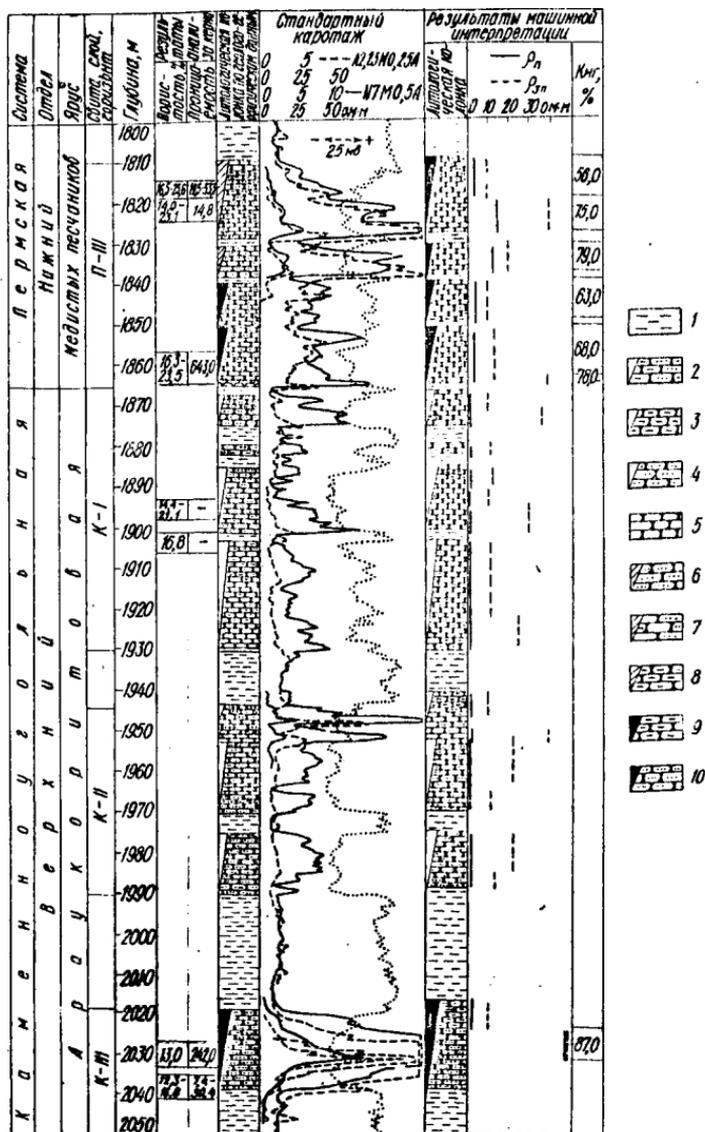


Рис.40. Результаты машинной интерпретации каротажных диаграмм с помощью системы С-5, скв. Качановка-25:

1 - глина, 2 - песчаник слабоглинистый водоносный, 3 - песчаник глинистый водоносный, 4 - песчаник водоносный, 5 - песчаник плотный или известняк, 6 - песчаник газоносный, 7 - песчаник слабоглинистый водоносный, 8 - песчаник глинистый газоносный, 9 - песчаник глинистый нефтеносный, 10 - песчаник нефтеносный.

§ 4. Системы машинной интерпретации каротажных диаграмм угольных и железорудных скважин*

Интерпретация данных геофизических исследований разрезов обладает рядом специфических особенностей, связанных с различием задач, решаемых при каротаже нефтегазовых скважин, с одной стороны, и каротаже угольных и железорудных скважин, с другой. К числу таких особенностей следует отнести.

1. Отличие в комплексе методов каротажа: наличие методов, либо совсем не применяемых при исследовании нефтегазовых скважин (например, боковой токовый каротаж, метод отраженного гамма-гамма-излучения, каротаж магнитной восприимчивости), либо применяемых в небольшом объеме и с другой аппаратурой (гамма-гамма-каротаж).

2. Запись каротажных диаграмм при исследовании разрезов угольных скважин в поисковом (I:200) и детальном (I:50 или I:20) масштабах.

3. Высокие требования к точности определения мощности и строения угольных пластов и железорудных тел.

4. Необходимость определения по геофизическим данным качественных показателей углей (зольности и др.), физико-механических свойств вмещающих пород, количественного содержания железа в железистых породах и рудах.

Методы автоматической интерпретации данных геофизических исследований угольных и железорудных скважин начали разрабатываться только в последние годы. При этом, естественным был вопрос, каким образом максимально использовать опыт машинной интерпретации каротажных диаграмм нефтегазовых скважин и учесть особенности интерпретации данных каротажа угольных и железорудных скважин.

Система С-4

Система С-4 предусматривает выполнение таких звеньев обработки:

- 1) первичную обработку исходной информации;
- 2) расчленение разреза по отдельным каротажным кривым (получение "частных расчленений");
- 3) получение сводного расчленения по всему комплексу каротажных диаграмм (на основе ранее полученных частных расчленений);

* Разработка систем автоматической интерпретации каротажных диаграмм угольных и железорудных скважин производилась под руководством автора В.С.Готьяном.

