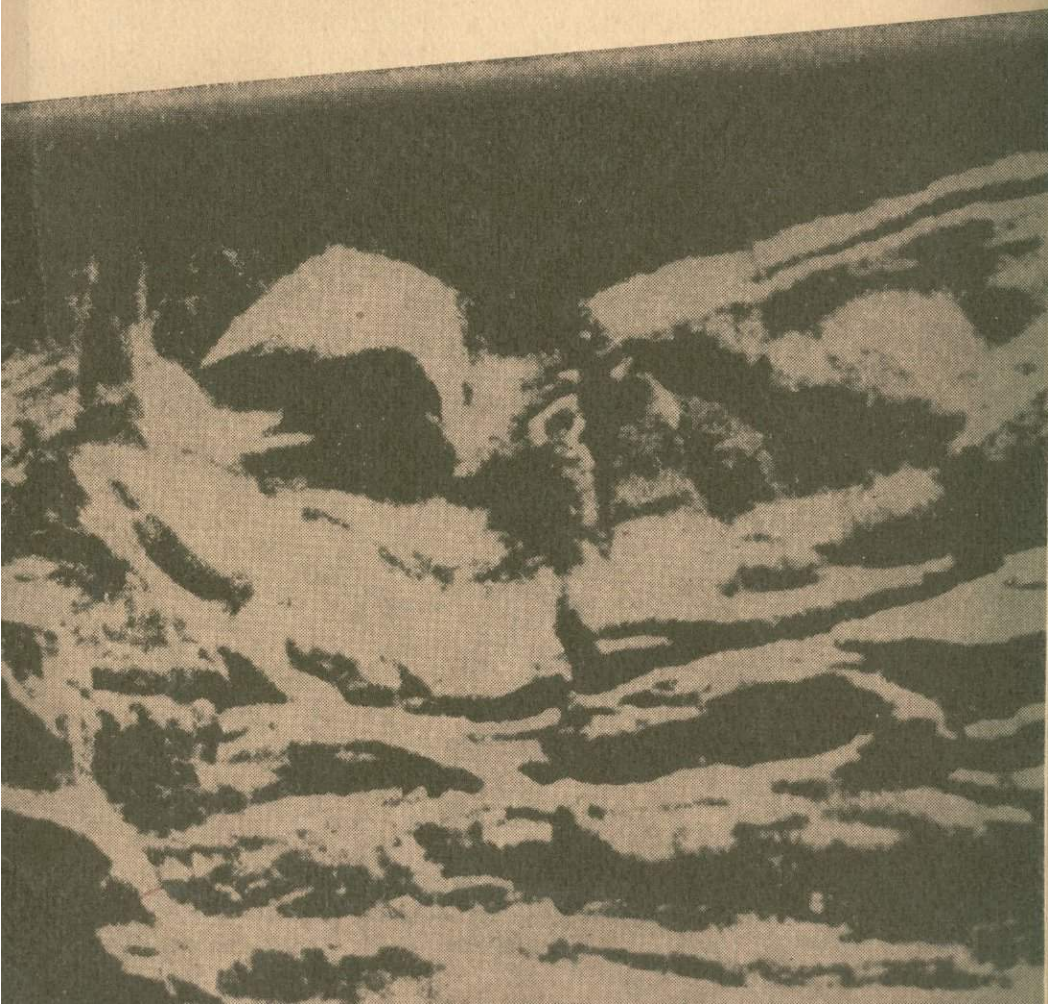
Е. Г. Бро

ВЛИЯНИЕ КАТАГЕНЕЗА НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛИЗАЦИЮ ПОДЗЕМНЫХ ВОД



МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «СЕВМОРГЕО»

Е. Г. Бро

ВЛИЯНИЕ КАТАГЕНЕЗА НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛИЗАЦИЮ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

3249



Ленинград
«Недра»
Ленинградское отделение
1980



УДК 552.144 : 553.982

Бро Е. Г. Влияние катагенеза на физические свойства терригенных пород и минерализацию подземных вод. — Л. : Недра, 1980. — 152 с. (М-во геологии СССР. Науч.-произв. объединение «Севморгео»).

Работа посвящена исследованию роли катагенеза в формировании единой системы порода—вода с целью выработки методов оценки и прогнозирования физических свойств коллекторов и минерализации подземных вод.

Использованы геолого-геофизические материалы по мезозойским и палеозойским толщам Западно-Сибирской плиты и прогибов арктической части Сибирской платформы. При помощи математических методов (линейный регрессионный, факторный, дискриминантный анализы и тренд-анализ) установлены и исследованы многомерные связи между вещественным составом пород, минерализацией подземных вод и определенными в лабораторных и скважинных условиях физическими свойствами обеих составляющих системы. На основе наиболее информативных причинно-следственных связей разработан комплекс методов прогнозирования коллекторских свойств пород и минерализации подземных вод. Подчеркнуто определяющее значение сведений о степени катагенетического изменения пород в решении прогнозных задач.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы при поисках, разведке и подсчете прогнозных запасов нефти, газа и подземных вод в терригенных отложениях различных регионов страны.

Книга предназначена для литологов, нефтяных геологов и промысловых геофизиков.

Табл. 20, ил. 9, прилож. 1, список лит. 119 назв.

Евгений Гдальевич Бро

ВЛИЯНИЕ КАТАГЕНЕЗА НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛИЗАЦИЮ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Редактор издательства М. Г. Дешалыт. Обложка художника И. Г. Архипова.
Технический редактор И. Г. Сидорова. Корректор Н. П. Никитина.

ИБ № 2912

Сдано в набор 10.08.79. Подписано в печать 28.02.80. М-29555. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 9,5. Уч.-изд. л. 11,14. Тираж 830 экз. Заказ № 2182/1222. Цена 1 р. 70 к.

Издательство «Недра». Ленинградское отделение. 193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 12.

Типография № 2 Ленуприздата. 192104, Ленинград, Литейный пр., 55.

Б $\frac{20804-322}{043(01)-80}$ 512—79 1904050000

© Издательство «Недра», 1980

ПРЕДИСЛОВИЕ

В процессе изменения терригенных пород и насыщающих их вод под влиянием температур и давлений в недрах осадочных толщ катагенез является одним из этапов, занимающих промежуточное положение между диагенезом и метаморфизмом (или метагенезом). Охватывая преобразования пород в диапазоне от начала литификации до консолидации, катагенез вносит большой вклад в формирование физических свойств пород, в том числе емкостных и фильтрационных. Практически поровыми коллекторами служат терригенные породы, находящиеся именно на этапе катагенеза, поэтому изучение его так важно для нефтегазовой геологии и гидрогеологии. Поровые коллекторы и насыщающие их воды, взаимодействуя, образуют единую уравновешенную или нескомпенсированную систему порода—вода, изучение которой, очевидно, более плодотворно, чем изучение отдельных составляющих. Данная работа посвящена изучению изменения под влиянием катагенеза самой системы и ее физических свойств.

Анализ постдиагенетических изменений пород позволяет выделить [93] три типа катагенеза: прогрессивный, динамический (динамокатагенез) и контактовый термальный. Прогрессивный катагенез вызван влиянием термобарических условий недр и, возможно, геологического времени, он возникает в погружающейся толще осадков. Динамокатагенез обусловлен давлением и поступлением растворов со стороны складчатых областей. Зоны контактового термального катагенеза наблюдаются в некотором удалении от магматических тел, вслед за зонами метаморфизма. В данной работе исследуется главным образом влияние наиболее распространенного в нефтегазоносных областях прогрессивного катагенеза, и только в гл. 4 затрагиваются некоторые стороны влияния двух других типов.

Изменение терригенных пород под влиянием прогрессивного катагенеза в последние два десятилетия глубоко исследовалось в нашей стране А. В. Копелиовичем, В. Д. Шутовым, А. Г. Коссовской, К. Р. Чепиковым, Н. В. Логвиненко, Г. Н. Перозио [57, 113, 59, 60, 109, 70, 80—82] и другими, за рубежом — Р. У. Фербриджем, Э. К. Депплесом, Г. Мюллером [105, 37, 77] и другими. Особенно высокий уровень, вероятно близкий к предельному, был достигнут петрографами в качественной характеристике катагенеза по наблюдениям преобразований пород в шлифах. Было также положено начало количественной оценке катагенетических изменений.

В некоторых процессах предполагалось участие подземных вод. С другой стороны, П. А. Крюков, Э. Т. Дегенс и Дж. В. Чилингар, А. Е. Бабинец, А. А. Карцев, В. Энгельгардт, А. Э. Конторович, Н. М. Кругликов [65, 36, 1, 51, 115, 56, 63] и многие другие гидрогеологи и геохимики привлекали сведения о катагенетическом уплотнении пород и минеральных превращениях в них для объяснения особенностей солевого состава вод. Влияние катагенеза на коллекторские и экранирующие свойства пород изучали Б. К. Прошляков, П. А. Карпов, А. З. Бедчер, С. И. Шишигин, И. Н. Ушатинский, Г. Э. Прозорович, Б. А. Лебедев, Э. Г. Коблов [85, 50, 4, 111, 112, 104, 84, 68, 53] и другие.

Данная работа отличается от предыдущих тем, что в ней рассматривались катагенетические изменения и в породах, и в насыщающих породы водах. Наряду с изучением роли подземных вод в отдельных процессах минерального преобразования пород выяснялись основные закономерности формирования единой системы порода—вода.

Исследование выполнено в разных масштабах: в шлифах, в образцах, в пластах и толщах мощностью в сотни метров. Использование широкого набора методов математической обработки данных (регрессионный, в том числе тренд-анализ, факторный и дискриминантный анализы) позволило не только количественно оценить известные или предполагаемые связи, не только придать строгость доказательствам, но и выявить закономерности далеко не очевидные. С учетом влияния катагенеза на породы и воды разработаны принципы интерпретации промыслово-геофизических данных, прогнозирования коллекторских свойств пород и минерализации подземных вод.

Объектом исследования послужили палеозойские и мезозойские терригенные отложения Западно-Сибирской плиты (включая акваторию), Енисей-Хатангского, Лено-Анабарского, Приверхоянского прогибов и Анабаро-Хатангской седловины. Привлечение литературного материала по другим регионам дополнительно расширяет границы распространения многих описанных явлений и закономерностей. Геологическое строение перечисленных регионов, вещественный состав пород и минерализация подземных вод описаны в работах [19, 22, 23, 26, 31, 39, 44, 46, 48, 63, 87, 89, 100 и др.]. Породы представлены песчаниками, алевролитами, глинами и аргиллитами. Песчаники преимущественно мелкозернистые, среднемелкозернистые, изредка мелко-среднезернистые. По минеральному составу обломочного материала алеврито-песчаные породы изменяются от граувакк до полевошпатово-кварцевых. Главная составляющая цемента обычно — глинистый материал, в отдельных конкрециях и линзовидных пропластках преобладает карбонатный. Глинистые породы, как правило, содержат примесь алевритового материала.

Взаимоотношение вещественного состава пород и минерализации подземных вод исследовалось в северной части Западно-Сибирского артезианского бассейна, который приурочен к Западно-Си-

бирской плите и Енисей-Хатангскому прогибу. Подземные воды мезозойских отложений находятся в зонах затрудненного и весьма затрудненного водообмена. Они изменяются от пресных гидрокарбонатных кальциевых и натриевых до хлоридных натриевых и кальциево-натриевых рассолов.

Рассматривались следующие физические свойства пород: открытая пористость, проницаемость, остаточная водонасыщенность, параметр пористости и магнитная восприимчивость. В исследовании минерализации подземных вод использовались стандартные анализы солевого состава. Физические свойства системы порода—вода характеризовались электрокаротажными данными. Для исследований автором собраны образцы из керна скважин, лабораторные определения физических свойств пород, промыслово-геофизические данные и анализы подземных вод — в подразделениях НПО Севморгео, Тюменского и Красноярского территориальных геологических управлений, во ВНИГРИ и в ЗапСибНИГНИ. Часть измерений, определений и анализов выполнена по стандартным методам в лабораториях НПО Севморгео. Шлифы описаны в петрографической лаборатории НПО по предложенной нами схеме. Значение показателя преломления витринита измерено И. Н. Дроздовой и Т. Н. Вишневской. О нестандартных лабораторных определениях и подсчетах литолого-петрографических показателей в шлифах упомянуто в тексте.

Математическая обработка данных произведена в вычислительном центре ВСЕГЕИ и секторе АСУ НПО Севморгео. Программы составлены сотрудниками, обслуживающими ЭВМ, некоторые из них опубликованы [83].

В книге помимо общепринятых неоднократно используются следующие обозначения.

N — зона катагенеза (в условных рангах); содержание в породе, %: АГ — алеврито-глинистого материала, Г — глинистого материала, Кр — карбонатного материала; А — содержание в породе битумоида «А», вес. %; доля зерен от всего обломочного материала, %: Кв — кварца, Пл — плагиоклаза; доля обломков от всего обломочного материала, %: ОК — кремнистых пород и эффузивов, ОГ — глинистых пород; ΣК — общее количество контактов обломочных зерен в породе; В/ΣК — доля контактов внедрения от общего количества контактов; содержание в глинистом материале, %: Гс — гидрослюды, Кл — каолинита, МС — монтмориллонита со смешаннослойными минералами, Хл — хлорита; Гл — глинистость разреза (отношение суммарной мощности непроницаемых по записи ПС пород к общей мощности рассматриваемого интервала глубин); АПС — амплитуда аномалии потенциала собственной поляризации, мВ; R — коэффициент множественной корреляции; r — коэффициент парной корреляции.

Автор признателен Д. С. Сорокову, З. З. Ронкиной, М. А. Садикову, О. Н. Яковлеву, Л. Д. Кнорингу и Б. А. Лебедеву, консультациями которых пользовался при проведении описанных в книге исследований.

ГЛАВА 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ КАТАГЕНЕЗА В ФОРМИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД И МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

§ 1. Мера интенсивности катагенетического преобразования пород по разрезу

Исследования, выполненные первоначально в Енисей-Хатангском прогибе [9, 12], показали, что емкостные и фильтрационные свойства терригенных отложений так же, как во многих других регионах страны и мира, заметно ухудшаются с глубиной. Причем на фоне общего ухудшения существуют колебания, зависящие от особенностей структуры и вещественного состава пород. Чтобы количественно оценить и сравнить влияние глубины залегания и литологических характеристик, необходимо было обратиться к математическим методам. Наиболее подходящим для выполнения подобных исследований, как показал опыт Л. Д. Кноринга и В. Н. Деча [38, 52], М. Е. Каплана, Л. Д. Кноринга [47], Е. Г. Бро [11], Е. Г. Бро, В. Н. Деча и др. [13], можно считать один из вариантов факторного анализа — метод главных компонент [35, 74, 78, 108].

Метод главных компонент позволяет выявлять структуру отношений взаимосвязанных переменных. Он дает возможность изучать наиболее существенные связи с учетом влияния всех рассматриваемых признаков системы, приводит к замене набора входных признаков существенно меньшим числом независимых переменных — факторов. При достаточно полном и разностороннем подборе признаков изучаемого объекта отдельные факторы могут дать представление о процессах его формирования. Решая подобные задачи с помощью корреляционного анализа, пришлось бы осмысливать вместе матрицы парных, частных и множественных коэффициентов корреляции, необозримость которых при большом числе признаков очевидна.

Одна из первых выборок, на которой с применением метода главных компонент изучалось влияние геологических характеристик на физические свойства пород, состояла из 71 образца алевролитов и песчаников юрского и мелового возраста с различных нефтеразведочных площадей Енисей-Хатангского прогиба, с проницаемостью более 0,0001 мкм^2. Рассматривались девять признаков: глубина залегания пород H, м; общее содержание цемента Ц, %; доля карбонатного цемента от общего $Ц_к$, %; доля глинистого цемента от общего $Ц_г$, %; медианный диаметр обломочных зерен Md, мм; коэффициент сортированности S_0; открытая пористость $K_п$, %; проницаемость $K_{пр}$, мкм^2; параметр пористости $P_п$. Литологические

признаки подсчитывались в шлифах. Параметр пористости, представляющий собой отношение удельного электрического сопротивления породы к удельному электрическому сопротивлению насыщающей ее воды, определялся в лаборатории при концентрации раствора NaCl 10 г/л. Результаты вычисления на ЭВМ помещены в табл. 1.

Таблица 1

Факторные нагрузки на признаки выборки по 71 образцу алеврито-песчаных коллекторов юрского и мелового возраста

Признаки	Факторы				
	1	2	3	4	5
H	**—0,206**	**—0,867**	—0,033	**+0,275**	**+0,238**
Ц	**—0,560**	**+0,689**	**—0,197**	+0,069	**—0,181**
$Ц_к$	**—0,835**	+0,152	**+0,469**	—0,176	+0,157
$Ц_г$	**+0,830**	—0,160	**—0,476**	+0,176	—0,159
Md	**+0,217**	**—0,419**	**+0,751**	+0,024	**—0,418**
S_0	**—0,687**	**+0,493**	—0,044	**+0,447**	—0,129
$\lg K_п$	**+0,665**	**+0,563**	**+0,228**	—0,101	—0,013
$\lg K_{пр}$	**+0,525**	**+0,286**	**+0,655**	**+0,326**	**+0,213**
$\lg P_п$	**—0,590**	**—0,631**	+0,031	+0,001	**—0,185**
Доля фактора, %	37,0	27,7	17,0	5,1	4,6

Примечание. Здесь и далее полужирным выделены нагрузки, превышающие 5%-ный уровень значимости.

1-й фактор в табл. 1 исчерпывает 37% дисперсии признаков. Распределение больших нагрузок среди признаков, характеризующих вещественный состав пород, и приуроченность наименьшей нагрузки к показателю H позволяют считать, что фактор несет информацию главным образом о седиментации и, может быть, о диагенезе. Знаки возле нагрузок 1-го фактора на признаки фиксируют, как и следовало ожидать, прямую зависимость проницаемости от медианного размера зерен, а также обратную зависимость пористости и проницаемости от общего содержания цемента в коллекторах и величины коэффициента сортированности. Содержания карбонатного и глинистого материала в общей массе цемента являются признаками-антагонистами в своем влиянии на емкостные и фильтрационные свойства, и поэтому обладают противоположными знаками. Параметр пористости в свою очередь находится в обратной зависимости от коллекторских свойств.

Незначительность нагрузки на медианный диаметр зерен объясняется, по-видимому, тем, что изменение его значения происходит обычно в малом интервале от 0,25 до 0,05 мм по сравнению, например, с широким диапазоном от 0,1 до 99% содержания карбонатного цемента. Если бы содержание карбонатного и глинистого

цементов измерялось в процентах от всей площади породы в шлифе, то роль медианного диаметра, возможно, возросла бы. К тому же «обедняя» остальные признаки, наибольшую долю нагрузки берут на себя опять же содержания глинистого и карбонатного цементов, так как они образуют почти замкнутую систему (сумма их чаще всего равна 100%).

2-й фактор извлекает 27,7% дисперсии. Он контролирует изменение признаков, которые отражают уплотнение пород с глубиной при относительной выдержанности вещественного состава по разрезу и, очевидно, совпадает с процессом прогрессивного катагенеза. Катагенетические изменения пород выражаются в используемых признаках уменьшением пористости и увеличением параметра пористости вследствие уплотнения пород. Значимые нагрузки на Ц, *Md*, S_0 обусловлены ограничением минимальной проницаемости образцов, включенных в выборку. Чем больше глубина залегания, тем меньше в алеврито-песчаных образцах должно быть цемента, тем меньше должен быть коэффициент сортированности и тем больше медианный размер зерен, чтобы сохранилась проницаемость более 0,0001 мкм^2.