- 4) определение литологического характера выделенных пластов;
- 5) отсчет характерных значений с каротажных диаграмм;
- 6) переход от характерных значений к количественным параметрам угольных пластов и рудных тел (например, зольность углей, содержание железа и т.д.);
- 7) выдачу на печать полученных результатов.

Система С-4 предусматривает работу в режиме "Уголь" или "Руда".

В режиме "Уголь" интерпретируются каротажные диаграммы КС градиент- и потенциал-зондов, ПС, кавернограмма, гамма-гамма-каротажа, гамма-каротажа и бокового токового каротажа.

В режиме "Руда" в комплексе диаграмм, обрабатываемых системой С-4, входят кривые КС градиент- и потенциал-зондов, плотностного и отраженного гамма-гамма-каротажа, каротажа магнитной восприимчивости, гамма-каротажа, а также кавернограмма.

На основе опыта работы системы С-4 были созданы более совершенные системы С-6 и С-7.

Система С-6

Эта система предназначена для обработки каротажных диаграмм, записанных в угольных скважинах. Принципиальная блок-схема системы приведена на рис.4Г. Указаны такие блоки:

Блок 1. Контроль качества, первичная обработка и запись каротажных диаграмм на магнитную ленту.

Блок 2. Вызов с магнитной ленты программ определения базовых значений, отбивки границ пластов, получение сводного расчленения, формирования кодов, программы-диспетчера, стандартных подпрограмм.

Блок 3. Проверка, все ли кривые обработаны.

Блок 4. Вызов очередной кривой с магнитной ленты.

Блок 5. Сингулярное расчленение кривой.

Блок 6. Увязка частных расчленений и получение сводного расчленения.

Блок 7. Формирование комплексных кодов.

Блок 8. Вызов с магнитной ленты программ укрупнения расчленений, определение литологического характера пластов, печати таблицы литологического расчленения.

Блок 9. Укрупнение сводного расчленения.

Блок 10. Определение литологического характера выделенных пластов и печать таблицы литологического расчленения.

Блок 11. Вызов с магнитной ленты программ определения мощности угольных пластов и кривых детализационного масштаба.

Блок 12. Определение мощности угольных пластов.

Блок 13. Печать таблицы результатов определения мощности угольных пластов.

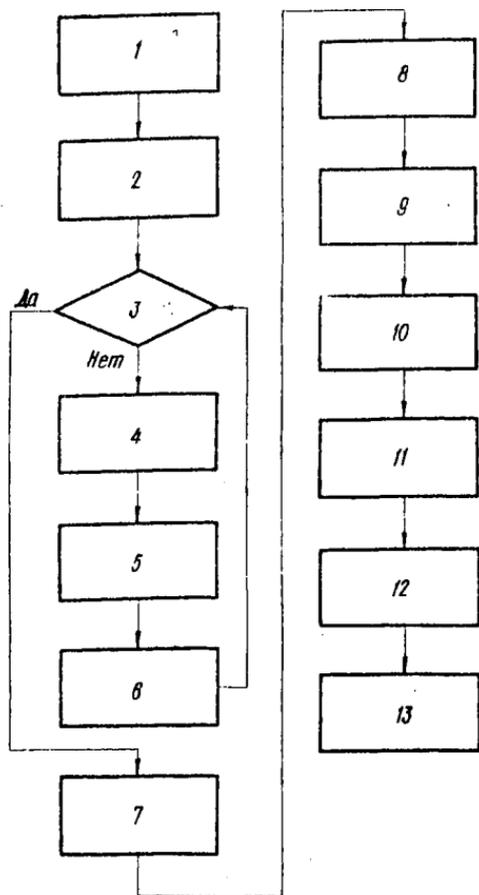


Рис.41. Блок-схема системы С-6.

В системе С-6 предусмотрен также блок, выполняющий определение качественных показателей углей. В настоящее время этот блок находится в стадии разработки. Как пример машинной интерпретации каротажных диаграмм угольных скважин на рис.42 и в табл.18 приведено литологическое расчленение разреза скв. Красноармейская-3700 (Донбасс).

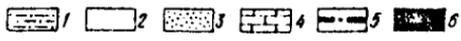
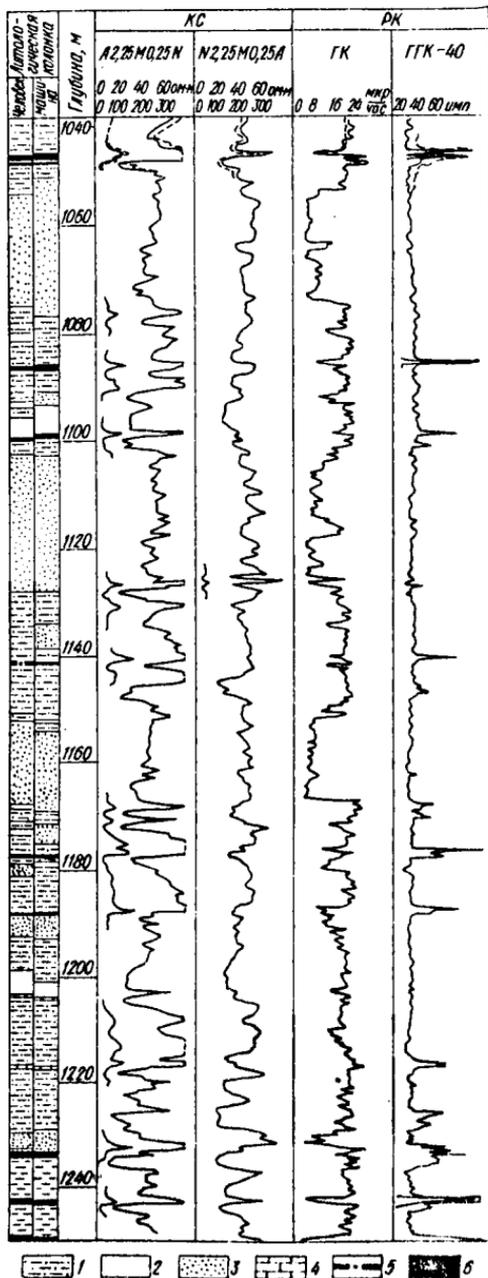


Рис.42. Литологическое расчленение разреза. Машинная интерпретация. Скв. Красноармейская - 3700 (Донбасс):
 1 - алевролит, 2 - аргиллит, 3 - песчаник, 4 - известняк, 5 - углистый сланец, 6 - уголь.

Печать результата системы С-6

Машинная интерпретация, литологическое расчленение угольных скважин, район Красноармейский, скв. 3700, масштаб 1 : 200, начальная глубина 1040 м, конечная глубина 1250 м, шаг квантования 0,1 м

Интервал глубины пласта, м	Литология	Интервал глубины пласта, м	Литология
1039,9 - 1046,34	Алевролит	1168,8 - 1170,94	Алевролит
1046,3 - 1047,44	Уголь	1170,9 - 1174,60	Песчаник
1047,4 - 1047,65	Алевролит	1174,6 - 1176,75	Алевролит
1047,6 - 1048,05	Уголь	1176,7 - 1177,05	Уголь
1048,0 - 1050,84	Алевролит	1177,0 - 1178,05	Алевролит
1050,8 - 1076,30	Песчаник	1178,0 - 1178,94	Песчаник
1076,3 - 1085,69	Алевролит	1178,9 - 1187,65	Алевролит
1085,6 - 1086,70	Уголь	1187,6 - 1187,95	Уголь
1086,7 - 1090,65	Алевролит	1187,9 - 1192,45	Песчаник
1090,6 - 1093,15	Песчаник	1192,4 - 1200,75	Алевролит
1093,1 - 1098,80	Аргиллит	1200,7 - 1203,65	Аргиллит
1098,8 - 1099,30	Уголь	1203,6 - 1204,25	Известняк
1099,3 - 1102,34	Алевролит	1204,2 - 1216,84	Алевролит
1102,3 - 1127,65	Песчаник	1216,8 - 1216,94	Углистый сланец
1127,6 - 1133,84	Алевролит		
1133,8 - 1138,25	Песчаник	1216,9 - 1217,15	Алевролит
1138,2 - 1140,75	Алевролит	1217,1 - 1217,40	Углистый сланец
1140,7 - 1141,05	Уголь		
1141,0 - 1151,44	Алевролит	1217,4 - 1229,25	Алевролит
1151,4 - 1152,25	Песчаник	1229,2 - 1232,90	Песчаник
1152,2 - 1153,55	Алевролит	1232,9 - 1233,25	Уголь
1153,5 - 1168,60	Песчаник	1233,2 - 1233,44	Алевролит
1168,6 - 1168,89	Углистый сланец	1233,4 - 1233,94	Уголь
		1233,9 - 1242,05	Алевролит
		1242,0 - 1243,05	Уголь
		1243,0 - 1250,00	Алевролит

Система С-7

Эта система С-7 предназначена для интерпретации данных геофизических исследований в железорудных скважинах. Принципиальная блок-схема ее сходна с блок-схемой С-6 и отличается отсутствием блоков II-13, а также наличием новых блоков, выполняющих определение содержания железа, связанного с магнетитом, и печать результатов этого определения. Результаты интерпретации коротажных диаграмм по программам С-7 приведены на рис.43,44 и в табл.19.