В структуре следующих трех факторов нагрузки на пористость и параметр пористости невелики или вовсе незначимы. Сравнительно большие нагрузки на проницаемость обусловлены прямой зависимостью ее от медианного размера зерен и от каких-то параметров порового пространства, которые не расшифровываются в данном наборе признаков.

Мерой интенсивности катагенеза в данной выборке служит глубина залегания. Отождествляя 2-й фактор с процессом, можно определить долю участия катагенеза в формировании физических свойств выборки: для прологарифмированной пористости, например, она равна 32%. Однако такое измерение интенсивности катагенеза имеет очевидные недостатки. Во-первых, на участках с разной историей тектонического развития на одной и той же глубине степень постседиментационных изменений может быть различна. Так, на валах породы преобразованы больше, чем в прогибах. Во-вторых, с глубиной иногда коррелируются некоторые заложенные еще в седиментогенезе изменения вещественного состава пород по разрезу. Так, хорошо коррелируется с глубиной увеличение глинистости нижнемеловых отложений вниз по разрезу на севере Западно-Сибирской плиты и в Енисей-Хатангском прогибе.

Более совершенной мерой интенсивности катагенеза можно считать стадии углефикации рассеянного органического вещества (РОВ). Стадии углефикации фиксируют экстремальные геологические условия, приводящие к существенным необратимым преобразованиям структуры и минерального состава пород. Они являются индикатором максимальных палеотемператур, под воздействием которых протекал катагенез, и весьма уверенно коррелируются с максимальными палеоглубинами погружения [55], т. е. дают представление о термобарических условиях в недрах. М. Тайхмюллер и Р. Тайхмюллер [118], Н. В. Лопатин [72, 73], Н. Б. Вассоевич [21]

и другие считают, что стадии углефикации РОВ несут информацию и о геологическом времени.

Стадии определялись по показателю преломления витринита в единичных образцах, а затем в разрезах по разведочным площадям выделялись зоны, которые объединяют отложения с РОВ на одинаковой стадии углефикации. Каждой зоне присваивался условный ранг. Зона, содержащая РОВ на подстадии $Б_{1-2}$, обозначалась цифрой 1; зона, где РОВ находится на подстадии $Б_3$, — 2; зона длиннопламенной стадии углефикации РОВ — 3; зона газовой стадии — 4 и зона, где РОВ достигло жирной стадии углефикации, — 5. Буроугольная стадия в отличие от других была разделена на две части, потому что в разрезе они отмечают две резко отличающиеся по уплотнению пород зоны: в верхней залегает много песков и алевритов, в нижней, как будет показано далее, уплотнение происходит интенсивнее, чем в какой-либо другой нижележащей зоне. К сожалению, использование шкалы стадий углефикации не избавило от присущего глубине второго недостатка — стадии обычно значимо коррелируются с глубиной и, следовательно, с любыми обязанными седиментации изменениями вещественного состава пород вниз по разрезу.

Показатели преломления витринита замерялись в широком диапазоне литологических разностей. Чтобы использовать измерения для выделения и прослеживания зон катагенеза, понадобилось оценить влияние на них вещественного состава пород. Решением аналогичной задачи для углефицированного детрита занимались П. П. Тимофеев, Л. И. Боголюбова [101], И. С. Софиев, И. А. Горленко [97], Б. К. Чичуа [110], П. А. Трушков [102], Г. М. Парпарова [79] и другие. Эти исследователи пришли к выводу, что при прочих равных условиях интенсивность углефикации растительных остатков нарастает в ряду песчаник—аргиллит—уголь. По данным Б. К. Чичуа, максимальная разница в скорости углефикации между крайними членами ряда может выражаться целой стадией катагенеза. По данным П. А. Трушкова, присутствие в алеврито-песчаных породах карбонатного материала и в аргиллитах — битума замедляет, тормозит созревание витринита.

Воспроизводимость упомянутых наблюдений и возможность количественного их выражения изучались на коллекции, включающей 50 образцов керна из пермских, триасовых, юрских и меловых отложений севера Западно-Сибирской плиты, Енисей-Хатангского прогиба и Анабаро-Хатангской седловины. Песчаники представлены в коллекции 31 образцом, алевролиты — 9, глины и аргиллиты — 10. Каждый образец характеризовался следующими признаками: показатель преломления витринита $N_в$; зона катагенеза, определяемая по наиболее часто встречающимся значениям показателя преломления, N, в условных рангах; глубина залегания, м; содержание в породе алеврито-глинистого материала (фракция $<0{,}1$ мм) — АГ, %; содержание глинистого материала (фракция $<0{,}01$ мм) — Г, %; медианный диаметр обломочных зерен, мм; коэффициент сортированности; содержание карбонатного мате-

Таблица 2

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 50 образцам алеврито-песчаных и глинистых пород пермского, триасового, юрского и мелового возраста рассматриваемых регионов

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы							
				1	2	3	4	5	6	1′	2′
$N_в$	1,660—1,900	1,743	0,003	**—0,308**	**+0,844**	+0,080	—0,089	—0,070	+0,056	**+0,905**	0
N	1—5	2,8	1,067	**—0,532**	**+0,787**	+0,048	+0,067	—0,051	—0,034	**+0,928**	+0,230
H	100—4370	1999	$1223 \cdot 10^3$	**—0,333**	**+0,675**	+0,097	**—0,495**	+0,157	—0,053	**+0,755**	+0,083
АГ	7—100	46	1591	**+0,882**	+0,259	+0,005	—0,137	—0,212	+0,087	—0,060	**—0,917**
Г	1—97	28	825	**+0,840**	+0,182	—0,175	—0,225	+0,082	—0,037	—0,118	**—0,853**
Md	0,003—0,330	0,126	0,009	**—0,879**	—0,181	+0,008	+0,116	**+0,292**	—0,055	+0,130	**+0,890**
S_0	1,014—6,274	1,882	1,189	**+0,489**	+0,082	**+0,619**	+0,108	**+0,527**	+0,270	—0,093	**—0,489**
Кр	3,3—47,4	15,1	105,2	**+0,290**	+0,167	**+0,638**	**+0,535**	—0,093	**—0,417**	+0,054	**—0,328**
$K_п$	1,1—31,0	12,5	42,9	—0,119	**—0,904**	—0,087	—0,158	+0,110	—0,116	**—0,815**	**+0,427**
$C_{орг}$	0,07—13,69	1,03	4,02	**+0,420**	**+0,388**	**—0,614**	+0,038	**+0,380**	**—0,337**	+0,224	**—0,525**
А	0,0003—0,3	0,024	0,003	+0,017	+0,264	**—0,514**	**+0,751**	+0,035	+0,239	+0,242	—0,110
Доля фактора, %				29,6	27,2	13,5	11,2	5,6	4,1	27,6	29,2

риала в породе — Кр, %; открытая пористость, %; содержание органического углерода — $C_{орг}$, вес. %; содержание битумоида «А» (по результатам люминесцентно-капиллярного анализа) — А, вес. %. Гранулометрический состав пород подсчитан в шлифах. За содержание карбонатного материала с некоторой долей условности принималась растворимая в соляной кислоте часть массы породы, раздробленной для определения $C_{орг}$.

Составленная по коллекции выборка сведений обрабатывалась на ЭВМ по методу главных компонент. Некоторые статистические характеристики и нагрузки факторов на признаки выборки помещены в табл. 2.

Программа метода главных компонент выполнена таким образом, что в выдаваемой ЭВМ матрице факторы расположены в порядке убывания их вклада в описание общей дисперсии признаков. При этом значимые нагрузки на признаки могут распределяться по многим факторам. Сконцентрировать распределенные нагрузки можно, повернув факторные оси в многомерном пространстве так, чтобы одна из них проходила через интересующий нас признак. Тогда признак приобретает максимальную нагрузку, наиболее отчетливо выявляются его связи с остальными и ослабляются или совсем удаляются из нового фактора связи остальных признаков между собой.

Как отмечено в табл. 2, значимые нагрузки на $N_в$ распределены по первым двум факторным осям. Если их повернуть относительно $N_в$, то появятся трансформированные факторы 1′-й и 2′-й. Процедура поворота была выполнена, и нагрузки на признаки новых факторов помещены в табл. 2. Теперь значимая нагрузка на $N_в$ содержится только в структуре 1′-го фактора. Величина нагрузок 1′-го фактора на признаки и знаки нагрузок свидетельствуют о прямой связи $N_в$ с N и H и обратной — с $K_п$. Коэффициенты парной корреляции $N_в$ с перечисленными показателями соответственно +0,825; +0,614 и —0,643. Величина нагрузок на признаки вещественного состава гораздо ниже принятого уровня значимости, т. е. показатель преломления витринита, вопреки ожиданию, не зависит от признаков, описывающих в данной выборке породу. Отсутствие ожидаемой зависимости может быть обусловлено соизмеримостью диапазона изменения $N_в$ под влиянием вещественного состава пород с точностью замера его и других признаков. Так или иначе, почти 82% дисперсии $N_в$ не связаны с имеющимися характеристиками пород, поэтому при выделении и прослеживании зон катагенеза влияние литологии образцов, в которых измерялся показатель преломления, на его значение можно не учитывать. Тесная корреляция N с $N_в$ позволяет считать, что выделенные зоны катагенеза так же, как и единичные определения показателя преломления витринита, несут информацию об условиях процесса — о максимальных палеотемпературах, о максимальных палеоглубинах залегания (т. е. о давлениях) и о геологическом времени.

В дополнение к решению основной задачи можно отметить, как и в предыдущем исследовании, двойственную природу пористости.

В составе 1′-го фактора пористость контролируется признаками катагенеза, в составе 2′-го — признаками седиментации. В предыдущую выборку вошел материал в основном из зон катагенеза с $N = 1 \div 3$, лишь несколько образцов были отобраны из зоны, где РОВ достигло газовой стадии углефикации ($N=4$). В данной же выборке присутствовали образцы из зоны, ранговый номер которой — 5. Поэтому в данной выборке влияние катагенеза на пористость гораздо сильнее, чем в предыдущей; 1′-й «катагенетический» фактор извлекает из общей дисперсии $K_п$ 66%.

§ 2. Основные направления катагенеза

В двух рассмотренных выборках катагенетические изменения пород связывались только с глубиной залегания и степенью углефикации РОВ. С помощью следующей выборки будет показано, что такой подход нельзя считать полным, исчерпывающим.

Объектом исследований послужила коллекция, содержащая 35 образцов алеврито-песчаных пород с карбонатно-глинистым цементом из юрских и меловых отложений западной части Енисей-Хатангского прогиба. Для каждого образца была известна глубина залегания в метрах, по наиболее часто встречающимся в разрезе показателям преломления витринита определялась зона катагенеза в рангах. В лаборатории измерялись открытая пористость, проницаемость и остаточная водонасыщенность $K_в$, %. В шлифах, изготовленных из образцов, Б. А. Лебедевым подсчитывались медианный диаметр зерен, содержание в процентах от всей площади шлифа глинистого цемента, карбонатного, каолинитового Кл, доля регенерированных зерен от всех зерен кварца рКв/Кв, общее количество контактов зерен ΣК и доля в нем контактов внедрения В/ΣК. Статистические сведения об образцах выборки помещены в табл. 3. Результаты обработки накопленных по образцам данных методом главных компонент приведены в той же таблице.

Единственная значимая и довольно высокая нагрузка на N содержится только в структуре 1-го фактора, который, очевидно, выражает влияние катагенеза. Увеличение интенсивности катагенеза с глубиной фиксируется большой нагрузкой на H. Нагрузки на признаки и знаки у них показывают, что под влиянием катагенетического уплотнения у алеврито-песчаных пород увеличивается число контактов внедрения, ухудшаются коллекторские свойства и возрастает остаточная водонасыщенность. Особенно резко ухудшается пористость. Около 81% дисперсии ее исчерпывается 1-м «катагенетическим» фактором, нагрузки остальных незначимы. Следует также отметить обратную зависимость содержания каолинитового цемента от интенсивности катагенеза. Более детально изменение содержания каолинитового материала в глинистом цементе рассматривается в дальнейшем на других, специально подобранных данных.

На проницаемость, в отличие от пористости, оказал влияние и 2-й фактор. Смысл знаков и значимых нагрузок здесь можно истол-

Таблица 3

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 35 образцам алеврито-песчаных коллекторов юрского и мелового возраста Енисей-Хатангского прогиба

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы				
				1	2	3	4	5
N	1,5—4	2,9	0,199	**—0,808**	+0,046	+0,256	—0,291	+0,242
H	900—2605	1914	$2188 \cdot 10^2$	**—0,727**	+0,057	+0,335	**—0,501**	+0,036
Г	0,2—18,0	5,9	18,7	+0,330	**+0,585**	+0,188	—0,135	+0,062
Md	0,140—0,340	0,214	0,002	+0,319	—0,109	**+0,674**	+0,028	**—0,437**
Кр	0,1—8,0	2,6	6,1	—0,255	+0,001	+0,238	**+0,603**	**+0,640**
Кл	0,1—10,0	2,2	5,0	**+0,351**	**+0,517**	**+0,687**	+0,287	+0,093
$\frac{pKb}{Kb}$	1—65	18	360	—0,246	**—0,630**	**+0,486**	+0,222	—0,287
ΣК	5,00—6,60	5,82	0,11	+0,276	**+0,584**	**+0,421**	—0,226	+0,011
$\frac{B}{\Sigma K}$	0,050—0,700	0,260	0,024	**—0,622**	—0,045	+0,142	**+0,530**	—0,186
$K_п$	8,2—24,2	17,1	10,8	**+0,899**	—0,018	—0,170	+0,184	—0,029
$\lg K_{пр}$	—4,0—(—0,7496)	—1,9626	5,4388	**+0,433**	**—0,675**	+0,235	—0,249	+0,245
$K_в$	14,1—85,6	32,9	211,9	**—0,583**	**+0,508**	**—0,693**	+0,209	**—0,347**
Доля фактора, %				28,7	17,3	13,9	11,0	8,1

ковать так: чем больше в алеврито-песчаных породах глинистого, в том числе и каолинитового, цемента и чем больше контактов у обломочных зерен (короче говоря, чем хуже отсортированы частицы породы), тем меньше проницаемость. Кроме того, тем меньше относительное содержание регенерированных зерен кварца и тем больше остаточная водонасыщенность. Прямая связь проницаемости с относительным содержанием регенерированных зерен кварца означает, что у пород с высокими фильтрационными свойствами больше сквозных пор и большее количество зерен омывается растворами, насыщенными кремнеземом.

Значимые нагрузки на остаточную водонасыщенность дают четыре фактора. Усложнение порового пространства, выражающееся в повышении извилистости, пережатии и частичном заполнении новообразованными минералами проводящих флюиды каналов, в возникновении изолированных емкостей и других явлениях, объясняется в 1-м факторе катагенетическим уплотнением пород, во 2-м — увеличением содержания глинистого цемента и числа контактов обломочных зерен, в 3-м — уменьшением медианного размера зерен. 3-й фактор раскрывает также прямую зависимость содержания каолинитового цемента и доли регенерированных зерен кварца от медианного размера зерен. По-видимому, в данном случае *Md* сохраняет информацию о первичной проницаемости, которая способствовала развитию после седиментации минеральных новообразований и была уменьшена или утрачена в ходе уплотнения. Связь содержания новообразованного каолинитового цемента частично с современной проницаемостью, частично с палеопроницаемостью (через *Md*) типична для пород рассматриваемой территории и неоднократно наблюдалась на других выборках.

Каолинит в цементе песчаников юрского и мелового возраста Западно-Сибирской плиты И. Н. Ушатинский [104] считает главным образом аутигенным минералом, который образовался «синтетическим путем из поровых растворов и метасоматическим путем под их воздействием за счет других минералов». Ослабление аутигенной каолинизации по мере уменьшения медианного диаметра зерен и проницаемости он объясняет сокращением доступа в породы подземных вод.

Б. А. Лебедев [68], описывая катагенетические преобразования с перераспределением вещества в растворах, отмечал прямую зависимость степени регенерации кварца и каолинизации от медианного диаметра зерен и коллекторских свойств пород на Западно-Сибирской плите. Он установил прямую связь между обоими процессами в Томской области, в Широтном Приобье и в Ямальском районе и в то же время указал на отсутствие какой-либо зависимости регенерации кварца от глубины залегания юрских и меловых отложений. Сходство знаков у нагрузок на долю регенерированных зерен кварца и на общее число контактов зерен можно понимать как свидетельство переотложения материала, растворенного на контактах под давлением. Минеральные преобразования, вызванные растворением на контактах, привели и к увеличению содержания као-

линитового цемента. Коэффициент парной корреляции ΣК и Кл равен +0,490.

В 5-м факторе значимые нагрузки выделяют из общей дисперсии признаков обратную зависимость $K_в$ от содержания в алеврито-песчаных породах выборки карбонатного цемента, которое в свою очередь связано с медианным диаметром зерен. Остальные факторы не содержат значимых нагрузок на физические свойства пород. 4-й фактор показывает некоторые изменения литологии с глубиной, 6-й и 7-й факторы не приводятся.

Рассматривая в целом связи физических свойств пород с остальными признаками и между собой, можно отметить следующее. Пористость менее чувствительна, чем проницаемость и остаточная водонасыщенность, к изменению вещественного состава пород и контролируется в выборке практически одним уплотнением, выраженным в увеличении доли контактов внедрения под влиянием катагенеза. В структуре всех факторов нагрузки на проницаемость и остаточную водонасыщенность имеют противоположные знаки. Оба показателя тесно связаны друг с другом, коэффициент парной корреляции их равен —0,707. На основе этой связи можно найти способы определения $K_в$ не лабораторным, а расчетным путем.

Включение в выборку признаков Кл и рКв/Кв, содержащих информацию о вторичных преобразованиях, показало, что факторы с незначимыми нагрузками на N нельзя относить к чисто седиментационным. Метод главных компонент расчленил катагенез на два основных направления. Первое из них включает изменения всех разностей пород вниз по разрезу, по зонам, РОВ которых находится на последовательных стадиях углефикации. Ему присвоено название *межстадиальный* катагенез. Второе направление объединяет дифференцированные, избирательные, зависящие от исходного вещественного состава изменения пород, РОВ которых находится на одной стадии углефикации. Ему присвоено название *внутристадиальный* катагенез.

Межстадиальный катагенез связан с уплотнением пород и минеральными преобразованиями вследствие нарастания температур, давлений в недрах и геологического времени. Межстадиальный катагенез выражает общие для всех пород тенденции вроде механической деформации обломочных зерен, потери пористости, сужения диапазона минеральных разностей.

Внутристадиальный катагенез происходит в отложениях, находящихся на одной глубине или в небольшом интервале глубин, за счет неравномерного распределения температур и давлений на различные участки породы. Неравномерность обусловлена главным образом разницей в гранулометрическом составе и упаковке обломочного материала. Внутристадиальный катагенез связан с растворением вещества в наиболее жестких термобарических условиях, с переносом его в растворах и переотложением в менее жестких условиях. Избирательность, селективность действия внутристадиального катагенеза заключается в том, что чем меньше прочность

и больше растворимость минералов обломочной части породы, чем меньше медианный диаметр зерен, больше коэффициент сортированности, больше глинистая фракция и содержание органического вещества, тем активнее вынос материала, а отложение активизируется при изменении перечисленных параметров в обратном направлении. Так, алеврито-глинистые породы хуже противостоят уплотнению, чем песчаники, и разница в скорости уплотнения приводит к перетоку вод, несущих продукты растворения. Поэтому наиболее интенсивное катагенетическое минералообразование происходит в той части песчаников, что граничит с алеврито-глинистыми породами. Одновременно в алеврито-песчаных породах на наиболее напряженных участках, в первую очередь на стыках зерен, и в зависимости от химической устойчивости минералов идет растворение, а в порах и трещинах — накопление вещества. В результате действия внутристадиального катагенеза пустоты заполняются вторичным цементом. Ход преобразований невозможен без участия подземных вод и зависит от проницаемости пород.