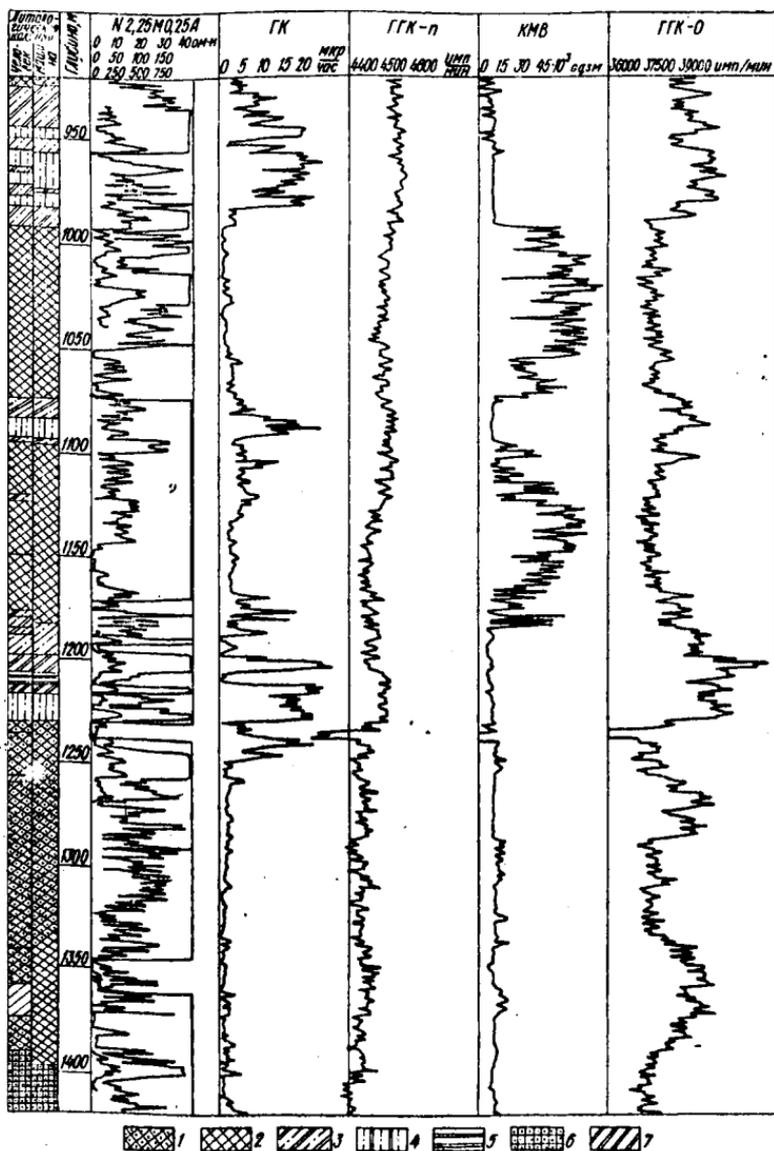


Рис.43. Литологическое расчленение разреза. Машинная интерпретация. Скв. им.К.Либкнехта - 13218 а (Кривбасс):

1 - роговики маритовые, 2 - роговики магнетитовые, 3 - роговики безрудные, 4 - сланцы кварцево-слюдистые, 5 - сланцы карбонат-хлорит-талковые, 6 - джеспилиты маритовые, 7 - филлиты.

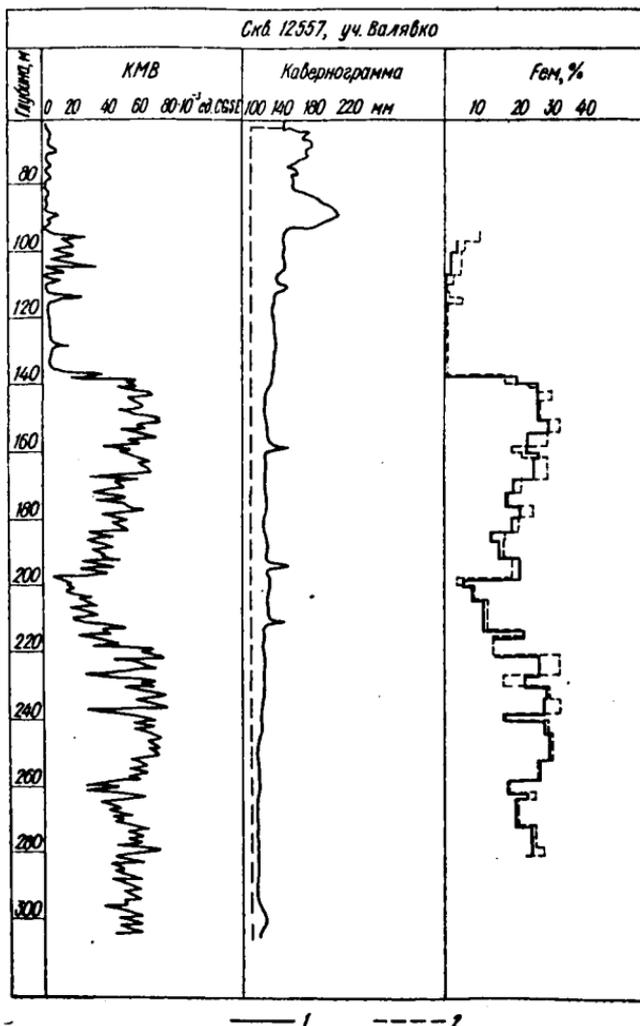


Рис.44. Определение содержания железа, связанного с магнетитом (FeM) по данным каротажа магнитной восприимчивости (КМВ). Скв. 12557, участок Валявко (Кривбасс):

1 - ручная интерпретация, 2 - машинная интерпретация.

Печать результата системы С-7

Машинная интерпретация, литологическое расчленение рудных скважин, район К, Либкнехта, скв. 13218^а, масштаб 1 : 500, начальная глубина 920 м, конечная глубина 1420 м, шаг квантования 0,5 м

Интервал глубины пласта, м	Литология
919,99 - 929,09	Роговики маргитовые
929,09 - 943,90	Роговики безрудные
943,90 - 949,25	Сланцы кварцево-слюдистые
949,25 - 956,25	Роговики безрудные
956,25 - 973,24	Сланцы кварцево-слюдистые
973,24 - 975,09	Роговики безрудные
975,09 - 981,89	Сланцы кварцево-слюдистые
981,89 - 991,99	Роговики безрудные
991,99 - 1073,50	Роговики магнетитовые
1073,50 - 1083,90	Роговики безрудные
1083,9 - 1092,90	Сланцы кварцево-слюдистые
1092,9 - 1095,69	Роговики безрудные
1095,6 - 1181,99	Роговики магнетитовые
1181,9 - 1197,59	Роговики безрудные
1197,5 - 1206,86	Филлиты
1206,8 - 1213,59	Сланцы карбонато-хлоритотальковные
1213,5 - 1216,90	Филлиты
1216,9 - 1230,40	Сланцы кварцево-слюдистые
1230,4 - 1396,59	Роговики маргитовые
1396,5 - 1420,00	Джеспилиты маргитовые

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели, каким образом можно формализовать и реализовать на ЭВМ различные этапы оперативной интерпретации каротажных диаграмм. Опробование предложенных алгоритмов машинной интерпретации на материалах различных районов страны показало, что ЭВМ могут быть широко использованы при обработке промыслово-геофизической информации.

Методы машинной интерпретации промыслово-геофизических данных все время совершенствуются. Это совершенствование идет не только созданием все более эффективных алгоритмов тех или иных этапов обработки данных геофизических исследований буровых скважин, но и разработкой принципиально новых путей использования информационно-вычислительной техники.

Совершенствование алгоритмов производится на основе освоения и применения новейших разделов математики (многомерного статистического анализа, теории классификации, теории случайных функций, теории статистических решений, теории информации), а также теории алгоритмов, вычислительной математики функционального анализа и т.д., на основе более глубокой разработки теории геофизических методов исследований скважины, анализа и критической оценки фактических результатов массового опробования автоматической интерпретации каротажных диаграмм.

Аппарат математической статистики все чаще применяется при разработке таких алгоритмов, как расчленение каротажных кривых (статистическое определение базовых значений, статистические методы расчленения разреза на пласты), качественная диагностика, количественная интерпретация (в последнем случае все чаще применяются методы множественной корреляции). Большое значение имеют работы, в которых формулируются четкие критерии эффективности промыслово-геофизических данных. При этом используется аппарат теории игр и статистических решений, а также теории информации.

Много усилий направлено на расширение теоретических основ геофизических исследований буровых скважин. Это относится как к разработке методов решения (так называемых прямых задач), так и к теоретическому исследованию физических и физико-химических процессов, происходящих в горных породах при вскрытии их буровой скважиной. При получении численных результатов помощь ЭЦВМ исключительно велика, поскольку уравнения, описывающие геофизические поля, имеют нередко весьма сложную форму (зачастую это дифференциальные, интегральные и интегро-дифференциальные уравнения, численное решение которых возможно на основе применения достаточно совершенных вычислительных машин). Не потеряло еще своего значения и применение аналоговых счетно-решающих и моделирующих устройств при решении прямых задач теории каротажа — так для расширения теоретических основ различных видов электрического каротажа (каротаж сопротивлений в различных модификациях, каротаж самопроизвольной поляризации и т.д.) успешно применяется электроинтегратор ЭКСМ.

Совершенно новым направлением в области применения ЭЦВМ для истолкования промыслово-геофизических данных является разработка "непалеточных" методов количественной интерпретации каротажных диаграмм. Традиционный метод решения обратных задач — сопоставление фактических замеров с теоретическими палетками — во многих случаях, в частности, в тонкослоистых разрезах, встречает серьезные затруднения: с ростом числа параметров необходимый объем палеточных материалов так стремительно возрастает, что практически получить его с требуемой полнотой оказывается невозможным. Предложены новые схемы интерпретации, базирующиеся на решении уравнений, описывающих распределение геофизических полей и позволяющие "пересчитывать" каротажные кривые (например, кривые бокового каротажного зондирования) в кривые удельного сопротивления окружающих скважину пород. Однако это направление еще находится в стадии исследовательских работ. В случае успешного решения этой проблемы удастся существенно расширить возможности промыслово-геофизических исследований.

Новые возможности машинной интерпретации промыслово-геофизических данных открываются в связи с совершенствованием информационно-вычислительной техники, в частности, с привлечением для решения геофизических задач ЭВМ третьего и четвертого поколений. Особенностью ЭВМ третьего поколения является то, что внешние устройства (устройства ввода и вывода информации, внешняя память и т.п.) в значительной мере обладают автономией — способны работать параллель-