Введение новых терминов для обозначения каждого из направлений катагенеза понадобилось потому, что готовых не было. Возможно, они не вполне совершенны. Хотелось бы, чтобы они еще конкретнее передавали смысл явлений. Следует подчеркнуть, что расчленение потока взаимосвязанных катагенетических преобразований на два вектора, направления, в какой-то мере условно, формализовано и используется для удобства анализа.

Мерой интенсивности межстадиального катагенеза могут служить глубина залегания, значение показателя преломления витринита или, как показало исследование данной выборки, — ранги зон и доля контактов внедрения. Мерой развития внутристадиального катагенеза можно считать структурные признаки, если в рассматриваемых породах нет существенных изменений минерального состава алеврито-песчаной фракции. В данной выборке регенерация кварца и образование вторичного каолинитового цемента связаны с проницаемостью и остаточной водонасыщенностью, а вместе они зависят от содержания глинистого цемента в алевролитах и песчаниках, от медианного размера зерен и числа контактов между ними, иначе — от гранулометрического состава.

Упомянутые шкалы измерения интенсивности обоих направлений используются литологами давно, только в полуколичественном виде. Обычно катагенетические преобразования прослеживаются по отдельным интервалам глубин, отдельно для глинистых и алеврито-песчаных разностей, отдельно для кварцевых и полимиктовых песчаников, и тем самым единое явление расчленяется на части.

Продолжая исследования, будем варьировать, расширять, совершенствовать набор признаков, шаг за шагом наращивая и детализируя знания о влиянии обоих направлений катагенеза, а потом сведем их воедино.

§ 3. Влияние катагенетического преобразования пород на их физические свойства

Возраст отложений. Исследование коллекций, составленных из образцов разновозрастных пород, показало, что, несмотря на некоторые литолого-петрографические различия юрских, триасовых и пермских отложений, коллекторские свойства их одинаково зависят от интенсивности катагенетических преобразований, измеряемых стадиями углефикации РОВ и структурными особенностями. В подтверждение сказанного обратимся к еще одной выборке, в которую собраны сведения по образцам пермского и триасового возраста из Анабаро-Хатангского междуречья.

В коллекцию вошли 50 образцов алевролитов и песчаников из керна скважин Нордвикской, Ильинской и Кожевниковской разведочных площадей. Проницаемость пород превышала 0,0001 мкм². Гранулометрический состав определялся на этот раз не в шлифах, а просеиванием через сита. Для образцов были известны глубины залегания в метрах; по принадлежности к зонам, выделенным в соответствии со стадиями углефикации РОВ, им были присвоены значения рангов. Физические свойства в выборке представляли пористость, %, и проницаемость, мкм². По данным гранулометрического анализа были получены — содержание фракции менее 0,1 мм, %, и менее 0,01 мм (глинистый цемент), %; медианный диаметр зерен, мм; коэффициент сортированности; содержание карбонатного материала, %. Кроме того, в образцах определялись содержание органического углерода и битумоида «А», вес. %, содержание в глинистом цементе гидрослюды Гс, каолинита и монтмориллонита вместе со смешаннослойными минералами МС, вес. %. Соотношение глинистых минералов в цементе выяснено в результате рентгеноструктурного анализа. Совокупность сведений обрабатывалась на ЭВМ по программе метода главных компонент. Некоторые статистические характеристики и нагрузки первых четырех наиболее интересных для интерпретации факторов на признаки помещены в табл. 4.

Значимые нагрузки на пористость и проницаемость обеспечивает только 1-й фактор. В его структуре 73—81% дисперсии значений коллекторских свойств объясняется зависимостью от выбранных признаков. Знаки и величины нагрузок свидетельствуют о том, что пористость и проницаемость прямо пропорциональны медианному диаметру зерен и обратно пропорциональны содержанию алеврито-глинистой фракции, значению коэффициента сортированности, доле гидрослюды в глинистом цементе и степени катагенетического уплотнения пород. Как и в предыдущей выборке, содержание карбонатного материала в алевролитах и песчаниках выборки не оказывает влияния на пористость и проницаемость. Вероятно, пока величина карбонатной составляющей цемента не достигнет определенного предела, она мало изменяет структуру порового пространства, а достигнув предела, перекрывает прово-

3249

Таблица 4

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 50 образцам алеврито-песчаных коллекторов пермского и триасового возраста Анабаро-Хатангской седловины

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы					
				1	2	3	4	1′	2′
N	2—4	3	0,4	**—0,515**	**+0,604**	—0,166	—0,176	**—0,800**	0
H	70—1965	805	2154	**—0,374**	**+0,678**	**+0,381**	—0,097	**—0,765**	+0,158
АГ	22,8—97,9	60,1	2686,9	**—0,715**	**—0,351**	+0,227	**+0,313**	—0,200	**—0,776**
Г	4,4—37,7	16	50,2	**—0,715**	**—0,456**	**—0,407**	+0,003	—0,123	**—0,842**
Md	0,018—0,220	0,100	0,003	**+0,732**	+0,162	—0,152	—0,188	**+0,350**	**+0,660**
S_0	1,25—3,91	2,05	0,38	**—0,595**	—0,234	**—0,543**	—0,252	—0,210	**—0,610**
Кр	3,7—39,8	15,8	67,9	—0,154	**—0,446**	**+0,299**	**—0,441**	+0,240	**—0,407**
А	0,0006—0,62	0,128	0,041	—0,068	**+0,421**	—0,248	**+0,513**	**—0,365**	+0,222
$C_{орг}$	0,08—3,02	0,87	0,41	—0,189	+0,123	**—0,536**	**+0,500**	—0,220	—0,060
Гс	5—70	36	235	**—0,636**	**+0,552**	—0,121	—0,246	**—0,835**	—0,130
Кл	1—65	27	427	**+0,657**	—0,137	**—0,500**	—0,026	**+0,535**	**+0,413**
МС	1—45	14	126	—0,200	—0,149	**+0,470**	**+0,572**	—0,010	—0,250
$K_п$	3,6—28,7	15,0	33,4	**0,855**	+0,012	—0,059	+0,169	**+0,550**	**+0,660**
lg $K_{пр}$	(—3,6990)—0,2432	—2,2218	5,0155	**+0,834**	+0,137	+0,049	—0,026	**+0,435**	**+0,725**
Доля фактора, %				+33,5	14,2	11,7	9,7	22,4	25,3

дящие межзерновые каналы и практически сразу переводит породу в разряд неколлекторов.

Формирование коллекторских свойств пород становится понятнее после поворота 1-й и 2-й факторных осей в положение 1′ и 2′. Поворот выполнялся так, чтобы ось 1′ прошла через признак *N* и нагрузка на него была максимальной. Трансформированные нагрузки обоих новых факторов приведены в той же табл. 4. Теперь нагрузки на коллекторские свойства разделились: в структуре 1′-го фактора они контролируются отчасти глубиной залегания, но главным образом катагенетическими изменениями по разрезу от зоны к зоне, т. е. в межстадиальном направлении; в структуре 2′-го фактора они контролируются заложенным в процессе седиментации гранулометрическим составом и управляемыми им катагенетическими изменениями во внутристадиальном направлении.

Ведущая роль катагенеза, а не глубины залегания в 1′-м факторе, выражается более высокой нагрузкой на признак *N*. По значениям коэффициентов парной корреляции признаков с *N* и *H* можно считать, что значимые нагрузки 1′-го фактора на медианный диаметр зерен и содержание битумоида «А» обусловлены седиментационными особенностями разреза, а нагрузки на коллекторские свойства, содержание в глинистом цементе каолинитового и гидрослюдистого материала — влиянием катагенеза. Судя по большой нагрузке на признак ГС (—0,835) гидрослюдизация в породах выборки происходит особенно интенсивно.

Знаки и нагрузки 2′-го фактора демонстрируют известные (и уже упомянутые при описании структуры 1-го фактора) петрофизические представления о влиянии гранулометрического состава пород на их коллекторские свойства. Значимая нагрузка на содержание карбонатного цемента связана не с коллекторскими свойствами пород, а с признаками гранулометрического состава, как во 2-м нетрансформированном факторе. В соотношении нагрузок 2′-го фактора нетрудно обнаружить наблюдавшуюся и в предыдущей выборке зависимость доли каолинитового материала в глинистом цементе от медианного диаметра зерен. Очевидно, и здесь каолинит является продуктом дифференцированного влияния катагенеза на породы различного гранулометрического состава. Внутристадиальная каолинизация, наверное, наиболее интенсивна в образцах из угленосных пермских отложений.

Сравнивая структуру проинтерпретированных факторов по данной выборке и по приведенным в работе ранее (и по многим не приведенным в ней), можно убедиться в сходстве не только основных направлений формирования коллекторских свойств пород под влиянием катагенеза, но и некоторых частностей. Одной из таких частностей является то, что в факторах с максимальной нагрузкой на *H* или *N* величина нагрузок на $K_п$ всегда больше, чем на $K_{пр}$, т. е. межстадиальное направление катагенеза оказывает большее влияние на пористость, чем на проницаемость.

Гранулометрический состав пород. В выборке по породам пермского и триасового возраста использовались данные гранулометри-

ческого анализа, выполненного рассеиванием на ситах. Перед гранулометрическим анализом образцы пород дробились до размера зерен не более 2—3 мм, затем раздробленный материал обрабатывался ультразвуком в воде, карбонатный цемент растворялся в соляной кислоте 5%-ной концентрации. Методика описана в работе [67].

Применение методики для изучения уплотненных катагенезом пород вызывало сомнение, поэтому мы сопоставили результаты гранулометрического анализа в шлифах и в образцах пород.

Для методического исследования была составлена выборка по 89 образцам из поднятого в скважинах керна юрских и меловых пород севера Западно-Сибирской плиты, Енисей-Хатангского и Лено-Анабарского прогибов. Породы были представлены песчаниками, алевролитами, глинами и аргиллитами. В коллекцию образцов вошли литологические разности от рыхлых, осыпающихся в руках, до крепких, с трудом раскалываемых молотком. Различие гранулометрического состава, замеренного обоими способами, оценивалось по двум показателям: разность содержания алеврито-глинистой фракции в образце и в шлифе — $\Delta АГ$, %, и разность содержания глинистой фракции в образце и в шлифе — $\Delta Г$, %. Кроме того, для образцов были собраны следующие сведения: зоны катагенеза, в рангах; пористость, %; по подсчетам гранулометрического состава в шлифах — содержание алеврито-глинистой и глинистой фракций, %; медианный диаметр зерен, мм; коэффициент сортированности; по результатам рентгенографического анализа — содержание в глинистом материале гидрослюды, каолинита, монтмориллонита вместе со смешаннослойными минералами, %. За содержание карбонатного материала в породе принималась растворимая в 10%-ной соляной кислоте часть образца, раздробленного до размера менее 0,25 мм, вес. %.

Конечно, величина $\Delta АГ$ и $\Delta Г$ определяется не только выбранными признаками, но и принципиальными различиями методик гранулометрического анализа. Так, ситовой анализ дает содержание фракций в весовых процентах, а в шлифах оно — в площадных; в шлифах замеряется уменьшенный размер зерен, которые срезаются, как правило, не через середину. Однако подобные различия, очевидно, носят систематический характер и не должны серьезно повлиять на корреляцию признаков.

Статистические характеристики выборки и матрица факторных нагрузок приведены в табл. 5.

Влияние межстадиального катагенеза по зонам выражает 2-й фактор. Знаки и величины нагрузок отмечают уменьшение пористости, увеличение содержания в глинистом цементе гидрослюды, уменьшение содержания каолинита и монтмориллонита вместе со смешаннослойными минералами по мере увеличения ранга зон. Большинство связей уже наблюдалось в предыдущих выборках. Здесь же находится значимая нагрузка на разность содержания глинистой фракции в образце и в шлифе. Нагрузка на признак невелика, почти на грани значимости при принятом 5%-ном уровне.

Таблица 5

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 89 образцам алеврито-песчаных и глинистых пород юрского и мелового возраста севера Западно-Сибирской плиты, Енисей-Хатангского и Лено-Анабарского прогибов

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы						
				1	2	3	4	5	6	7
N	1—5	2,7	0,959	+0,142	**—0,889**	—0,017	—0,079	+0,155	—0,022	**+0,256**
АГ	4—100	44	1513	**—0,914**	—0,034	—0,010	+0,153	**—0,263**	+0,130	+0,065
Г	1—97	22	513	**—0,834**	+0,153	**—0,285**	**—0,288**	**+0,214**	—0,200	—0,126
Md	0,003—0,350	0,147	0,011	**+0,852**	+0,132	—0,031	—0,169	+0,159	+0,007	+0,089
S_0	1,160—6,274	1,799	0,900	**—0,519**	+0,082	**+0,503**	—0,102	**+0,504**	**+0,446**	+0,046
Кр	3,2—60,6	13,4	96,9	**—0,331**	—0,143	**+0,787**	+0,208	—0,008	**—0,213**	**—0,340**
Гс	1—75	27	285	—0,065	**—0,853**	**—0,218**	—0,079	+0,204	+0,012	—0,121
Кл	5—80	36	415	+0,102	**+0,627**	**+0,505**	**—0,341**	+0,013	**—0,226**	**+0,306**
МС	1—50	8	65	—0,194	**+0,348**	**—0,212**	**+0,759**	**+0,387**	—0,182	+0,184
ΔАГ	(—89)—(+67)	—5	+1641	**+0,861**	—0,053	+0,069	—0,030	**+0,304**	—0,168	**—0,222**
ΔГ	(—81)—(+49)	—10	+461	**+0,774**	**—0,218**	**+0,329**	**+0,355**	—0,198	+0,194	+0,034
$K_п$	3,0—31,5	13,8	46,8	**+0,356**	**+0,752**	**—0,332**	—0,003	+0,050	**+0,261**	**—0,237**
Доля фактора, %				34,8	22,7	12,7	8,5	6,2	4,3	3,8

Следовательно, катагенетическое сжатие пород слабо влияет на результаты ситового анализа, им вполне можно пренебречь.

Вероятно, основная цементация, искажающая результаты ситового анализа, происходит за счет внутристадиального катагенеза, и поэтому разность содержания алеврито-глинистого и глинистого материала в структуре нескольких факторов связаны с вещественным составом пород. Входящие в структуру 3, 4, 5 и 7-го факторов небольшие, но значимые нагрузки на обе разности невозможно проинтерпретировать без дополнительных, специально направленных исследований. Самые сильные связи, сосредоточенные в 1-м факторе, показывают, что обе разности обратно пропорциональны содержанию в породе алеврито-глинистой и глинистой фракций и прямо пропорциональны медианному диаметру зерен, т. е. обе разности увеличиваются в ряду глинистые породы — алевролиты — песчаники. По-видимому, в процессе дробления пород перед рассеиванием зерна крошатся и искусственно увеличиваются алевритовая и глинистая фракции. Если бы в выборку была дополнительно введена разность содержания песчаной фракции в образцах и шлифах, то в структуру 1-го фактора признак вошел бы со знаком минус, потому что значение признака увеличивается в том же ряду пород в обратном направлении. Особенно заметна ошибка ситового анализа для тонкодисперсных аргиллитов: их дезинтеграцию невозможно довести до конца, несмотря на все известные к настоящему времени ухищрения, и крупные обломки попадают в песчаную фракцию.

Разности содержания фракций тесно связаны с самими фракциями: коэффициент парной корреляции ΔАГ и АГ равен —0,891, коэффициент парной корреляции ΔГ и Г равен —0,947. Ясно, что, используя в исследованиях гранулометрические показатели, полученные рассеиванием на ситах, можно ослабить или усилить связи, которые были установлены для тех же гранулометрических показателей, только подсчитанных в шлифах, но нельзя образовать связи новые, ошибочные. Такой вывод позволяет привлекать для работы многочисленные лабораторные и фондовые ситовые определения гранулометрического состава. Ситовые анализы более объективны, чем подсчеты в шлифах, и поэтому данные разных лабораторий могут сопоставляться хотя бы для изучения региональных закономерностей. При необходимости разности содержания алеврито-глинистой и глинистой фракций в образцах и шлифах можно рассчитывать, зная содержание в породе алеврито-глинистого и глинистого материала, а также медианный размер зерен. Рассчитанные значения ΔАГ и ΔГ позволят обрабатывать вместе результаты обоих гранулометрических анализов.

Почти во все ранее рассмотренные в работе выборки включались сведения о минеральном составе глинистого материала, представляющего собой цемент в песчаниках и алевролитах и породообразующую массу в глинах и аргиллитах. В шлифах подсчитывалось содержание каолинитового цемента, рентгеноструктурным анализом определялось в глинистом материале цемента и породо-

образующего вещества содержание гидрослюды, каолинита, хлорита, монтмориллонита и смешаннослойных минералов.

Некоторые связи минерального состава глинистого материала с гранулометрией пород, физическими свойствами и показателями интенсивности катагенеза были затронуты, теперь рассмотрим их более детально.

Минеральный состав глинистого материала. Изменение минерального состава глинистого материала и физических свойств пород под влиянием катагенеза исследовалось на нескольких выборках. В первую из них были включены сведения по 96 образцам керна, отобранного на 23 площадях севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба из юрских и меловых отложений. Породы были представлены песчаниками, алевролитами, глинами и аргиллитами.

В выборку вошли следующие признаки: зона катагенеза в рангах; глубина залегания, м; пластовая температура t, °С; пористость, %; магнитная восприимчивость $\varkappa$, 10^{-6} СГС; содержание органического углерода и битумоида «А», вес. %; по подсчетам гранулометрического состава в шлифах — содержание алеврито-глинистой и глинистой фракций, %; медианный диаметр зерен, мм; коэффициент сортированности; по результатам рентгенографического анализа — содержание в глинистом материале гидрослюды, каолинита, монтмориллонита вместе со смешаннослойными минералами, вес. %. За содержание в породе карбонатного материала принималась растворимая в 10%-ной соляной кислоте часть образца, раздробленного предварительно до размера менее 0,25 мм, вес. %. Статистические характеристики выборки и матрица факторных нагрузок помещены в табл. 6.

Значимые нагрузки на содержание гидрослюды в глинистом материале пород содержат 1-й и 7-й факторы. 1-й фактор создает максимальную и единственную значимую нагрузку на ранги зон катагенеза, незначимые — на гранулометрические признаки и, очевидно, выражает влияние межстадиального катагенеза. Судя по знакам нагрузок, содержание гидрослюды находится в прямой зависимости от интенсивности катагенетических преобразований (а также от коррелирующихся с N глубины залегания и пластовой температуры). Величина нагрузки свидетельствует о том, что 70,4% дисперсии содержания гидрослюды в данной выборке контролируется именно катагенезом в межстадиальном направлении. Коэффициент парной корреляции Гс и N равен +0,710.

Увеличение содержания гидрослюды в глинистом материале породы может происходить за счет каолинита и монтмориллонита, который присутствует в составе смешаннослойных минералов и отдельно как мономинеральное образование. Вероятность таких превращений в изучаемых породах подтверждается значимыми нагрузками 1-го фактора на содержание каолинита и на содержание монтмориллонита вместе со смешаннослойными, а также тем, что оба признака обратно пропорциональны содержанию гидрослюды. Такое же соотношение содержания гидрослюды и каолинита под

Таблица 6

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 96 образцам алеврито-песчаных и глинистых пород юрского и мелового возраста севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы							
				1	2	3	4	5	6	7	8
N	1—5	2,8	1,025	**+0,909**	—0,174	+0,120	—0,021	+0,014	+0,107	+0,005	+0,130
H	240—4450	2319	$8039 \cdot 10^2$	**+0,907**	**—0,284**	+0,031	—0,009	+0,036	+0,126	—0,008	+0,150
t	1—144	64	978	**+0,893**	**—0,291**	+0,049	+0,047	—0,062	+0,165	+0,005	+0,149
АГ	4—100	46	1560	+0,114	**+0,881**	+0,065	—0,156	—0,114	—0,040	**—0,210**	—0,037
Г	1—96	23	560	+0,031	**+0,772**	—0,189	—0,046	**—0,415**	+0,098	+0,053	+0,011
Md	0,003—0,350	0,141	0,011	—0,175	**—0,838**	—0,153	+0,194	+0,124	+0,068	**+0,265**	+0,072
S_0	1,014—6,274	1,799	0,853	—0,037	**+0,513**	**+0,436**	**+0,315**	—0,088	**+0,506**	**+0,308**	**—0,233**
Кр	0,5—60,6	13,7	113,5	+0,047	**+0,324**	**+0,659**	**+0,247**	**+0,469**	**—0,305**	+0,072	—0,103
А	0,0003—0,16	0,01	0,0004	**+0,362**	**+0,483**	**—0,543**	**+0,343**	**+0,341**	—0,085	+0,129	+0,059
$C_{орг}$	0,07—13,69	0,81	2,29	**+0,266**	**+0,568**	**—0,600**	**+0,391**	+0,093	—0,024	+0,020	—0,055
Гс	1—75	27	274	**+0,839**	—0,015	+0,014	—0,182	—0,128	—0,016	**+0,204**	—0,150
Кл	5—80	35	417	**—0,591**	—0,088	+0,157	**+0,579**	—0,141	**+0,224**	**—0,216**	**+0,325**
МС	1—50	8	65	**—0,297**	**+0,278**	—0,147	**—0,463**	**+0,556**	**+0,504**	—0,106	+0,055
$K_п$	0,5—31,5	13,3	49,9	**—0,753**	**—0,335**	**—0,274**	—0,162	—0,094	+0,011	**+0,322**	—0,061
ж	0,1—50	10	60	—0,186	**+0,678**	+0,197	**—0,243**	—0,007	—0,154	**+0,342**	**+0,501**
Доля фактора, %				29,6	25,7	10,1	7,8	6,1	5,0	3,7	3,5

действием межстадиального катагенеза наблюдалось в матрице факторных нагрузок (см. табл. 4) для образцов пермского и триасового возраста Анабаро-Хатангской седловины. Нагрузка на МС в том случае была незначимой, вероятно потому, что у изученных образцов монтмориллонит находился практически только в смешаннослойных образованиях, которые менее подвержены катагенетическим преобразованиям, чем мономинеральные разности. Поэтому когда в рассматриваемую выборку по юрско-меловым породам вместо признака «содержание монтмориллонита вместе со смешаннослойными» был введен признак «содержание монтмориллонита», то нагрузка 1-го фактора на него достигла 0,425.

Гидрослюдизация каолинита в терригенных породах под влиянием катагенеза отмечается многими литологами. А. Г. Коссовской явление установлено в песчаниках и глинистых породах мезозойского разреза Вилюйской синеклизы [59, 60]. В. Д. Шутов констатировал гидрослюдизацию каолинита в палеозойских и рифейских отложениях юго-восточной части Русской платформы [113]. Замещение одного минерала другим он подтверждал описанием наблюдений в шлифах и связывал с появлением в поровых растворах избытка щелочей и алюминия, освобождающихся при растворении обломков полевых шпатов. Об образовании гидрослюды за счет каолинита под влиянием катагенеза в угленосных каменноугольных и пермских отложениях Кузнецкого бассейна упоминали Г. Н. Перозио, Н. А. Лизалек, А. В. Ван [81] и в юрско-меловой толще Западно-Сибирской плиты Г. Н. Перозио [80]. Постепенное замещение каолинита в рассматриваемом диапазоне катагенетических преобразований не приводит к полному его исчезновению. В песчаниках, алевролитах и в аргиллитах, залегающих в зоне, где РОВ достигло жирной стадии углефикации ($N=5$), в смеси глинистых минералов каолинита содержится не менее 5—10%.

Гидрослюдизация монтмориллонита под влиянием катагенеза столь же широко известное явление. Оно описано в работах А. Г. Коссовской [60], Н. В. Логвиненко [70], И. Н. Ушатинского и др. [104], Г. Н. Перозио [82], Г. Мюллера [77], Б. А. Лебедева и др. [68] и т. д. для разновозрастных пород в различных регионах мира. По данным Г. Н. Перозио, мономинеральный монтмориллонит не встречается в юрско-меловой толще Западно-Сибирской плиты глубже 2000—2300 м. В западной части Енисей-Хатангского прогиба монтмориллонит обнаружен на глубине до 2500 м. По мнению Б. А. Лебедева, гидрослюдизация здесь происходит на бо́льших глубинах потому, что ниже геотермический градиент. Связь гидрослюдизации с температурой в недрах действительно тесная: коэффициент парной корреляции содержания гидрослюды с рангами зон равен +0,710, а с температурой +0,712. В восточной части Енисей-Хатангского прогиба на Балахнинской площади так же, как и на Западно-Сибирской плите, монтмориллонит встречается глубже 2000 м только в составе смешаннослойных минералов. Если перейти от шкалы глубин современного залегания к шкале изменения показателя преломления витринита, то можно отметить об-

щую закономерность: в породах, катагенетическое преобразование которых измеряется газовой стадией углефикации РОВ, монтмориллонит в мономинеральном виде практически отсутствует. Очевидно, катагенетической переработке монтмориллонит подвергается вначале как самостоятельный минерал, а потом — как компонент смешаннослойных образований. По мнению многих исследователей [30, 49, 117, 119 и др.], в ходе гидрослюдизации монтмориллонита выделяются пресные возрожденные воды.

Значимую нагрузку на содержание гидрослюды создает и 7-й фактор. В его структуре нагрузки на содержание гидрослюды и каолинита обладают противоположными знаками. Кроме того, значимые нагрузки появляются у признаков гранулометрического состава породы. Вероятно, фактор отражает гидрослюдизацию каолинита под действием внутристадиального катагенеза. Совпадение знаков у нагрузок на Гс и *Md* может означать прямую зависимость гидрослюдизации от первичной проницаемости. Но участие в гидрослюдизации внутристадиальной составляющей катагенеза мало: на нее приходится только 4% общей дисперсии значений Гс.

Значимые нагрузки на содержание каолинита подчеркнуты в 1, 4, 6, 7 и 8-м факторах. Распределение по многим факторам указывает на активное участие минерала в постседиментационных преобразованиях. Участие в гидрослюдизации зафиксировано 1-м и 7-м факторами. В 4-м факторе противоположные знаки у нагрузок на содержание каолинита и монтмориллонита вместе со смешаннослойными и одинаковые знаки у нагрузок на содержание каолинита и органического углеводорода можно объяснить замещением монтмориллонита каолинитом в кислой среде, создаваемой разложением органического вещества. Интенсивное образование каолинита за счет монтмориллонита в цементе алеврито-песчаных пород юрского и мелового возраста в Енисей-Хатангском прогибе отмечала З. З. Ронкина [91]. О вероятности такого процесса в глинистых породах мезозойской толщи Вилюйской синеклизы писала А. Г. Коссовская [60]. Образование каолинита в результате разложения других минералов, в том числе и монтмориллонита, на Западно-Сибирской плите упоминается И. Н. Ушатинским [104]. Роль в процессе остальных «нагруженных» фактором признаков, а также присутствие значимых нагрузок на содержание каолинита в 6-м и 8-м факторах понять невозможно без введения в выборку дополнительных сведений.

Сравнивая связи содержания каолинита с другими признаками в данной выборке и в описанных ранее, можно отметить, что гидрослюдизация каолинита прослеживается в разновозрастных породах, что показывающая замещение монтмориллонита каолинитом структура 4-го фактора по данной выборке в основном похожа на структуру 3-го фактора по выборке для образцов пермского и триасового возраста и что в отличие от предыдущих выборок в данной отсутствует связь содержания каолинита с медианным размером зерен, который дает представление о палеопроницаемости породы. Последнее обстоятельство вызвано тем, что вторичная каолиниза-

ция наблюдается в верхних зонах катагенеза, а в нижних, начиная с четвертой, где РОВ находится на газовой стадии углефикации, этот процесс «гасится» гидрослюдизацией. Поэтому в выборках с диапазоном N от 1 до 3—4 каолинизация под действием внутристадиального катагенеза легко выделяется, но в выборках с N больше 4 неразличима. Литологами давно замечено, что каолинизируются обычно наиболее грубозернистые разности пород. Так, З. З. Ронкина [91] обращает внимание на то, что в юрско-меловой толще Енисей-Хатангского прогиба песчаные разности каолинизированы больше, чем алеврито-глинистые. По данным А. Г. Войцеховской [32], среднезернистые песчаники пермского возраста на Оленекском поднятии каолинизированы больше, чем мелкозернистые. Интенсивность межстадиального катагенеза в первом случае измеряется рангами 1—3, началом 4. Во втором случае ранги катагенеза равны 2—3.

Участие монтмориллонита в некоторых катагенетических преобразованиях рассматривалось выше. Интерпретация значимой нагрузки 2-го фактора на содержание монтмориллонита вместе со смешаннослойными образованиями дополняет картину. Здесь наиболее вероятна обратная зависимость МС от температуры недр. Значимые коэффициенты парной корреляции получены только для связи МС с рангами катагенеза, глубиной залегания и температурой, но связь с температурой самая тесная, причем содержание в глинистой смеси мономинерального монтмориллонита связано с температурой еще теснее. Геологический смысл остальных значимых нагрузок на МС неясен.

Для того чтобы выявить взаимоотношение хлорита с другими признаками, в выборку вместо МС был введен показатель «содержание хлорита в глинистом веществе пород» — Хл, вес. %. Статистические характеристики и факторные нагрузки на измененный набор признаков приведены в табл. 7.

Наибольшие значимые нагрузки в таблице приурочены к 3-му и 4-му факторам. Оба фактора извлекают около 82% дисперсии значений содержания хлорита. В обоих признак связан с характеристиками вещественного состава пород (значимые нагрузки имеют коэффициент сортированности, медианный диаметр зерен, содержание карбонатного цемента, органического углерода и битумоида «А») и не связан с рангами катагенеза (а также с глубиной залегания и температурой). И в структуре обоих факторов признак находится в обратной связи с содержанием каолинита. Коэффициент парной корреляции содержания хлорита и содержания каолинита в глинистом веществе равен —0,619. Гораздо слабее связь содержания хлорита с коэффициентом сортированности, коэффициенты парной корреляции с остальными показателями выборки незначимы. Антагонистические отношения у хлорита и каолинита сложились, возможно, еще в период седиментации. Может быть, взаимоисключение связано с изменением условий переработки слюд или другого материала под действием внутристадиального катагенеза. Например, на ранних стадиях катагенеза разложение био-

Таблица 7

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 96 образцам алеврито-песчаных и глинистых пород юрского и мелового возраста севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы							
				1	2	3	4	5	6	7	8
N	1—5	2,8	1,025	**+0,886**	**—0,273**	—0,119	—0,077	—0,021	+0,025	+0,037	—0,164
H	240—4450	2319	$8039 \cdot 10^2$	**+0,873**	**—0,384**	—0,079	+0,002	—0,012	+0,017	+0,035	—0,185
t	1—144	64	978	**+0,853**	**—0,383**	—0,165	+0,051	—0,079	+0,036	+0,040	—0,146
АГ	4—100	46	1560	**+0,210**	**+0,862**	+0,076	—0,145	—0,140	—0,011	**—0,215**	—0,080
Г	1—96	23	560	+0,110	**+0,771**	+0,068	+0,191	**—0,387**	+0,079	+0,023	+0,071
Md	0,003—0,350	0,141	0,011	**—0,265**	**—0,813**	—0,006	**+0,213**	+0,175	+0,080	**+0,267**	—0,033
S_0	1,014—6,274	1,799	0,853	+0,011	**+0,525**	**—0,492**	—0,120	+0,053	**+0,639**	**+0,206**	—0,017
Кр	0,5—60,6	13,7	113,5	+0,075	**+0,327**	**—0,384**	**—0,491**	**+0,613**	—0,153	+0,050	**+0,222**
А	0,0003—0,16	0,01	0,0004	**+0,416**	**+0,435**	**+0,237**	**+0,541**	**+0,418**	—0,070	+0,158	—0,033
$C_{орг}$	0,07—13,69	0,81	2,29	**+0,324**	**+0,538**	**+0,230**	**+0,634**	**+0,252**	+0,052	—0,007	+0,048
Гс	1—75	27	274	**+0,830**	—0,104	—0,069	—0,014	**—0,250**	—0,079	+0,182	**+0,402**
Кл	5—80	35	417	**—0,617**	+0,004	**—0,627**	**+0,344**	+0,050	—0,080	—0,131	**—0,221**
Хл	1—80	29	292	+0,039	—0,040	**+0,814**	**—0,416**	**+0,228**	**+0,236**	—0,048	—0,149
$K_п$	0,5—31,5	13,3	49,9	**—0,780**	**—0,258**	**+0,269**	+0,121	—0,165	+0,082	**+0,296**	+0,106
$\varkappa$	0,1—50	10	60	—0,110	**+0,692**	+0,008	**—0,277**	—0,122	**—0,317**	**+0,474**	**—0,283**
Доля фактора, %				29,2	25,2	11,3	9,6	6,5	4,2	3,7	3,1

тита идет с образованием хлорита, а затем каолинита [60]. С приближением постседиментационных преобразований к метаморфизму глинистые минералы переходят в конечном счете в хлорит. Для каолинита прямое превращение в хлорит особенно трудно объяснимо, и петрографами не отмечено, осуществляется оно, скорее всего, через промежуточные минеральные фазы. В таком случае в рассматриваемой факторной матрице нагрузки на содержание хлорита и каолинита должны были бы сгруппироваться с нагрузками на ранги зон катагенеза и на другие глинистые минералы, например гидрослюду, чего не наблюдается. Очевидно, в исследуемых породах хлоритизация под влиянием межстадиального катагенеза еще не происходит.

Теперь обратимся к физическим свойствам пород. В табл. 6 значимые нагрузки на пористость создали четыре фактора. Под влиянием межстадиального катагенеза (1-й фактор) сформировалось около 57% общей дисперсии значений пористости, под влиянием внутристадиального катагенеза и седиментации (2, 3 и 7-й факторы) — 29% общей дисперсии. Теснее, чем с другими признаками, пористость связана с рангами катагенеза, коэффициент парной корреляции равен —0,650. Наибольшие коэффициенты парной корреляции пористости с гранулометрическими признаками рассчитаны для содержания алеврито-глинистого материала и медианного диаметра зерен.

Связь пористости с минеральным составом глинистого материала косвенная и потому слабее, чем с признаками, управляющими и пористостью, и соотношением глинистых минералов. Так, коэффициент парной корреляции пористости с содержанием гидрослюды —0,523, т. е. ниже, чем непосредственно с рангами катагенеза. Связь пористости с содержанием каолинита сложна и изменчива. В верхних 3—4 зонах катагенеза вторичный каолинит образуется в наиболее крупнозернистых породах под влиянием внутристадиального катагенеза и одновременно начинает замещаться гидрослюдой под влиянием межстадиального катагенеза. В нижних зонах заметно влияние только межстадиального катагенеза. Действие обоих видов катагенеза на пористость более выдержанно: в каждой зоне различаются связи с гранулометрическим составом пород и интенсивностью межстадиальных преобразований РОВ. Кроме того, часть каолинита накапливалась в период седиментации и вряд ли она имеет что-то общее с емкостью пор. Поэтому связь пористости с содержанием каолинита находится в зависимости от соотношения в породе каолинита разной генерации и в некоторых исследованных выборках исчезает совсем. Сопоставление определений пористости с содержанием остальных глинистых минералов в глинистом веществе породы отметило значимым коэффициентом парной корреляции (+0,230) только связь с содержанием монтмориллонита. Но эта связь наведена за счет того, что оба показателя зависят от интенсивности межстадиального катагенеза.

Основным ферромагнетиком в исследуемых породах является магнетит. У сидерита, гематита, пирротина и других содержащих железо минералов магнитная восприимчивость на несколько порядков ниже. В табл. 6 нагрузка 1-го фактора на $\varkappa$ незначима, следовательно, межстадиальный катагенез не оказал влияния на магнитную восприимчивость. Наибольшую значимую нагрузку на признак создает 2-й фактор, он извлекает из общей дисперсии значений 46%. Структура нагрузок и знаков в факторе свидетельствует о прямой связи магнитной восприимчивости с содержанием в породах алеврито-глинистой фракции и об обратной связи с медианным диаметром зерен. Коэффициенты парной корреляции магнитной восприимчивости с обоими признаками соответственно +0,541 и —0,505, с остальными признаками — значительно меньше. 25% дисперсии объясняется 8-м фактором, в составе которого значимые нагрузки на магнитную восприимчивость и коэффициент сортированности находятся с обратными знаками, т. е. признаки обратно пропорциональны. Отмеченная значимыми нагрузками в 4-м и 7-м факторах, магнитная восприимчивость там тоже связана с признаками вещественного состава. Без дополнительных сведений невозможно с определенностью сказать о скрытой за связями роли седиментации, диагенеза и внутристадиального катагенеза в формировании магнитной восприимчивости. Влияние внутристадиального катагенеза может выразиться в образовании аутигенного сидерита преимущественно в алеврито-глинистых породах или в растворении магнетита при значениях pH меньше 7,4. В табл. 7 с введением Хл вместо МС происходит перераспределение нагрузок по факторам, но смысл их отношения к физическим свойствам пород остается прежний.

Результаты исследования каждой выборки в отдельности допускают вероятность того, что какие-то систематические изменения вещественного состава и физических свойств пород обусловлены не столько влиянием межстадиального катагенеза, сколько сложившимися в период седиментации особенностями разреза. Так, З. З. Ронкина объясняет изменение минерального состава глинистого вещества в юрско-меловом разрезе Енисей-Хатангского прогиба сменой палеогеографических условий во времени [90]. Избавиться полностью от корреляции в выборках рангов межстадиального катагенеза с глубиной залегания не удавалось, потому что в рассматриваемых регионах наиболее измененные катагенезом породы залегают на больших современных глубинах. Оставался другой путь — подбирать разновозрастный материал в различных сочетаниях, тогда седиментационные изменения по разрезу в выборках будут отличаться, а основные закономерности межстадиальных катагенетических преобразований сохранятся во всех одинаковыми.

До сих пор описывались исследования коллекций из образцов отдельно юрско-мелового и пермско-триасового возраста. Теперь обратимся к сводному материалу, который образовался после добавления к образцам предыдущей коллекции 20 образцов из триасовых и пермских отложений Анабаро-Хатангской седловины и из

юрских отложений Лено-Анабарского прогиба. Добавленные образцы отобраны из песчаников, алевролитов, глин и аргиллитов, поднятых из поисково-разведочных скважин Нордвикской, Ильинской и Кожевниковской площадей и из колонковых скважин в бассейне р. Уджи, правом притоке р. Анабар. Глубина залегания представленных образцами сводной коллекции пород не увеличивается с возрастом. Для юрских пород с р. Уджи она не превышает 200 м, для пермско-триасовых — 2000 м, для юрско-меловых пород дополненной коллекции средняя глубина залегания равна 2300 м. Но связь рангов межстадиального катагенеза с глубиной осталась сильной, коэффициент парной корреляции +0,783. Набор признаков для 116 образцов сводной коллекции сохранился тот же, что и для образцов предыдущей, за исключением пластовой температуры и магнитной восприимчивости. Выборка данных обрабатывалась методом главных компонент, статистические характеристики выборки и матрица факторных нагрузок приведены в табл. 8.