но друг с другом и с центральным процессором (арифметическим устройством). Это позволяет существенно повысить загрузку центрального процессора и сделать экономичной решение на ЭВМ задач, связанных с вводом и выводом больших объемов информации, а именно к этому классу принадлежит большинство задач обработки геолого-геофизических данных. На ЭВМ третьего и четвертого поколений можно одновременно решать несколько различных задач или несколько звеньев одной задачи, по этой причине они часто называются многоканальными, многопрограммными (или машинами с мультипрограммированием)^{*}. Многоканальные ЭВМ способны осуществлять так называемую "пакетную обработку" задач - каждая задача, оформленная соответствующим образом (в виде "пакета"), может быть через соответствующие каналы связи направлена в информационно-вычислительный центр (ИВЦ) со специального устройства ("терминала"), которое может быть территориально удалено от ИВЦ. Специальные программы-диспетчеры (они называются также мониторами, супервизорами, операционными системами) организуют выполнение потоков задач (пакетов). Так как распределение памяти ЭЦВМ очень часто осуществляется программой-диспетчером непосредственно перед решением задачи, программирование в действительных адресах теряет смысл - рабочими языками программирования являются алгоритмические языки с символическим заданием адресов (ассемблерного типа, проблемно-ориентированные языки такие как АЛГОЛ, ФОРТРАН, PL/I и др.). Операционные системы включают программы-трансляторы, преобразующие алгоритмические тексты в машинные коды. Так как мониторы занимают очень большой объем, составляющий вместе с резервными массивами (файлами) сотни тысяч и миллионы машинных слов, ЭВМ третьего и четвертого поколений снабжаются "вторичной памятью" на дисках или барабанах со временем обращения, близким к времени обращения к оперативной памяти и в то же время обладающей значительной емкостью (сотни тысяч и миллионы слов).

Применение ЭВМ третьего и четвертого поколений для решения геолого-геофизических и, в частности, промыслово-геофизических задач, имеет большое значение. Открывается возможность эффективного вмешательства квалифицированного интерпретатора в процессе обработки данных. Если при использовании одноканальных ЭВМ такое вмешательство практически исключалось - инерция человеческого мышления несоизмерима с работой быстродействующих ЭВМ, выполняющих тысячи и

^{*} Исключительная важность применения многоканальных ЭВМ для обработки геолого-геофизической информации подчеркивалась автором еще в 1964 г.

десятки тысяч операций в секунду, и всякое вмешательство человека в процесс обработки приводило к остановке ЭВМ, большой потери времени, что делало экономически нецелесообразным применение ЭВМ. Поэтому на ЭВМ первого и второго поколений возможно было реализовать лишь автоматические системы обработки данных, исключавшие вмешательство человека (с такими системами читатель мог ознакомиться в гл. У1 настоящей монографии).

Применение ЭВМ третьего и четвертого поколений позволяет перейти к созданию автоматизированных систем обработки промышленно-геофизической информации, рассчитанных на максимальное использование возможностей современной информационно-вычислительной техники и эффективное использование трудно формализуемого опыта квалифицированного интерпретатора. Процесс обработки данных при этом разделяется на несколько этапов. По окончании каждого этапа ЭВМ может выдавать полученные промежуточные данные в форме, наиболее удобной для обозрения человеком, например, на экране экспонирующего устройства (дисплея). Получив такие данные – предварительный вариант корреляции каротажных диаграмм или же вариант выделения продуктивных пластов – интерпретатор с помощью специального устройства ("светового пера") вносит свои коррективы в полученное решение и дает команду продолжать процесс обработки данных. Во время экспонирования результатов и приема человеком решения ЭВМ не простаивает, а автоматически переходит к решению следующей задачи. Как видим, возможности автоматизированных систем подобного типа существенно превышают возможности автоматических систем.

Резко расширяется круг задач для которых целесообразно применять ЭВМ. Появляется возможность оперативно получать и обрабатывать огромные массивы разнообразнейшей информации (особенно эффективны в этом отношении ЭВМ четвертого поколения), что позволяет перейти к углубленной комплексной интерпретации всей суммы накопленных данных, имеющих отношение к решаемой задаче (так называемых "кумулятивных" методов интерпретации данных). Становится возможным построение различной степени детальности математических моделей недр (уравнения геологических поверхностей, графы качественных структур, модели типовых разрезов, информотеки накопленных данных и т.д.). И эти модели могут быть эффективно использованы при решении частных задач, например, оперативной интерпретации промышленно-геофизических данных.

Л и т е р а т у р а

1. Абакумов В.Г. и др. - В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.4. "Недра", М., 1970.
2. Автоматическая интерпретация промыслово-геофизических данных. Изд-во ВНИИГеофизики, М., 1971.
3. Алгоритмический язык АЛГОЛ-60. "Мир", М., 1965.
4. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. ФМ, М., 1963.
5. Бонгард М.М. Проблема познания. "Наука", М., 1967.
6. Ботенбрух Г. Структура АЛГОЛ-60 и его использование. ИЛ, М., 1963.
7. Брискина Э.Д. и др. -В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.4. "Недра", М., 1970.
8. Будняк А.А., Петренко А.И., Сигорский В.Л. -В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.3. "Недра", М., 1969.
9. Валуйский А.А. и др. -В кн.: Разведочная геофизика, в. 29. "Недра", М., 1968.
10. Воронин Ю.А. и др. Геология и математика. "Наука", Новосибирск, 1970.
11. Готынян В.С., Куликович А.Е. -В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.5. "Недра", М., 1972.
12. Грубов В.И., Кирдан В.С. Электронные вычислительные машины и моделирующие устройства. Справочник. "Наукова думка", К., 1969.
13. Дайновская М.Ф., Куликович А.Е., Ханкин А.Л. - В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.4. "Недра", М., 1970.
14. Данилов М.А. Оперативная обработка промыслово-геофизических материалов на ЭВМ. ВИЭМС, М., 1970.
15. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. Гостоптехиздат, М., 1965.
16. Дубинюк П.Ф., Куликович А.Е., Ланцман А.Х. Выработка методики оценки экономической эффективности промыслово-геофизических исследований, серия регион., развед. и пром. геофизика, 21, ВИЭМС, 1970.
17. Ефремов В.П. - В кн.: Труды СНИИГИМС, в.30. Новосибирск, 1964.
18. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функции и функционального анализа. "Наука", М., 1968.
19. Комаров С.Г. Картаж по методу сопровитлений. Интерпретация. Гостоптехиздат, М., 1950.
20. Комплексная интерпретация геологических и геофизических данных на вычислительных машинах. Под ред. Ш.Л.Губермана. Труды МИИХ и ГП, в.62. "Недра", М., 1966.