Значимые нагрузки на ранги межстадиального катагенеза рассредоточены по двум первым факторам. Чтобы слить их воедино, выполнен поворот факторных осей, трансформированные нагрузки новых факторов 1′ и 2′ помещены в той же табл. 8. Теперь максимальную нагрузку на ранги межстадиального катагенеза создает 1′-й фактор, а нагрузка 2′-го незначима.

Структура нагрузок 1′-го фактора имеет черты сходства со структурой нагрузок 1-го фактора в матрице по предыдущей выборке, табл. 6, 2-го фактора в матрице с ΔАГ и ΔГ, табл. 5, 1′-го фактора в матрице по пермским и триасовым отложениям, табл. 4. В них одинаково прослеживается прямая связь рангов межстадиального катагенеза с содержанием гидрослюды в глинистом веществе породы и обратная с содержанием каолинита, монтмориллонита вместе со смешаннослойными (или одного монтмориллонита) и открытой пористостью. Правда, в виде исключения в матрице по пермским и триасовым отложениям нагрузка 1′-го фактора на МС незначима; но отклонение от закономерности легко объяснить: в исследуемую коллекцию вошли главным образом образцы из зон 3 и 4 катагенеза, где мономинеральный монтмориллонит мог почти весь заместиться гидрослюдой и сохранился практически только монтмориллонит, входящий в состав смешаннослойных образований, т. е. зоны наиболее заметной гидрослюдизации монтмориллонита не были представлены в коллекции образцами.

Как показано в табл. 8, значимые нагрузки 1′-го фактора приурочены не только к упомянутым признакам. Они относятся к глубине залегания, коэффициенту сортированности и обеим характеристикам органического вещества. В соответствующих таблицах по другим выборкам факторы, выражающие влияние межстадиального катагенеза, создают значимые нагрузки на глубину и медианный диаметр зерен, на глубину и содержание битумоида «А», только на глубину. Нет или очень мало оснований связывать перечисленные признаки (кроме глубины залегания) с влиянием межстадиального катагенеза. Логичнее считать, что в каждой вы-

Таблица 8

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 116 образцам алеврито-песчаных и глинистых пород пермского, триасового, юрского и мелового возраста севера Западно-Сибирской плиты и мезозойских прогибов арктической части Сибирской платформы

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы							
				1	2	3	4	5	6	7	8	1′	2′
N	1—5	3	1,118	**—0,709**	**—0,608**	+0,058	+0,076	—0,008	+0,073	+0,171	—0,011	**+0,940**	0
H	15—4450	2007	11800	**+0,591**	**—0,594**	+0,276	—0,128	—0,161	+0,184	+0,145	+0,119	**+0,832**	—0,057
АГ	4—100	45	1507	**+0,496**	**+0,732**	+0,089	—0,033	—0,173	+0,195	—0,101	—0,152	—0,097	**+0,882**
Г	1—96	22	487	**+0,428**	**+0,642**	+0,098	—0,389	—0,159	—0,159	+0,002	+0,015	—0,090	**+0,770**
Md	0,003—0,350	0,140	0,01	**—0,518**	**—0,701**	—0,060	—0,090	**+0,207**	—0,139	**+0,200**	+0,133	+0,062	**—0,873**
S_0	1,014—6,370	1,852	1,078	+0,084	**+0,545**	**+0,392**	**+0,247**	+0,015	**—0,417**	**+0,534**	—0,050	**—0,225**	**+0,395**
Кр	0,5—60,6	13,9	105,6	+0,173	**+0,247**	**+0,365**	**+0,679**	**+0,410**	—0,022	**—0,233**	**+0,256**	—0,032	**+0,304**
А	0,0003—0,3	0,0148	0,0014	**+0,369**	+0,056	**—0,564**	+0,007	**+0,636**	—0,109	+0,057	**—0,317**	**+0,247**	**+0,288**
$C_{орг}$	0,07—13,69	0,77	1,96	**+0,522**	**+0,309**	**—0,238**	**—0,482**	**+0,298**	—0,164	—0,09	**+0,435**	**+0,196**	**+0,576**
Гс	1—75	28	264	**+0,679**	**—0,410**	**—0,204**	+0,159	**—0,235**	**—0,259**	+0,048	—0,035	**+0,783**	+0,138
Кл	1—80	31	443	**—0,341**	—0,008	**+0,606**	**—0,444**	**+0,403**	**+0,232**	+0,110	—0,119	**—0,255**	**—0,032**
МС	1—50	10	83	—0,156	**+0,455**	**—0,461**	**+0,215**	—0,039	**+0,552**	**+0,393**	+0,169	**—0,417**	**+0,245**
$K_п$	0,5—34,7	14,5	63,8	**—0,828**	+0,172	**—0,227**	—0,052	**—0,230**	**—0,296**	—0,008	—0,079	**—0,750**	**—0,413**
Доля фактора, %				25,2	23,2	11,0	9,3	8,1	6,5	4,7	3,6	24,4	24,0

борке возникают свои, обусловленные подбором образцов или фациальными особенностями разреза систематические изменения показателей с глубиной.

2-й фактор матрицы по последней выборке и остальные, нетрансформированные, фиксируют в разных сочетаниях неоднократно описанные связи, заложенные в период седиментации, диагенеза и возникшие под влиянием внутристадиального катагенеза. Как и в прежних выборках, выявились прямая зависимость пористости от медианного диаметра зерен и обратная — от содержания алеврито-глинистой фракции и карбонатного материала. Коэффициенты парной корреляции пористости с признаками в том же порядке: +0,311; —0,310; —0,262. Обратная зависимость пористости от коэффициента сортированности гораздо слабее, она обнаруживается только по факторным нагрузкам, коэффициент парной корреляции обоих признаков незначим.

У последней выборки был еще вариант, в котором содержание монтмориллонита вместе со смешаннослойными заменялось на содержание хлорита. В рассчитанной по данным измененной выборки факторной матрице отчетливо, как и прежде, выделялась связь содержания хлорита и каолинита. Коэффициент парной корреляции признаков равен —0,655.

Чтобы окончательно убедиться в том, что отраженные факторным анализом закономерности изменения минерального состава глинистого вещества пород вызваны влиянием катагенеза, а не связью с глубиной, были исследованы и другие коллекции. В одну коллекцию вошли 40 образцов только из юрских отложений, вскрытых скважинами на р. Удже, на Балахнинской площади и на многих разведочных площадях западной части Енисей-Хатангского прогиба. На севере Западно-Сибирской плиты образцы были отобраны из керна скважин Новопортовской, Ярудейской, Медвежьей и Надымской площадей. В представленных образцами песчаниках, алевролитах, глинах и аргиллитах углефикация РОВ изменялась от ранней буроугольной до жирной стадии. В другую коллекцию вошли 62 образца из пермских, триасовых и юрских отложений Анабаро-Хатангской седловины и Лено-Анабарского прогиба.

Степень катагенетического изменения алеврито-песчаных и глинистых пород измерялась рангами зон от 1 до 4. В выборку с показателями преломления витринита тоже включались данные о глинистых минералах. И в выборках показателей по каждой коллекции с помощью метода главных компонент выделялся процесс гидрослюдизации глинистого вещества пород, во многих случаях фиксировались развитие каолинита в наиболее крупнозернистых разностях, замещение монтмориллонита каолинитом, а также обратная связь содержания каолинита и хлорита. Основным следствием катагенеза для глинистых минералов в изученных зонах можно считать гидрослюдизацию. В выборке из образцов только юрского возраста, например, коэффициент парной корреляции рангов межстадиального катагенеза с содержанием гидрослюды в глинистом веществе породы равен +0,814.

Изменение состава глинистых минералов рассматривалось и в отдельно взятых зонах катагенеза. Из данных по сводной коллекции образцов были выбраны те, что относятся к зонам 1—2 и от-

дельно — к зоне 3. Для зон 1—2 выборка содержала сведения по 40 образцам алеврито-песчаных и глинистых пород триасового, юрского и мелового возраста севера Западно-Сибирской плиты и мезозойских прогибов, окаймляющих арктическую часть Сибирской платформы. Обработка сведений выборки методом главных компонент позволила установить прямую связь рангов межстадиального катагенеза с содержанием гидрослюды в глинистом материале и обратную связь с содержанием монтмориллонита. Однако нагрузка на содержание гидрослюды оказалась небольшой, почти на грани значимости. Она может быть наведенной и за счет связи с другими признаками. Если в отложениях, содержащих РОВ на буроугольной стадии углефикации, гидрослюдизация и начинается, то она еще весьма слабо выражена. В предыдущих выборках связь содержания гидрослюды с рангами зон катагенеза была примерно такой же сильной, как связь пористости с рангами зон, коэффициент парной корреляции для обеих связей составлял обычно 0,600—0,800. В выборке по зонам 1—2 коэффициент парной корреляции пористости с рангами зон остался на том же уровне, он равен —0,650, а коэффициент парной корреляции содержания гидрослюды с рангами зон катагенеза всего +0,314.

В породах из зон 1—2 не проявилась связь содержания каолинита с медианным диаметром зерен. Зато она стала одной из основных в зоне 3. Коэффициент парной корреляции обоих признаков равен +0,488. Исследованная коллекция 46 образцов из зоны 3 была составлена из литологических разностей от песчаников до глинистых пород, от пермского до мелового возраста включительно. Образцы отбирались из керна скважин в тех же регионах, что и для зон 1—2.

Дополнительные сведения по зонам 1—2 и 3 несколько проясняют природу взаимоотношений содержания каолинита и хлорита. В зонах 1—2 обратная пропорциональность содержания обоих минералов наиболее заметна, коэффициент парной корреляции достиг —0,843. В зоне 3 коэффициент корреляции тех же показателей ниже уровня значимости. По-видимому, в сводной выборке связь возникла главным образом за счет данных из зон 1—2 и обязана преимущественному развитию каолинита в ущерб хлориту при разложении биотита или в ходе других преобразований. Хлоритизация под влиянием межстадиального катагенеза была бы связана в сводной выборке с рангами зон, не ослабевала бы, а наоборот, нарастала в нижних зонах, подобно гидрослюдизации. Непосредственная каолинизация хлоритового цемента в юрских и меловых отложениях Западной Сибири описана Б. А. Лебедевым [68]. Правда, он считает, что процесс приводит к увеличению размера пор и их сообщаемости. Количественного подтверждения такого вывода нами не обнаружено.

В обеих выборках по зонам 1—2 и 3 присутствовала пористость. Как в сводной и других выборках, она зависела в основном от содержания в породе алеврито-глинистого и карбонатного материала, медианного диаметра зерен. Влияние межстадиального катагенеза

в зонах 1—2 охарактеризовано выше, при описании гидрослюдизации величиной коэффициента парной корреляции. В зоне 3 значения рангов изменялись в малом диапазоне (всего на пол-единицы в обе стороны) и в выборку не вводились.

Наконец, при объединении выборок по зонам 1—2 и зоне 3 в структуре нагрузок фактора, отражающего влияние межстадиального катагенеза, совершенно определенно выявилась связь содержания гидрослюды с рангами зон и обратная — с содержанием монтмориллонита вместе со смешаннослойными. Следовательно, гидрослюдизация монтмориллонита начинается в зоне, номер которой не более 3. В то же время гидрослюдизация каолинита еще не проявилась. Напротив, дает о себе знать каолинизация, столь характерная для зоны 3. Замещение каолинита гидрослюдой начинает прослеживаться в выборках, где присутствуют данные из зоны 4.

Минеральный состав обломочных зерен. Влияние на коллекторские свойства пород минерального состава обломочных зерен в комплексе с гранулометрическими признаками исследовалось на коллекции, состоящей из 41 образца алевролитов и песчаников пермского возраста с проницаемостью не менее 0,0001 мкм². Образцы были отобраны из керна скважин на Нордвикской, Ильинской и Кожевниковской площадей Анабаро-Хатангской седловины. Из коллекторских свойств в образцах определялись пористость и проницаемость, по данным гранулометрического анализа рассчитаны процентное содержание алеврито-глинистой и глинистой фракций; коэффициент сортированности; медианный диаметр зерен, мм; содержание карбонатного материала (или, точнее, растворимого в 10%-ной соляной кислоте при нагревании), %; в шлифах установлено содержание в процентах от всего обломочного материала зерен кварца Кв, плагиоклаза Пл, обломков кремнистых пород и эффузивов ОК и обломков глинистых пород ОГ. Поскольку породы коллекции содержат РОВ на длиннопламенной и газовой стадиях углефикации и диапазон изменения рангов зон катагенеза мал, показатель N не использовался, в выборку введена только глубина залегания. Интервалы изменения признаков, средние значения и дисперсии приведены в табл. 9. Там же помещены результаты обработки выборки данных методом главных компонент.

Связи коллекторских свойств с вещественным составом пород раскрываются в 1-м и 4-м факторах. 3-й фактор, чья нагрузка на пористость тоже значима, отражает катагенетическую обратную зависимость межзерновой емкости пород от глубины залегания и изменение по разрезу некоторых показателей вещественного состава. Меньшее влияние межстадиального катагенеза на проницаемость, чем на пористость, описано выше. В данном случае для узкого диапазона межстадиальных изменений связь проницаемости с глубиной стала даже незначима.

В структуре нагрузок 1-го фактора отражены заложенные в процессе седиментации связи коллекторских свойств с признаками вещественного состава пород. Как и в ранее исследованных выбор-

Таблица 9

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 41 образцу алеврито-песчаных коллекторов пермского возраста Анабаро-Хатангской седловины

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы					
				1	2	3	4	5	6
H	360—1990	985	$2494 \cdot 10^2$	—0,030	**+0,379**	**+0,757**	+0,274	—0,064	**+0,362**
АГ	22,8—97,9	56,4	553,7	**+0,831**	+0,193	—0,127	—0,253	—0,016	+0,264
Г	5,2—37,7	15,4	43,4	**+0,790**	—0,022	**—0,524**	+0,166	—0,121	—0,010
Md	0,018—0,215	0,096	0,002	**—0,859**	—0,285	+0,012	+0,215	+0,109	—0,231
S_0	1,10—3,91	2,07	0,44	**+0,501**	—0,176	**—0,416**	**+0,608**	—0,188	—0,011
Кр	3,6—31,8	12,5	57,0	**+0,643**	**—0,405**	—0,060	—0,035	**+0,346**	**+0,348**
Кв	17—68	38	144	**+0,356**	**—0,815**	**+0,359**	+0,022	—0,219	—0,034
Пл	3—35	14	32	**+0,489**	**+0,309**	+0,011	**—0,615**	**+0,317**	—0,260
ОК	12—70	31	132	**—0,334**	**+0,793**	**—0,304**	+0,227	—0,163	+0,083
ОГ	3—15	8	11	**—0,508**	—0,104	—0,220	**+0,380**	**+0,667**	+0,146
$K_п$	3,6—28,7	14,5	29,7	**—0,704**	—0,213	**—0,362**	**—0,449**	—0,106	+0,249
$\lg K_{пр}$	(—3,6990)—0,2432	—2,3372	5,3230	**—0,746**	—0,235	—0,260	**—0,319**	—0,240	+0,261
Доля фактора, %				37,5	16,3	12,6	12,2	7,3	5,0

ках, пористость и проницаемость находятся в прямой зависимости от медианного размера зерен и в обратной — от содержания алеврито-глинистого материала, коэффициента сортированности и содержания карбонатно-глинистого цемента. На проницаемость наибольшее влияние оказывает размер зерен: коэффициент парной корреляции между ними равен +0,553. Значимые нагрузки на характеристики минерального состава зерен, очевидно, означают, что содержание мономинеральных зерен обратно пропорционально содержанию обломков пород.

В составе 4-го фактора значимые нагрузки подтверждают наблюдаемую в 1-м факторе зависимость коллекторских свойств от коэффициента сортированности, а также выявляют прямую пропорциональность их величины содержанию плагиоклаза и обратную пропорциональность содержанию обломков глинистых пород. Обломки глинистых пород под влиянием термобарических условий и геологического времени деформируются раньше других более прочных зерен, вдавливаются в поровое пространство и цементируют породу. Пополнение массы глинистого цемента за счет обломков глинистых пород, естественно, ухудшает пористость и проницаемость. Содержание зерен плагиоклаза в породе зависит не только от условий седиментации, но и от интенсивности катагенеза. Чем больше плагиоклаза сохранилось среди обломочных зерен, тем меньше порода изменена катагенезом и поэтому обладает лучшими коллекторскими свойствами. Так можно проинтерпретировать связи признаков в 4-м факторе.

Следующая коллекция включала 75 образцов алеврито-песчаных пород пермского, триасового, юрского и мелового возраста из керна скважин на севере Западно-Сибирской плиты и в мезозойских прогибах, окаймляющих Сибирскую платформу. Проницаемость образцов превышала 0,0001 мкм². Набор признаков был расширен, в него вошли: зоны межстадиального катагенеза в рангах; глубина залегания, м; пористость, %; содержание органического углерода и битумоида «А», вес. %; по подсчетам гранулометрического состава в шлифах — содержание алеврито-глинистой и глинистой фракций, %; медианный диаметр зерен, мм; коэффициент сортированности; по результатам рентгенографического анализа — содержание в глинистой массе гидрослюды, каолинита и монтмориллонита вместе со смешаннослойными минералами, вес. %. За содержание в породе карбонатного материала принималась растворимая в 10%-ной соляной кислоте часть образца, раздробленного предварительно до размера менее 0,25 мм, вес. %. В шлифах подсчитывалось содержание в процентах от кластической части породы кварца, плагиоклаза, калиевого полевого шпата (КПШ), обломков кремнистых пород и эффузивов, обломков глинистых пород.

В данной выборке была предпринята попытка оценить влияние выведения пород на современные глубины после погружения на максимальные. Разность максимальной и современной глубины залегания определялась в рангах зон межстадиального катагенеза и обозначалась ΔN. Для перевода глубин залегания в ранги ката-

Таблица 10

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 75 образцам алеврито-песчаных пород пермского, триасового, юрского и мелового возраста севера Западно-Сибирской плиты и мезозойских прогибов, окаймляющих арктическую часть Сибирской платформы

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9
N	1—5	3	1033	**+0,647**	**+0,655**	—0,118	—0,197	+0,055	+0,060	—0,047	—0,051	+0,115
H	15—4370	2097	$1179 \cdot 10^3$	+0,057	**+0,928**	+0,025	—0,124	+0,118	+0,217	—0,002	—0,027	+0,121
АГ	4—100	21	459	**+0,294**	**—0,261**	**+0,619**	+0,197	**+0,430**	**+0,295**	—0,167	—0,027	—0,110
Г	3—36	12	42	**+0,326**	—0,091	**+0,713**	—0,221	**+0,381**	**—0,239**	—0,032	—0,158	+0,084
Md	0,041—0,350	0,191	0,007	**—0,452**	+0,104	**—0,538**	**—0,393**	+0,092	—0,117	—0,168	**—0,285**	**+0,275**
S_0	1,014—6,274	1,538	0,629	+0,122	—0,100	**+0,693**	**—0,405**	+0,081	**—0,242**	**+0,334**	—0,128	—0,033
Кр	3,2—55,6	12,7	106,2	**+0,293**	—0,066	**+0,431**	**—0,317**	**—0,641**	+0,029	+0,047	—0,098	+0,118
А	0,0003—0,3	0,0141	0,0018	**+0,471**	**—0,380**	**—0,259**	**—0,229**	—0,134	**+0,395**	—0,158	—0,169	**—0,284**
$C_{орг}$	0,07—2,73	0,43	0,18	**+0,540**	**—0,319**	—0,144	+0,041	**+0,340**	—0,029	**—0,357**	+0,129	**+0,464**
Гс	5—75	28	300	**+0,681**	**+0,501**	**—0,251**	+0,096	+0,018	—0,086	+0,041	—0,182	—0,002
Кл	1—75	33	457	**—0,561**	—0,022	—0,005	**—0,511**	+0,066	—0,203	—0,061	**+0,537**	+0,009
МС	1—55	8	67	+0,152	**—0,545**	+0,076	**+0,270**	—0,164	**+0,377**	**+0,392**	+0,067	**+0,433**
Кв	15—65	27	74	**+0,273**	**—0,331**	**—0,417**	**—0,365**	**+0,370**	**+0,260**	**+0,354**	+0,173	—0,141
Пл	3—35	23	54	**—0,786**	**+0,233**	+0,188	+0,152	—0,046	+0,216	**—0,260**	—0,045	+0,085
КПШ	1—20	8	15	**—0,351**	—0,382	**—0,454**	**—0,347**	+0,216	—0,022	—0,125	**—0,299**	+0,004
ОК	4—47	14	95	**+0,641**	**—0,297**	**—0,248**	+0,152	**—0,311**	**—0,331**	—0,152	+0,123	+0,007
ОГ	1—20	8	15	**+0,280**	**+0,273**	—0,219	**+0,630**	**+0,236**	—0,212	**+0,315**	+0,085	—0,093
ΔN	0,1—3,1	1,1	0,5	**+0,750**	**—0,297**	—0,202	—0,160	—0,038	—0,212	—0,095	—0,022	—0,036
$K_п$	3,0—32,9	15,7	56,6	**—0,586**	**—0,453**	—0,062	**+0,428**	+0,075	**—0,251**	+0,012	**—0,275**	+0,006
Доля фактора, %				23,4	15,5	13,6	9,8	6,7	5,2	4,3	3,8	3,5

Признаки	Факторы		
	10	11	1′	2′
N	+0,091	+0,069	**+0,920**	0
H	—0,046	+0,011	**+0,698**	**+0,608**
АГ	—0,123	+0,106	+0,022	**—0,393**
Г	+0,099	—0,014	+0,165	**—0,297**
Md	+0,120	+0,040	**—0,240**	**+0,400**
S_0	+0,146	+0,051	+0,011	—0,156
Кр	—0,033	**—0,311**	—0,026	+0,170
А	**+0,333**	+0,076	+0,058	**—0,602**
$C_{орг}$	—0,058	—0,111	+0,154	**—0,611**
Гс	+0,071	—0,178	**+0,835**	—0,139
Кл	+0,155	+0,088	**—0,412**	**+0,388**
МС	+0,161	+0,137	**—0,286**	**—0,488**
Кв	—0,133	**—0,274**	—0,048	**—0,423**
Пл	+0,223	+0,034	**—0,387**	**+0,727**
КПШ	**—0,301**	**+0,314**	**—0,520**	—0,018
ОК	—0,017	+0,046	**+0,243**	**—0,668**
ОГ	—0,032	**+0,301**	**+0,394**	—0,007
ΔN	+0,196	+0,100	**+0,320**	**—0,743**
$K_п$	+0,097	**—0,258**	**—0,740**	+0,106
Доля фактора, %	2,9	2,3	19,4	19,5

генеза и обратно использовалась приуроченность стадий углефикации РОВ к определенным интервалам палеоглубин максимального погружения в Енисей-Хатангском, Лено-Анабарском прогибах и на севере Западно-Сибирской плиты, по данным Д. С. Сорокова [96], А. И. Данюшевской [33] и Т. Э. Барановой, С. Н. Белецкой, С. Г. Неручева и др. [3]. Было принято, что в рассматриваемых регионах переход РОВ от стадии $Б_{1-2}$ к $Б_3$ происходит на глубине около 1350 м, от стадии $Б_3$ к Д — 2550 м, от стадии Д к Г — 3200 м, от стадии Г к Ж — 4500 м и от стадии Ж к К — примерно 6000 м. Если порода, из которой отобран образец, залегает сейчас на глубине 2500 м ($N=2$) и содержит РОВ на газовой стадии ($N=4$), то $\Delta N=2$.

Общее количество признаков достигло 19. Статистические характеристики выборки и матрица факторных нагрузок, в том числе трансформированных поворотом факторных осей, приведены в табл. 10.

После поворота двух первых факторных осей новый, 1′-й, фактор создал максимальную нагрузку на N. Нагрузки других факторов на признак незначимы. В 1′-м факторе без труда различаются знакомые явления: уменьшение пористости под влиянием межстадиального катагенеза, гидрослюдизация монтмориллонита и каолинита, уменьшение медианного диаметра зерен с глубиной залегания пород, представленных образцами коллекции. Здесь же повторяется прямая связь пористости с содержанием в кластической части породы плагиоклаза и обратная — с содержанием обломков глинистых пород, хотя в данную коллекцию вошло всего несколько образцов из пермских отложений Анабаро-Хатангской седловины. По-видимому, повторение связей в двух по существу разных выборках не случайно, а присутствие их в ассоциации нагрузок 1′-го фактора позволяет предполагать причастность к ним межстадиального катагенеза.

Обратная связь рангов межстадиального катагенеза с содержанием плагиоклаза, а также калиевого полевого шпата, вполне вероятно, появилась в результате разложения обломочных зерен. Полевые шпаты относятся к неустойчивым минералам, замещающимся на начальных стадиях катагенеза каолинитом, а затем — гидрослюдой. Реакция разложения, по мнению В. Энгельгардта [115], выглядит так:

$$2\,KAlSi_3O_8 + 16\,H_2O \rightarrow 2\,K^+ + 2\,Al^{3+} + 8\,OH^- + 6\,H_4SiO_4 \rightarrow$$

$$\rightarrow Al_2(OH)_4 + Si_2O_5 + 4\,SiO_2 + 2\,K^+ + 2\,OH^- + 13\,H_2O.$$

Реакция протекает только с непрерывным удалением ионов OH^- и K^+. Такое условие может соблюдаться при поступлении слабокислых растворов и расходовании иона калия на образование новых минералов. А. Г. Коссовская [60], Н. В. Логвиненко [70] и другие считают, что выносящийся в ионной форме калий идет на гидрослюдизацию каолинита и монтмориллонита. Образование гидрослюды за счет разрушающихся полевых шпатов, и в первую очередь за счет калиевых разностей, А. Г. Коссовская наблюдала в шлифах из мезозойских пород Вилюйской синеклизы. Разложение полевых шпатов под влиянием катагенеза в юрских и меловых отложениях Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба описано И. Н. Ушатинским и др. [104], Г. Н. Перозио [82] и З. З. Ронкиной [90].

Небольшую, но значимую нагрузку на ОК можно объяснить связью признака с глубиной залегания или с содержанием других минералов обломочной части. В принципе возможна связь и с коллекторскими свойствами. Р. С. Сахибгареевым [68] на примере нефтенасыщенных алевролитов и песчаников Мегионского месторождения отмечалось резкое уменьшение проницаемости в связи с тем, что по обломкам эффузивных пород под влиянием катагенеза интенсивно развивается монтмориллонит. В предыдущей и данной выборках коэффициент парной корреляции содержания обломков кремнистых пород и эффузивов с коллекторскими свойствами незначим. Введение в выборку признака ΔN не оправдало ожиданий. Разность максимальной и современной глубины коррелируется с рангами межстадиального катагенеза и современной глубиной больше, чем с другими признаками. Это обстоятельство мешает различить в первых двух факторах изменение пород после некоторого смягчения термобарических условий. 4, 6, 8 и 11-й факторы разложили на составляющие зависимость пористости алевролитов и песчаников главным образом от гранулометрического состава пород и результатов внутристадиального катагенеза. Как и во многих предыдущих выборках, более половины дисперсии значений пористости зависит от влияния межстадиального катагенеза.

Вошедшие в последнюю выборку данные по 55 образцам алевролитов и песчаников из юрских и меловых отложений обрабатывались отдельно. И опять обнаружилась прямая связь пористости с содержанием среди обломочных зерен плагиоклаза и обратная связь с содержанием обломков глинистых пород. В один из вариантов выборки вместо показателя ΔN был включен $\Delta N/N$ — относительная разность максимальной и современной глубин залегания. Новый показатель гораздо слабее коррелировался с рангами межстадиального катагенеза и с глубиной, а в 7-м и 8-м факторах обнаружилась его связь с пористостью пород. Нагрузки обоих факторов показаны в табл. 11.

Образцы исследуемой коллекции отобраны из пород, залегающих в основном на сводовых частях продуктивных и перспективных структур, поэтому увеличение относительной разности глубин связывалось не столько с общим воздыманием отложений, сколько

Таблица 11

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 55 образцам алеврито-песчаных коллекторов юрского и мелового возраста севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы	
				7	8
N	1—5	3	1,011	+0,078	—0,126
H	875—4370	2454	$7226 \cdot 10^2$	—0,196	+0,056
АГ	4—68	16	131	**—0,296**	+0,156
Г	3—36	11	35	+0,097	+0,235
Md	0,074—0,350	0,212	0,006	**+0,277**	+0,014
S_0	1,014—6,274	1,555	0,792	—0,059	+0,110
Кр	3,2—55,6	12,0	121,7	—0,103	—0,036
А	0,0003—0,06	0,0047	0,0001	+0,122	**+0,300**
$C_{орг}$	0,07—1,49	0,32	0,07	—0,208	—0,260
Гс	5—75	26	277	+0,153	+0,180
Кл	5—75	39	401	—0,191	**—0,386**
МС	1—15	6	17	+0,113	+0,045
Кв	19—37	26	16	—0,115	—0,121
Пл	15—35	25	27	—0,204	+0,182
КПШ	1—20	8	17	—0,004	+0,078
ОК	4—25	10	19	+0,250	—0,124
ОГ	1—20	7	15	+0,114	+0,035
$\Delta N/N$	0,03—0,62	0,28	0,02	**+0,626**	**—0,370**
$K_п$	3,2—31,5	15,5	47,0	**+0,290**	**+0,440**
Доля фактора, %				5,1	4,5

с ростом антиклиналей разного порядка. Распределение знаков и нагрузок на признаки в 7-м факторе истолковано следующим образом: чем больше амплитуда роста структур, тем больше на своде накапливается песчаного материала, присутствие которого в породе в свою очередь обеспечивает повышение пористости. Обусловленное конседиментационным ростом локальных структур уменьшение медианного диаметра осадочного материала от свода к крыльям, по мнению Г. Э. Прозоровича и др. [84], М. Я. Рудкевича [94], характерно для Западно-Сибирской плиты, откуда собрано подавляющее большинство образцов исследованной коллекции. Положительная связь относительной разности глубин с содержанием каолинита и отрицательная с пористостью в 8-м факторе может означать возобновление или усиление каолинизации во время роста структур и заполнение новообразованным минералом части порового пространства. Смысл значимой нагрузки 8-го фактора на содержание битумоида «А» неясен. Разуплотнение пород после снятия доли нагрузок не обнаруживается ни в 7-м, ни в 8-м факторе. Вероятно, прирост пористости при воздымании отложений невелик, да и способ измерения амплитуды поднятия не отличается высокой точностью.

Во многие последние выборки включались характеристики органического вещества: содержание органического углерода и битумоида «А». Доля органического вещества в общей массе породы, как правило, настолько мала, что непосредственной зависимости физических свойств от нее не наблюдается. Однако, судя по ассоциациям значимых нагрузок на признаки, среди которых встречаются и обе характеристики, содержание РОВ влияет на направленность и интенсивность некоторых процессов. Один из них, каолинизация монтмориллонита в присутствии гумусового вещества, описан при исследовании катагенетических изменений состава глинистых минералов. В большинстве ассоциаций нагрузок роль показателей органического вещества невозможно понять без дополнительных, более детальных сведений о самой органике, о породе и об условиях протекания реакций. Из основных соотношений обеих характеристик с другими показателями вещественного состава пород выделяются выдержанностью известная [96, 56] прямая зависимость содержания органического углерода от доли в породе алеврито-глинистой фракции и обратная — от медианного диаметра зерен. Сложна и противоречива связь обеих характеристик с содержанием карбонатного материала в породе, она обычно устанавливается при участии других признаков. Постоянно, из выборки в выборку, прослеживается связь содержания битумоида «А» с содержанием органического углерода.

Результаты исследований. В итоге на многих коллекциях, составленных из образцов алеврито-песчаных и глинистых пород пермского, триасового, юрского и мелового возраста севера Западно-Сибирской плиты и мезозойских прогибов, окаймляющих арктическую часть Сибирской платформы, исследовано изменение вещественного состава под влиянием катагенеза. Описание вещества пород включало: признаки гранулометрического состава, минерального состава обломочной и глинистой частей, содержание карбонатного материала, органического углерода и битумоида «А», т. е. основные породообразующие элементы и некоторые дополнительные сведения. Кроме того, специально для оценки масштаба катагенетических преобразований в описание введены показатель преломления витринита и вертикальные зоны, в каждой из которых РОВ находится на определенной стадии (или подстадии) углефикации; доля контактов внедрения обломочных зерен от общего числа контактов и доля регенерированных зерен кварца от общего числа зерен кварца.

В результате обработки данных о породах методом главных компонент многообразные постдиагенетические преобразования, выраженные в связях между признаками, сведены к двум основным направлениям. Первое из них, межстадиальный катагенез, контролируется одним-двумя факторами и объединяет процессы, которые протекают в каждой литологической разности при увеличении давления, температуры в недрах и геологического времени. Процессы приводят ко вторичным изменениям вещественного состава пород и их уплотнению от стадии к стадии катагенеза. Мерой интенсив-

ности межстадиального катагенеза могут служить значения глубины залегания, пластовой температуры, показателя преломления витринита, рангов зон, доли контактов внедрения обломочных зерен от общего числа контактов. Второе направление, внутристадиальный катагенез, контролируется многими факторами и объединяет процессы, которые вызваны неравномерным воздействием на различные участки пород термобарических условий недр. Процессы с участием растворов приводят к перераспределению вещества в породах, находящихся на одной стадии катагенеза. Мерой интенсивности внутристадиального катагенеза могут служить контролирующие движение, расход растворов структурные признаки, такие как содержание алеврито-глинистой, глинистой фракций и медианный диаметр зерен.

Исследование многомерных связей между выбранными признаками позволило выделить наиболее яркие проявления межстадиального и внутристадиального катагенеза. Под влиянием межстадиального катагенеза в интервале зон 1—5 помимо увеличения показателя преломления витринита и доли контактов внедрения зерен от общего числа контактов происходит вдавливание обломков глинистых пород в поровое пространство между более прочными зернами, разложение полевых шпатов, гидрослюдизация монтмориллонита и каолинита. При существующей точности определения выбранных признаков гидрослюдизация монтмориллонита становится заметной в зоне 3, где РОВ находится на длиннопламенной стадии углефикации, и нарастает вниз по разрезу. В зоне 4, где РОВ достигает газовой стадии, монтмориллонит сохраняется практически только в составе смешаннослойных образований. Гидрослюдизация каолинита обнаруживается начиная с зоны 4. Параллельной с гидрослюдизацией хлоритизации глинистой массы не наблюдается. Вероятно, процесс набирает силу в зонах, где углефикация РОВ превышает жирную стадию.

Под влиянием внутристадиального катагенеза в интервале литологических разностей от глин и аргиллитов до мелко-среднезернистых песчаников происходит каолинизация хлорита, монтмориллонита и, вероятно, полевых шпатов, регенерация зерен кварца и многократное переотложение карбонатов. Перечисленные процессы наиболее устойчивы, они прослеживаются из выборки в выборку. Основная масса хлорита перерабатывается в каолинит в зонах 1—2. Максимум каолинизации широкого набора минералов приходится на зону 3, начало зоны 4. Дальше, по мере увеличения рангов зон, каолинизация слабеет, подавленная гидрослюдизацией под влиянием межстадиального катагенеза.

Литературные данные убеждают в том, что описанные процессы межстадиального и внутристадиального катагенеза присущи не только терригенным отложениям рассматриваемых регионов, они типичны для многих платформенных областей.

Вместе с изменением признаков вещественного состава пород исследовалось изменение признаков, описывающих физические свойства: открытая пористость, проницаемость, остаточная водона-

сыщенность, параметр пористости и магнитная восприимчивость. Анализ совместных многомерных связей позволил оценить участие одного из направлений катагенеза в формировании физических, главным образом коллекторских, свойств. Установлено, что от 20 до 80% дисперсии значений пористости обусловлено влиянием межстадиального катагенеза, остальная доля дисперсии приходится на влияние седиментации, диагенеза и внутристадиального катагенеза. Влияние межстадиального катагенеза на проницаемость меньше, чем на пористость.

Зависимость физических свойств от межстадиального и внутристадиального катагенеза можно измерить теми же показателями, что и зависимость вещественного состава. Зависимость физических свойств от условий седиментации можно измерить признаками, которые были заложены в период осадконакопления и еще не полностью переработаны в результате литогенеза. В зонах 1—5 больше, чем другие признаки, представление об исходном первоначальном облике осадков дают гранулометрический состав пород и минеральный состав обломочных зерен алеврито-песчаной фракции. Очевидно, структурные показатели, полученные из гранулометрического состава, более информативны в отношении коллекторских свойств, чем показатели минерального состава обломочной части породы. Диагенетические процессы, как и процессы внутристадиального катагенеза, происходят с перемещением вещества в растворах. В тех случаях, когда последствия диагенеза полностью не ликвидированы катагенезом, они в какой-то мере должны контролироваться структурными показателями, регулирующими фильтрацию. По данным З. З. Ронкиной [91], количество, форма, размер и состав конкреционных образований зависят от гранулометрического состава пород. Конкреции с карбонатным цементом в песчаниках крупнее и проще по форме, чем в алеврито-глинистых разностях. Карбонатные конкреции более характерны для алеврито-песчаных пород, конкреции пирита и сидерита — для алеврито-глинистых. Следовательно, структурные признаки несут информацию не только о внутристадиальном катагенезе, но и о седиментации, вероятно, и о диагенезе, поэтому они столь уверенно в любой выборке коррелируются с физическими свойствами, в первую очередь с пористостью и проницаемостью.

Просматривая приведенные в главе таблицы с результатами математической обработки данных, нетрудно заметить: если факторы (за исключением тех, что выражают межстадиальные преобразования) создают значимые нагрузки на коллекторские свойства, то в связи с ними, кроме других, обычно оказываются структурные признаки. Наиболее тесно коллекторские свойства связаны с содержанием алеврито-глинистого материала в породе и с медианным диаметром зерен, несколько меньше — с содержанием глинистого цемента и с коэффициентом сортированности.

В соответствии с высказанными соображениями для 96 образцов алеврито-песчаных и глинистых пород юрского и мелового возра-

ста севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба было рассчитано уравнение регрессии:

$$K_п = -4{,}656\,N - 0{,}075\,АГ + 29{,}759. \quad (1)$$

Коэффициент множественной корреляции $R = 0{,}955$, стандартное отклонение 4,4. Исходные данные, по которым рассчитано уравнение, взяты из исследованной ранее выборки, статистические характеристики ее приведены в табл. 6. Показатель N дан в рангах зон, выделенных в разрезе по степени углефикации РОВ; показатель АГ подсчитан в процентах от всей площади породы в шлифе; открытая пористость $K_п$ определена в процентах. Данные из той же выборки по 71 образцу алеврито-песчаных пород с проницаемостью больше 0,0001 мкм^2 использованы для составления другого уравнения:

$$K_п = -4{,}561\,N - 0{,}062\,АГ + 29{,}407. \quad (2)$$

Коэффициент множественной корреляции 0,959, стандартное отклонение 4,7.