21. Куликович А.Е. - В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.1. "Недра", М., 1965.
22. Куликович А.Е. - Там же.
23. Куликович А.Е. - В кн.: Вопросы технического прогресса в нефтяной и газовой промышленности. "Наукова думка", К., 1965.
24. Куликович А.Е. - В кн.: Труды УкрНИГРИ, в.13. "Недра", М., 1965.
25. Куликович А.Е. - В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.2. "Недра", М., 1967.
26. Куликович А.Е. и др. - В кн.: Труды МИНХ и ИП, в. 56. "Недра", М., 1966.
27. Куликович А.Е. - В кн.: Труды МИНХ и ИП, в.89. "Недра", М., 1969.
28. Куликович А.Е. и др. - В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.2. "Недра", М., 1967.
29. Куликович А.Е. Геологу о кибернетике. "Недра", М., 1968.
30. Куликович А.Е., Басин Я.Н. - В кн.: Состояние и пути дальнейшего развития ядерной геофизики. ОНТИ ВНИЭС, М., 1968.
31. Куликович А.Е. - Геоф. сб. 3/14/. "Наукова думка", К., 1965.
32. Куликович А.Е. - В кн.: Геофизические исследования на Украине. "Техніка", К., 1969.
33. Куликович А.Е. - В кн.: Применение новых математических методов и вычислительных машин в теории и практике добычи нефти. "Недра", М., 1966.
34. Куликович А.Е., Ханкин А.Л. - В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.5. "Недра", М., 1972.
35. Куликович А.Е. - Бюлл. научн.-техн. информ., I. ОНТИ ВНИЭС, М., 1966.
36. Куликович А.Е. - В кн.: Геофизические исследования на Украине. "Техніка", К., 1969а.
37. Куликович А.Е. Палетки бокового каротажного зондирования и методика их применения. Гостоптехиздат, М., 1958.
38. Куликович А.Е. - В кн.: Нефтяная и газовая промышленность, 1964, 4.
39. Мак-Кракен Д.Д. Программирование на АЛГОЛЕ. "Мир", М., 1964.
40. Математические методы в геологии. "Наука", М., 1968.
41. Побочина В.И. - В кн.: Прикладная геофизика, в.22. Гостоптехиздат, М., 1959.
42. Ривкин И.Я. - В кн.: Прикладная геофизика, в.35. Гостоптехиздат, М., 1962.
43. Сохранов Н.Н. - В кн.: Прикладная геофизика, в.27. Гостоптехиздат, М., 1960.
44. Сохранов Н.Н. Обработка и интерпретация промыслово-геофизических данных на цифровых вычислительных машинах. ВНИОЭНГ, М., 1967.
45. Сохранов Н.Н., Наймарк Г.С. - Прикладная геофизика, в.43. "Недра", М., 1965.
46. Ханкин А.Л. - В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.4. "Недра", М., 1970.
47. Ханкин А.Л. - В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.5. "Недра", М., 1972.
48. Шамкова В.Б., Саубанова С.Г. - В кн.: Автоматическая обработка и преобразование геофизической информации, в.5. "Недра", М., 1972.
49. Strong J., Wegstein J., Fritter A. - Comm. of ACM, 1958, 1, 8-9.
50. Conway M. - Comm. of ACM, 1958, 1, 10.
51. Harvey B. - Comm. of ACM, 1961, 4, 3.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Глава I. ЦЕЛИ И СРЕДСТВА МАШИННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРОМЫСЛОВО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ	5
§ 1. Машинная интерпретация промыслово-геофизических данных	5
§ 2. Преобразование каротажных диаграмм в цифровую форму	7
Формы представления информации	7
Квантование кривых	8
Непрерывно-дискретные преобразователи	10
§ 3. Устройства для выдачи результатов машинной интерпретации в цифровой и аналоговой форме	12
§ 4. Передача промыслово-геофизической информации	13
§ 5. Электронные цифровые вычислительные машины, применяемые при решении задач промысловой геофизики	13
§ 6. Алгоритмизация обработки промыслово-геофизических данных	17
§ 7. Обобщенная информационно-алгоритмическая схема машинной интерпретации промыслово-геофизических данных	28
Глава II. АЛГОРИТМЫ РАСЧЛЕНЕНИЯ КАРОТАЖНЫХ КРИВЫХ	31
§ 1. Общая схема расчленения разреза на пласты	31
§ 2. Метод характерных точек	32
§ 3. Расчленение кривых по уровенным точкам	32
Уровенные точки	32
Простейший алгоритм расчленения по уровенным точкам	35
Усложнение алгоритма расчленения по уровенным точкам	44
Примеры расчленения каротажных кривых по уровенным точкам	49
§ 4. Выделение экстремальных точек и точек перегиба	50
Экстремальные точки	50
Точки перегиба	52
Связанные точки	55
§ 5. Расчленение кривых с помощью модели. Узловые точки	56
Точки, связанные с моделью	56
Статистические методы расчленения кривых	58
Узловые точки	59
§ 6. Программа комплексного расчленения каротажных кривых	61