В уравнениях всего две независимые переменные, но через них выражены основные процессы формирования коллекторских свойств породы. Первая независимая переменная в обоих уравнениях дает информацию о влиянии межстадиального катагенеза, вторая — о влиянии внутристадиального катагенеза, седиментации и, возможно, диагенеза. Суммарная информация настолько исчерпывающая, что коэффициент множественной корреляции показывает связь, близкую к функциональной.

Анализируя уравнения, следует отметить, что при постоянном содержании алеврито-глинистого материала с увеличением ранга зон на единицу пористость пород снижается в среднем на 4,6%. Так сказывается влияние межстадиального катагенеза. На одной стадии катагенеза разница пористости «чистых» песчаников и глинистых алевролитов составит около 6—7%. В выборке, по которой рассчитаны уравнения, не были представлены рыхлые породы из верхних частей разреза. Они редко поднимаются в керне, в них невозможно стандартным методом насыщения керосином или водой определить пористость, из них трудно изготовить шлифы. Отсутствие в выборке сведений о рыхлых породах привело к занижению свободного члена уравнений и коэффициента при N, что уменьшает точность уравнений в зоне 1, они справедливы только для более или менее сцементированных пород.

Сравнительно большое стандартное отклонение фактических данных от описанных уравнениями объясняется тем, что порода всегда неоднородна и различные ее свойства определяются практически в нескольких отличающихся друг от друга частях образца. При существующих лабораторных методах иначе и быть не может: вряд ли, например, можно получить надежные результаты рентгенографического или геохимического анализа, если использовать разделенный на гранулометрические фракции материал. Возможно, большего приближения к функциональным связям можно добиться,

определяя все параметры (в том числе и коллекторские свойства) в шлифах.

По данным о 72 образцах алевролитов и песчаников с проницаемостью больше 0,0001 мкм² пермского, триасового и юрского возраста Анабаро-Хатангской седловины и Лено-Анабарского прогиба составлено аналогичное уравнение регрессии:

$$K_п = -5{,}892\,N - 0{,}079\,АГ + 37{,}810. \quad (3)$$

Коэффициент множественной корреляции 0,970, стандартное отклонение 5,0. Показатель N в уравнении, как обычно, измерен в рангах, содержание алеврито-глинистой фракции подсчитано по результатам гранулометрического анализа образцов.

Сравнивая уравнение (3) с уравнениями (1) и (2), следует отметить, что, несмотря на различия регионов, возраста отложений и других геологических условий, а также способа определения гранулометрического состава пород, значения коэффициента множественной корреляции и стандартного отклонения близки. Коэффициент при первой независимой переменной и свободный член в уравнении (3) больше, чем у предыдущих, потому что среди образцов Лено-Анабарского прогиба многие были довольно слабо сцементированы, с пористостью до 34,7%. В выборках, по которым были рассчитаны уравнения (1) и (2), пористость, как правило, не превышала 20—25%.

На локальных участках территории, где выделены тектонические элементы с единой морфологией и историей развития, вместо рангов зон межстадиального катагенеза в уравнения можно вводить глубину залегания или, если мало изменяется по площади геотермический градиент, температуру недр. Примером может служить Танамский свод, в пределах которого мощности одновозрастных отложений меняются мало, и на разведочных площадях породы, одинаково измененные межстадиальным катагенезом, находятся в небольшом диапазоне глубин и температур. В таких случаях глубины или температуры образуют более дробную шкалу, чем ранги зон, и могут точнее передать природные условия.

Целесообразность выбора второй независимой переменной из числа структурных показателей также зависит от конкретных обстоятельств. В изучаемых породах содержание алеврито-глинистого материала дает представление о содержании глинистой фракции, о медианном диаметре зерен и даже о содержании карбонатного цемента, потому что коррелируется с ними; дает представление о содержании песчаной фракции, потому что они дополняют друг друга до 100%. И более подробных сведений о песчаной фракции не требуется; она состоит главным образом из мелкозернистых обломков с малой примесью среднезернистых. Среднезернистые частицы редко преобладают. Другой особенностью изучаемых пород является сравнительно небольшой интервал изменения коэффициента сортированности. Поэтому вопреки теоретическим представлениям он слабо связан с пористостью. В некоторых регионах целесообразным окажется использование какого-нибудь иного пока-

зателя, возможно, того же коэффициента сортированности, или даже не одного, а двух показателей. Однако составление уравнений с большим числом структурных переменных не оправдывает себя. Они перестают быть независимыми переменными, коррелируются между собой, и коэффициент множественной корреляции может быть хоть и ненамного, но завышен искусственно. Использование в уравнениях связанных между собой показателей имеет смысл только в надежде, что ошибки определения некоторых из них сложатся с разными знаками.

Посмотрим, к чему привело увеличение числа «независимых» переменных в уравнении, которое составлено по той же выборке, что использована для расчета уравнения (2). Новое уравнение имеет вид

$$K_п = -4{,}400\,N - 0{,}048\,АГ + 0{,}008\,Г - 0{,}200\,Кр + 31{,}028. \quad (4)$$

Коэффициент множественной корреляции 0,968, стандартное отклонение 4,18. Коэффициент парной корреляции АГ с Г равен +0,648, с Кр — меньше, но тоже значим, поэтому включение в уравнение (2) двух дополнительных показателей незначительно увеличило коэффициент множественной корреляции и уменьшило стандартное отклонение.

Выборка по 72 образцам из пермских, триасовых и юрских отложений использована для составления такого уравнения:

$$K_п = -4{,}769\,N - 0{,}039\,АГ - 0{,}292\,Г - 0{,}179\,Кр + 39{,}421. \quad (5)$$

И здесь изменения незначительны: коэффициент множественной корреляции больше, чем для уравнения (3), на 0,007, а стандартное отклонение меньше на 0,6.

В отдельных выборках коллекторские свойства довольно тесно связаны с результатами минеральных преобразований. Например, коэффициент парной корреляции пористости с содержанием каолинита в глинистой массе достигает +0,537, а с содержанием гидрослюды —0,636. Однако использование сведений о содержании каолинита и гидрослюды для расчета пористости или проницаемости рискованно. Нельзя забывать, что с коллекторскими свойствами может быть связано не все содержание минералов, а лишь новообразованная часть, да и то не всегда. Так, мнение о неизменной прямой связи коллекторских свойств с содержанием вторичного каолинита является заблуждением. От зон 1—2 к зоне 3 — верхней части зоны 4 интенсивность каолинизации увеличивается и в то же время коллекторские свойства ухудшаются. Ухудшение коллекторских свойств от зоны 4 к зоне 5 не зависит от уменьшения содержания каолинита, а параллельно ему. Также параллельно, только в разных направлениях, изменяются содержание гидрослюды и коллекторские свойства в зонах 3—5. Если возникнет необходимость использовать такой параллелизм, то нужно учитывать ограниченность явления. Но надежнее связывать пористость и проницаемость с показателями типа тех, что включены в уравнения (1)—(3), т. е. с показателями, контролирующими минеральные пре-

образования. Уравнения (1)—(3), вероятно, в наиболее рациональной форме воплощают итоги выполненных исследований в отношении пористости.

По мере уплотнения и цементации пород возрастает диапазон литологических разностей, которые консолидируются и практически перестают быть гранулярными коллекторами. Влияние геологических условий на консолидацию исследовалось с помощью линейного дискриминантного анализа [83]. Сущность его заключается в комплексном использовании нескольких свойств, объединенных таким образом, чтобы получить наилучшее разделение сравниваемых групп, классов.

В данном случае сравнивались две группы образцов алевритопесчаных и глинистых пород: одна с проницаемостью больше 0,0001 мкм², другая с проницаемостью меньше этой. Первая группа относилась к коллекторам из соображений, что при существующих на больших глубинах высоких пластовых давлениях и температурах могут быть получены притоки углеводородов из пород с проницаемостью, равной 0,0001 мкм² [9]. В этом убеждают результаты подстановки фактических данных, характерных для Енисей-Хатангского прогиба, в формулы расчета дебитов нефти и газа [107]. В регионе, где с углублением на каждые 1000 м пластовые давления увеличиваются примерно на каждые 100 бар, температура — на 30° С, при плотности газа 0,6 кг/м³, обычном радиусе эксплуатационных колонн 5″, радиусе условного контура питания нефтяных скважин около 100 м, а газовых — около 500 м, эффективной мощности пласта 10 м, для получения дебита нефти 10 м³/сутки, а газа 100 тыс. м³/сутки достаточно проницаемости, показанной на рис. 1 кривыми. Если, сохранив остальные приведенные выше параметры, увеличить эффективную мощность пласта в несколько раз, то во столько же раз увеличится дебит.

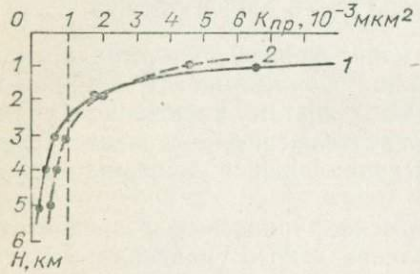


Рис. 1. Изменение с глубиной проницаемости, достаточной для получения в скважине притока 10 м³/сутки нефти или 100 тыс. м³/сутки газа из пласта с эффективной мощностью 10 м.
1 — $Q_н$ =10 м³/сутки; 2 — $Q_г$ =10^5 м³/сутки.

Вторая группа образцов (с проницаемостью меньше 0,0001 мкм²) условно относилась к неколлекторам. Для составления дискриминантного уравнения в обучающую выборку было включено 65 образцов первой группы и 25 образцов второй. Ранее проведенные и описанные в главе исследования показали, что проницаемость зависит главным образом от рангов межстадиального катагенеза, медианного диаметра зерен, содержания алевритово-глинистой и глинистой фракций, а также карбонатного материала. Все перечисленные пять признаков и были использованы в качестве исходных для расчета искомого уравнения. Число признаков не сокращено, чтобы

можно было проанализировать роль каждого в консолидации пород. Образцы обеих групп отобраны из керна юрских и меловых отложений на севере Западно-Сибирской плиты и в Енисей-Хатангском прогибе. Гранулометрические признаки подсчитаны в шлифах. За содержание в породе карбонатного материала принималась растворимая в 10%-ной соляной кислоте часть образца, раздробленного предварительно до размера менее 0,25 мм. Диапазон изменения рангов зон составил 1—5, медианного диаметра зерен 0,003—0,350 мм, содержания алеврито-глинистой фракции 4—100, глинистой 1—96, карбонатного материала 0,5—47,4%.

Рассчитанное по материалам обучающей выборки дискриминантное уравнение имеет вид

$$+0{,}838\,N+1{,}034\,Md+0{,}081\,\text{АГ}-0{,}005\,\Gamma+0{,}013\,\text{Кр}-7{,}425=0. \quad (6)$$

Ошибка отделения коллекторов от неколлекторов в обучающей выборке равна 12,8%. Подставляя в уравнение значения признаков по конкретным образцам, можно разделить их на две группы: если рассчитанные значения меньше нуля, то породы относятся к коллекторам ($K_{\text{пр}}>0{,}0001$ мкм^2), если больше нуля — к неколлекторам ($K_{\text{пр}}<0{,}0001$ мкм^2). В данной работе с помощью уравнения решались другие задачи.

Задача 1. До какой зоны катагенеза остаются коллекторами песчаники с минимальным содержанием алевритовой и глинистой фракций и без карбонатного цемента?

Дано: $Md=0{,}3$ мм; АГ=10%; Г=5%; Кр=0.

$$0{,}838\,N+0{,}310+0{,}81-0{,}025-7{,}425=0.$$

$$N\approx 7{,}5.$$

Разумеется, такой результат вычисления имеет смысл только при экстраполяции тенденций, выявленных в первых пяти зонах катагенеза, и слишком полагаться на него не следует.

Задача 2. До какой зоны остаются коллекторами алевролиты с минимальным содержанием алевритовой и глинистой фракций и без карбонатного цемента?

Дано: $Md=0{,}1$ мм; АГ=50%; Г=10%; Кр=0.

Подставив числа в уравнение (6), получили $N\approx 4$.

Но обычно в алевролитах несколько больше алевритового, глинистого материала и присутствует карбонатный.

При $Md=0{,}05$ мм; АГ=65%; Г=20%; Кр=20% $N\approx 3$.

Массовые определения коллекторских свойств в образцах согласуются с расчетами: алевролиты в рассматриваемых регионах фактически перестают быть коллекторами в зоне 3.

Задача 3. С каким содержанием карбонатного материала в цементе наиболее часто встречающаяся разность алеврито-песчаных пород остается коллектором?

Показатели наиболее часто встречающихся алеврито-песчаных пород взяты из исследованных выборок.

Дано: $Md=0{,}140$ мм; АГ=50%; Г=20%.

При $N=1\div 2$ ответ лишен смысла. Очевидно, в обучающую выборку было мало включено сведений о породах, слабо измененных катагенезом и с высоким содержанием карбонатов. При $N=3{,}5$ Кр=30,5%. А при $N=4$ и том же вещественном составе пород проницаемость их станет меньше 0,0001 мкм^2. Следовательно, присутствие карбонатного материала резко ухудшает проницаемость вблизи границы зон 3 и 4.

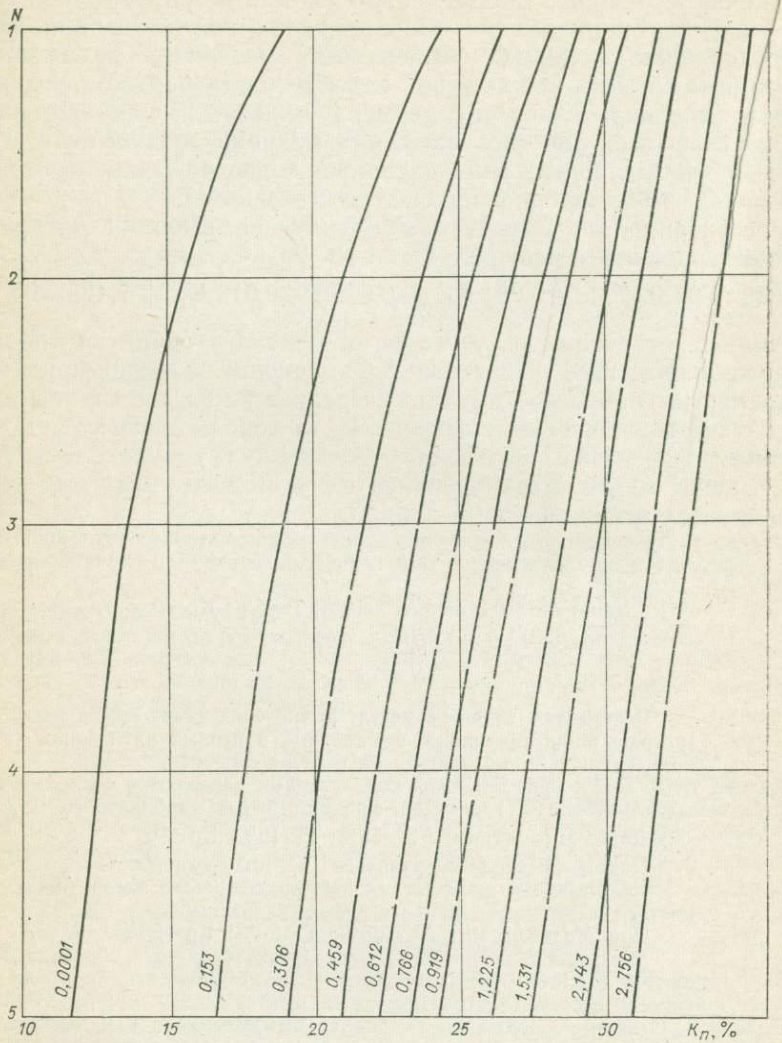


Рис. 2. Зависимость проницаемости пород $K_{пр}$ (мкм²) от рангов зон межстадиального катагенеза N и открытой пористости $K_п$.

$K_{пр} = -64{,}318 + 0{,}034NK_п^4 + 0{,}130eK_п$; количество наблюдений 104; достоверность тренда 95%; сила тренда 81,4%.

Чтобы полнее, с учетом возможной нелинейности связей, представить себе характер взаимоотношения *пористости* и *проницаемости* в процессе катагенетического преобразования пород в межстадиальном направлении исследовалась выборка данных по 104 образцам алевролитов и песчаников юрского и мелового возраста из керна скважин на севере Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба. Изменение рангов зон катагенеза находилось в диапазоне 1—5, пористости 2,2—35,7%, проницаемости 0,00011—3,4446 мкм². Собранные данные обрабатывались на ЭВМ по программе тренд-анализа [7, 15, 62].

Тренд-анализ дает возможность выполнить интерполяцию между неравномерно расположенными по площади точками опробования. Сущность способа обработки состоит в том, что устанавливаются зависимости, в том числе и нелинейные, одного признака от двух других. По использованной программе составляются, а затем перебираются функции полиномиального (до 6-й степени), экспоненциального и логарифмического вида. В результате перебора отыскивается уравнение поверхности, наилучшим образом описывающей в пространстве имеющиеся фактические данные. По найденному оптимальному уравнению ЭВМ строит карту изолиний Z в системе координат X и Y. Удовлетворительность описания связи уравнением оценивается по силе тренда, которая представляет собой сумму квадратов отклонений Z от расчетной поверхности и показывает долю изменчивости учтенной теоретической поверхности от всей изменчивости, или полноту аппроксимации теоретическим трендом фактических данных.

Для исследуемой выборки за независимые переменные были приняты пористость и ранги зон катагенеза. Карта изолиний проницаемости и уравнение трендовой поверхности приведены на рис. 2. Сила тренда для связи, описанной уравнением, равна 81,4%, значит, фактические данные отклоняются от рассчитанной поверхности обычно не более чем на 18,6%. Рис. 2 показывает, что породы с одинаковой пористостью, но находящиеся на разных стадиях катагенеза, обладают разной проницаемостью, и проницаемость тем больше, чем интенсивнее преобразована порода. Или, из пород с одинаковой проницаемостью менее пористая та, что испытала большее влияние катагенеза. Очевидно, в процессе катагенетического уплотнения закрываются в первую очередь мелкие поры, исчезновение которых заметнее отражается на пористости, чем на проницаемости. Сказанное подтверждается тем, что минимальные значения среднего радиуса пор у алеврито-песчаных коллекторов, залегающих на больших глубинах, обычно больше, чем у коллекторов, залегающих на малых глубинах. Иначе, на высоких стадиях катагенеза коллекторами остаются только наиболее крупнозернистые породы с малым содержанием цемента (особенно карбонатного), хорошо отсортированные. Они содержат крупные поры и обладают жестким скелетом, способным долго выдерживать большие нагрузки.

Вернувшись к рис. 2, отметим, что наиболее сильно влияние катагенеза на самых ранних стадиях, а на более поздних ослабевает. Так, у пород с проницаемостью 0,0001 мкм² при переходе из зоны с $N=1$ в зону с $N=2$ пористость уменьшается на 3,5%, а при переходе из зоны с $N=4$ в зону с $N=5$ — всего на 1%. Часть рисунка с большими значениями по обеим координатам не обеспечена фактическими данными. Пористость коллекторов в зонах с $N=4\div5$ не превышает обычно 12—16%. Изолинии проницаемости в этой части рисунка экстраполируют закономерности, выявленные на охарактеризованном данными пространстве.

§ 4. Влияние катагенетического преобразования пород на электрокаротажные характеристики

Исследование было основано на сопоставлении каротажных сведений со среднепластовыми литологическими. Для сопоставления отбирались наиболее однородные пласты с выносом керна, за редким исключением, больше 60%. Однородность вещественного состава устанавливалась по комплексу промыслово-геофизических данных, по гранулометрическому составу, по описаниям шлифов, лабораторным определениям физических свойств и карбонатности пород.