Глава III.	РАСЧЛЕНЕНИЕ КРИВЫХ КАРТАЖА СОПРОТИВЛЕНИЙ. ОТЧЕТ ХАРАКТЕРНЫХ ЗНАЧЕНИЙ	64
§ I.	Сводка конфигураций кривых КС	64
	Однородный изотропный пласт, залегающий в однородной изотропной вмещающей толще. Гра- диент-зонд	64
	Покрывающая и подстилающая толщи имеют раз- личное удельное сопротивление. Все среды изотропны	66
	Пласт с проникновением. Все среды изотропны	67
	Анизотропные пластины	68
	Пачка пластов	68
	Потенциал-зонд	69
	Кривые КС против переходной зоны	70
§ 2.	Простейшие алгоритмы расчленения кривых КС	72
§ 3.	Амплитудная фильтрация	77
§ 4.	Точки существенного экстремума	79
§ 5.	Подпрограмма расчленения кривых КС градиент- зонда	85
§ 6.	Адаптирующийся блок расчленения кривой градиент- зонда	88
§ 7.	Расчленение кривых кровельного градиент-зонда	90
§ 8.	Отсчет характерных значений	91
	Характерные значения	93
	Алгоритм отсчета средних и оптимальных значений	99
	Отсчеты экстремальных значений	99
	Ступенчатая функция на базе кривой КС	100
Глава IV.	ПОЛУЧЕНИЕ СВОДНОГО РАСЧЛЕНЕНИЯ РАЗРЕЗА БУРОВОЙ СКВАЖИНЫ. КАЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРОМЫСЛО- ВО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ	100
§ I.	Произведение расчленений. Формирование характе- ристических чисел (комплексных кодов)	100
§ 2.	Укрупнение сводного расчленения. Марковские формулы	102
§ 3.	Переход от комплексных кодов к литологии пласта. Замена комплексных кодов символическими	103
§ 4.	Примеры расчленения по комплексным кодам	105
	Расчленение диаграмм микрозондов	105
	Расчленение продуктивного разреза по комплексу картажных диаграмм	108
§ 5.	Применение специальных программ определения типа пласта	111
Глава V.	КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ	113
§ I.	Способы перехода от характерных значений к пара- метрам пласта	113
§ 2.	Интерпретация кривых картажного зондирования - Способы интерпретации кривых БКЗ	115
	Математическая модель количественной интер- претации промыслово-геофизических данных	116
	Эквивалентность способов метрического поиска и средневзвешенного	125
	Определение весовых коэффициентов при вычис- лении расхождения между фактической и теоре- тической кривыми картажного зондирования	127
§ 3.	Количественная интерпретация других методов картажа (микрозонды, НГК и др.)	128

Интерпретация данных микрокаротажа	128
Интерпретация данных радиоактивного каротажа. Трансформация каротажных кривых и кривые кажущейся пористости и кажущейся нефтегазонасыщенности	131
§ 4. Вторичная качественная интерпретация.	137
Глава VI. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КАРОТАЖНЫХ ДИАГРАММ	138
§ 1. Общее представление о системах автоматической интерпретации каротажных диаграмм	138
§ 2. Система С-2 литологического расчленения	139
§ 3. Системы автоматической интерпретации диаграмм бокового каротажного зондирования	145
Система С-1	148
Система С-3	159
Система С-5	163
§ 4. Системы машинной интерпретации каротажных диаграмм угольных и железорудных скважин.	172
Система С-4	172
Система С-6	173
Система С-7	176
Заключение	180
Литература	184

Куликович Арнольд Евгеньевич
ОСНОВЫ МАШИННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КАРОТАЖНЫХ ДИАГРАММ

Печатается по постановлению ученого совета УкрНИГРИ
Министерства геологии и охраны недр УССР

Редактор Л.К.Медникова. Художественный редактор Н.И.Возный.
Оформление художника А.В.Марченко. Технический редактор
Р.Э.Хазирова. Корректор Н.Б.Игнатовская

Подписано к печати 4.III 1974г. БФ 00198. Бумага офс. № 2,
60x90 1/16. Усл.печ.л.11,75. Уч.-изд.л.11,13. Тираж 750.
Зак. № 4-21^А Изд.№ 362. Цена 1 руб.12 коп.

Издательство "Наукова думка". Киев, Редина, 3.

Киевская типография научной книги Республиканского производственного объединения "Полиграфкнига" Госкомиздата УССР.
Киев, Редина, 4.

1 руб. 12 коп.

6 . 5 0 0

Д4
33642

«НАУКОВА ДУМКА»