По поведению потенциала собственной поляризации породы делятся на две группы: первая регистрируется записью ПС на «линии глин», вторая создает отклонение в сторону отрицательных значений. В исследуемых регионах удельное сопротивление фильтрата промывочной жидкости больше удельного сопротивления подземных вод, поэтому амплитуда ПС на «линии глин» соответствует плотным породам, в том числе и покрышкам, а отрицательная амплитуда ПС — проницаемым породам, в том числе и коллекторам. Консолидация пород под влиянием катагенеза приводит к пополнению первой группы за счет второй. Смещение границы между группами в зависимости от геологических условий, от интенсивности катагенеза исследовалось с помощью линейного дискриминантного анализа.

В обучающую выборку были включены признаки по 60 пластам с мощностью более 5 м из юрских и меловых (один из триасовых) отложений, вскрытых скважинами на 20 разведочных площадях севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба. 20 пластов относились к первой группе, 40 — ко второй. В набор признаков вошли зоны межстадиального катагенеза в рангах; по гранулометрическому анализу — содержание алевритовой (Ал) и глинистой фракций, вес. %; по результатам растворения измельченной породы в 10%-ной соляной кислоте — содержание карбонатного материала, вес. %. Диапазон изменения рангов зон составил 1—4, содержания алевритовой фракции 1—83, глинистой 5—97, карбонатного материала 0,1—11,7%.

Рассчитанное по данным обучающей выборки дискриминантное уравнение выглядит так:

$$+1{,}963\,N+0{,}107\,\text{Ал}+0{,}288\,\Г-0{,}158\,\text{Кр}-16{,}432=0. \qquad (7)$$

Ошибка распознавания пластов первой и второй групп в среднем равна 2,5%. Подстановка в уравнение данных по пластам первой группы, которой соответствует амплитуда ПС на «линии глин», дает сумму больше нуля, подстановка данных по пластам второй группы, которой соответствуют отрицательные отклонения ПС, дает сумму меньше нуля. Если в уравнении (7) увеличивать ранги зон межстадиального катагенеза, то можно проследить, как все более крупнозернистые породы переходят в первую группу из второй.

Задача 1. Как с возрастанием рангов межстадиального катагенеза уменьшается содержание алевритовой фракции в породах второй группы?

Примем постоянными содержание глинистого и карбонатного вещества: Г=10%, Кр=5%. Тогда в первых двух зонах катагенеза породы с максимальным содержанием алевритового материала остаются во второй группе и регистрируются отрицательными амплитудами ПС. В зоне 3 породы, относящиеся ко второй группе, содержат алевритовую фракцию не больше 80%, в зоне 4 — не больше 60%, в зоне 5 — критическое значение 40%. В последней зоне отрицательную амплитуду ПС могут давать только песчаники.

Задача 2. Как с возрастанием рангов межстадиального катагенеза уменьшается содержание глинистой фракции в породах второй группы?

Зададимся постоянным содержанием алевритового и карбонатного материала: Ал=10%; Кр=5%. Влияние глинистой фракции сказывается начиная с первых зон. Критическое значение Г в породах второй группы для зоны 1 около 50%, для следующих соответственно около 42, 35, 29, 22%. Значит, в зоне 1 алеврито-песчаные глины способны вызвать отклонение записи ПС от «линии глин». В остальных зонах часть алеврито-глинистых песчаников переходит в разряд неколлекторов и не регистрируется отрицательными значениями ПС. В реальных породах, регистрирующихся отрицательными амплитудами ПС, максимальное содержание глинистой фракции в зоне 1 — 37%, в зоне 2 — 25%, в зоне 3 — 19%.

Влияние содержания карбонатной массы на разделение пород по группам в разных зонах не рассматривалось, потому что в обучающей выборке признак изменяется в узком диапазоне и далекие экстраполяции за пределы фактических значений могут привести к грубым ошибкам.

Выполненное исследование лишний раз подчеркнуло, что, восстанавливая литологию разреза по электрокаротажу, нельзя не учитывать влияние катагенетического преобразования пород на значение потенциала собственной поляризации. Начиная с зоны 2 глинистость, рассчитанная по ПС, не соответствует истинной — она завышена. «Выклинивание» или «глинизация» некоторых прослеживаемых по ПС коллекторов с погружением их на большие глубины могут оказаться ложными. Влияние катагенеза способно исказить результаты региональной корреляции отложений, опирающейся на промыслово-геофизические данные.

Разделив породы на две группы, обратимся к исследованию второй из них, которая вызывает отклонение записи ПС от «линии

глин». Объектом исследования послужили 36 водонасыщенных алеврито-песчаных пластов с мощностью не менее 4—5 м. Пласты вскрыты скважинами на 12 разведочных площадях севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба в разрезе от сеноманского яруса меловой системы до батского юрской. В отобранных пластах вынос керна при проходке составил в среднем 53,1%, в нескольких наиболее литологически однородных пластах допущено снижение до 25%. На каждый метр керна приходится не менее одного определения пористости, в среднем — 4,13.

Для каждого пласта были известны глубина залегания, м; удельное электрическое сопротивление неизмененной части $\rho_{вп}$, Ом·м; амплитуда потенциала собственной поляризации АПС, мВ; по замерам показателя преломления витринита в образцах пород и интерполяцией между соседними значениями установлены ранги зон межстадиального катагенеза; по имеющимся определениям открытой пористости рассчитаны средние значения, %; по результатам гранулометрического анализа рассчитаны средние значения содержания в породах алеврито-глинистой фракции и глинистой, %; значения медианного диаметра зерен, мм; коэффициента сортированности и содержание карбонатного материала, %. При подсчете средних значений перечисленных признаков не учитывались данные по плотным карбонатизированным выклинивающимся маломощным пропласткам, линзам и конкрециям. Выборка сведений по пластам обрабатывалась методом главных компонент, статистические характеристики признаков и факторные нагрузки на них приведены в табл. 12.

В таблице структура 1-го фактора, охватывающего 42,5% дисперсии, раскрывает зависимость промыслово-геофизических показателей от геологических условий. С увеличением содержания в терригенных коллекторах алеврито-глинистого материала, ранга зон межстадиального катагенеза (а также связанной с рангами глубины современного залегания) уменьшается емкость пор и поэтому возрастает удельное сопротивление и снижается амплитуда ПС. Остальные факторы иллюстрируют связи между признаками вещественного состава пород. При уровне значимости 6—7% нагрузку 1-го фактора на медианный диаметр зерен тоже следовало бы упомянуть и добавилась бы прямая связь показателя, контролирующего проницаемость, с амплитудой ПС.

Содержание алеврито-глинистого материала и медианный диаметр зерен влияют на удельное сопротивление и амплитуду ПС не непосредственно, а через подчиненную им структуру порового пространства, в данной выборке через пористость, поэтому коэффициенты парной корреляции промыслово-геофизических показателей с пористостью гораздо выше. Через пористость на удельное сопротивление и амплитуду ПС передается влияние геологических условий, в том числе межстадиального и внутристадиального направлений катагенеза. Роль минерализации подземных вод в формировании промыслово-геофизических показателей рассмотрена в следующем разделе.

Таблица 12

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 36 пластам алеврито-песчаных пород юрского и мелового возраста севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы				
				1	2	3	4	5
N	1—3	2,5	0,512	**—0,891**	—0,302	+0,049	+0,165	—0,120
H	1050—2650	2121	$2122 \cdot 10^2$	**—0,868**	—0,187	—0,319	—0,073	—0,028
АГ	18,4—93,2	37,6	289,6	**—0,561**	**+0,711**	+0,234	+0,095	—0,138
Г	4,8—16,0	9,6	8,1	—0,194	+0,043	**+0,790**	**—0,477**	+0,283
Md	0,06—0,22	0,14	0,002	+0,324	**—0,860**	—0,146	+0,029	+0,288
S_0	1,25—3,00	1,73	0,13	+0,222	—0,311	**+0,676**	**+0,594**	+0,103
Кр	0,1—9,2	4,2	6,6	—0,234	**+0,701**	—0,218	+0,286	**+0,539**
$K_п$	14,1—34,5	19,9	34,0	**+0,860**	+0,231	+0,222	—0,091	—0,297
АПС	25,0—112,0	58,3	607,7	**+0,830**	+0,151	—0,214	+0,210	+0,255
$\rho_{ВП}$	3,0—42,0	17,0	106,0	**—0,846**	—0,193	+0,137	—0,264	+0,118
Доля фактора, %				42,5	20,7	14,2	8,3	6,6

§ 5. Влияние катагенетического преобразования пород на минерализацию подземных вод

Несмотря на большой объем в рассматриваемых регионах кернового и гидрохимического материала, сопоставить минерализацию подземных вод непосредственно с литологией коллекторов не удалось. Слишком мало оказалось мощных, выдержанных по разрезу, представительно охарактеризованных керном и к тому же испытанных водоносных пластов. Поэтому минерализация подземных вод исследовалась совместно с геолого-геофизическими показателями, которые дают представление об изменении вещественного состава и коллекторских свойств пород, в том числе и под влиянием катагенеза.

Из нескольких сотен испытанных на севере Западно-Сибирской плиты и в Енисей-Хатангском прогибе водоносных пластов вначале было исследовано 60, по каждому из которых имелась возможность собрать и определить полный перечень необходимых сведений. Пласты вскрыты скважинами на 22 разведочных площадях от Южно-Тамбейской на северо-западе до Комсомольской на юге и Балахнинской на востоке на глубине 800—3090 м в терригенном разрезе от туронского яруса меловой системы до плинсбахского юрской. По совокупности геолого-геофизических сведений это наиболее однородные пласты мощностью не менее 4—5 м. По общей минерализации, находящейся в интервале 1—19,6 г/л, и по соотношению компонентов ионно-солевого состава полученные из пластов пробы воды охватывают подавляющую часть известных в регионе разностей. Выбранные пласты характеризовались следующими показателями. Гидрохимические — общая минерализация M, содержание катионов $K^+ + Na^+$, Mg^{2+}, Ca^{2+}, анионов Cl^-, Br^-, I^-, SO_4^{2-}, $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ а также H_2SiO_3, г/л. Промыслово-геофизические показатели — амплитуда потенциала собственной поляризации, мВ, удельное электрическое сопротивление неизмененной части водонасыщенного пласта, удельное электрическое сопротивление фильтрата промывочной жидкости $\varrho_ф$, кажущееся сопротивление по градиент-зонду размера 2,25 м $\varrho_к^{(2,25)}$, Ом·м, и пластовая температура, °С. Кроме того, в число рассматриваемых признаков были включены глубина залегания, м, и зоны межстадиального катагенеза в рангах. Из накопленных данных были составлены две выборки: первая по 50 пластам из меловых и юрских отложений, вторая по 54 пластам только из меловых отложений. В первую вошло больше, чем во вторую, промыслово-геофизических показателей. Обе выборки обрабатывались с помощью факторного анализа (метод главных компонент); статистические характеристики признаков и факторные нагрузки по первой из них помещены в табл. 13.

1-й фактор в таблице сосредоточил максимальную и единственную значимую нагрузку на общую минерализацию подземных вод, а также значимые нагрузки на содержание почти всех солевых компонентов. Прежде всего в структуре 1-го фактора следует обра-

Таблица 13

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки по 50 водоносным пластам юрских и меловых отложений севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы							
				1	2	3	4	5	6	7	8
N	1—4	2,6	0,635	**—0,744**	—0,015	**+0,311**	**+0,326**	+0,082	+0,264	—0,069	—0,048
H	800—2780	2117	$3086 \cdot 10^2$	**—0,774**	**+0,487**	—0,073	+0,261	—0,196	+0,086	—0,100	—0,075
t	9—74	53	250	**—0,685**	**+0,408**	—0,206	**+0,410**	**—0,287**	+0,054	—0,027	—0,070
АПС	22,0—117,0	53,2	413,4	**+0,508**	+0,147	**+0,482**	+0,104	**—0,489**	+0,083	—0,083	**+0,398**
$\rho_{ВП}$	1,2—62,0	19,8	173,2	**—0,676**	+0,103	+0,218	+0,086	**+0,393**	+0,245	+0,271	**+0,338**
$\rho_{ф}$	0,5—10,0	3,0	3,6	—0,030	**—0,354**	**+0,732**	+0,270	**+0,320**	—0,235	—0,248	+0,066
$\rho_{к}^{(2,25)}$	1,5—110,0	49,2	1077,8	**—0,565**	**+0,593**	+0,267	—0,103	+0,122	+0,058	**+0,344**	—0,036
M	2,093—19,648	6,656	17,854	**+0,937**	—0,061	—0,117	+0,254	—0,009	+0,121	+0,065	—0,010
$K^+ + Na^+$	0,793—7,021	2,425	2,369	**+0,928**	—0,125	—0,109	+0,214	—0,047	+0,155	+0,101	+0,021
Mg^{2+}	0,0002—0,140	0,0175	0,0008	**+0,854**	—0,025	—0,129	+0,184	+0,134	+0,009	**+0,297**	+0,032
Ca^{2+}	0,002—0,862	0,100	0,026	**+0,614**	**+0,454**	+0,159	**+0,286**	**+0,325**	—0,237	+0,018	—0,277
Cl^-	0,782—11,912	3,183	7,882	**+0,964**	+0,120	—0,019	+0,117	—0,011	+0,028	+0,102	+0,023
Br^-	0,003—0,055	0,0160	0,0002	**+0,947**	+0,090	+0,084	+0,136	—0,055	+0,097	+0,019	+0,055
I^-	0,001—0,020	0,007	0,0000	**+0,654**	**+0,507**	+0,211	+0,073	+0,021	+0,062	—0,231	—0,106
SO_4^{2-}	0,00001—0,156	0,0267	0,0009	+0,076	**—0,358**	**+0,667**	—0,180	**—0,298**	+0,269	+0,212	**—0,404**
$CO_3^{2-} + HCO_3^-$	0,038—4,904	1,282	1,474	**—0,385**	**—0,585**	**—0,313**	**+0,438**	+0,112	**+0,305**	—0,062	—0,086
H_2SiO_3	0,007—0,062	0,0280	0,0002	**—0,518**	**—0,292**	+0,071	**+0,378**	**—0,306**	**—0,516**	**+0,309**	+0,015
Доля фактора, %				48,1	11,6	10,0	6,3	5,7	4,4	3,4	3,3

тить внимание на связь минерализации воды с показателями электрического сопротивления, которые были введены в число рассматриваемых, чтобы оценить степень влияния фильтрата промывочной жидкости на получаемую при испытании скважин воду. Уменьшение факторных нагрузок в направлении $\varrho_{вп} - \varrho_к^{(2,25)} - \varrho_ф$ доказывает, что воды выборки близки по концентрации солей пластовым, а влияние фильтрата хотя, вероятно, и существует, но в большинстве случаев слабо ощутимо. Проникновение фильтрата мало сказывается уже на показаниях двухметрового зонда, поэтому $\varrho_к^{(2,25)}$ лучше коррелируется с $\varrho_{вп}$, чем с $\varrho_ф$.

Значимые нагрузки 1-го фактора на гидрохимические показатели делятся по своим знакам на две группы. Деление, очевидно, имеет генетический смысл. Обратная зависимость общей минерализации и большинства слагающих ее компонентов от глубины залегания, температуры и рангов зон катагенеза указывает на процесс, приводящий к образованию обратной гидрохимической зональности. Прямая зависимость концентрации кремниевой кислоты и анионов угольной кислоты от тех же показателей означает обогащение вод продуктами выщелачивания пород под действием катагенеза. За связями обеих групп с АПС и $\varrho_{вп}$ скрыто, как будет показано дальше, влияние вещественного состава коллекторов на соотношение ионно-солевых компонентов в водах.

Нагрузки на признаки и знаки в структуре 2-го фактора можно проинтерпретировать так. Увеличивающееся с глубиной проникновение фильтрата повышает кажущееся сопротивление, одновременно с увеличением температуры падает сопротивление фильтрата. По разрезу изменяется фациальный облик отложений, состав и содержание РОВ, поэтому, вероятно, с глубиной уменьшается концентрация анионов угольной кислоты, сульфатов и увеличивается концентрация иода. В частности, увеличение содержания иода может быть обусловлено возрастанием мористости фаций вниз по разрезу. Вполне вероятно также, что значимые нагрузки 2-го фактора несут информацию о реакциях катионного обмена с участием кальция.

3-й фактор отражает процессы, вызванные проникновением фильтрата промывочной жидкости. Большими нагрузками и одинаковыми знаками у показателей АПС и $\varrho_ф$ выражается известная связь между ними. Большая нагрузка на содержание в водах сульфатов означает, по-видимому, что окисление соединений серы при смешивании пластовой воды с флюидом из промывочной жидкости оказывает заметное влияние на электрические параметры, в том числе на амплитуду ПС.

Структура 1-го фактора свидетельствует о прямой зависимости концентрации анионов угольной кислоты и кремниевой кислоты от связанных между собой рангов межстадиального катагенеза и пластовой температуры. Эта зависимость детализируется распределением нагрузок 4-го фактора. Очевидно, ось 4-го фактора выделяет из сложного наслоения процессов растворение минералов под дей-

ствием термобарических условий недр и геологического времени, а также перенос в растворе кремнезема и карбонатов кальция. Становится понятным, что уменьшение концентрации кальций-иона по мере опреснения вод сдерживается, замедляется выщелачиванием карбонатных пород, и потому нагрузка на признак 1-го фактора сравнительно низка.

Вместе четыре фактора описывают 76% дисперсии признаков, остальные отмечают менее существенные тонкости взаимоотношения гидрохимических и промыслово-геофизических показателей и здесь не разбираются.

Результаты факторного анализа данных второй выборки интерпретируются так же, как результаты анализа первой. У обеих выборок сходно распределение нагрузок на признаки и знаков в структуре 1-го фактора. В структуре последующих трех факторов различаются упомянутые выше процессы, но некоторые из них обособились менее четко. Ухудшение расчленения связей по процессам объясняется особенностями второй выборки: в отличие от первой в ней нет признаков, характеризующих проникновение в пласт фильтрата промывочной жидкости, и меньше включено данных по отложениям, испытавшим сильное воздействие катагенеза, но залегающим на сравнительно малых глубинах.

Сопоставить минерализацию подземных вод с литологией и пористостью вмещающих коллекторов можно, сравнивания факторные нагрузки табл. 12 и 13. При сравнении обращает на себя внимание тот факт, что АПС и $\varrho_{ВП}$ связаны как с гидрохимическими показателями, так и с АГ, Md и $K_п$; в то же время ранги межстадиального катагенеза (а также глубина и температура) связаны с гидрохимическими показателями и с $K_п$. Судя по знакам факторных нагрузок, значение M и других гидрохимических показателей первой группы (см. интерпретацию 1-го фактора в табл. 13) обратно пропорциональна АГ, N и прямо пропорциональна Md, $K_п$. Соответственно концентрация ионно-солевых компонентов второй группы прямо пропорциональна АГ, N и обратно пропорциональна Md, $K_п$. Связь минерализации подземных вод с рангами зон, показателями гранулометрического состава и пористостью коллекторов можно объяснить влиянием катагенеза. Под действием температуры, давления и геологического времени происходит дифференцированное в зависимости от гранулометрического состава уплотнение пород, отжатие из порового пространства связанных вод и вынос в растворах продуктов катагенетической переработки.

Лабораторные эксперименты по сжатию водонасыщенных глин, алевролитов и песчаников [5, 36, 61, 64, 71 и др.] показали, что в процессе умеренного уплотнения из пород отжимаются растворы с выдержанной или повышающейся концентрацией солей, а затем по мере постепенного увеличения давления содержание солей в элизионной воде уменьшается. Чтобы убедиться в закономерности результатов, П. А. Крюков [65] исследовал не только природные объекты, но и модели породы, например ионообменные смолы. Варьируя условия опытов, он неизменно получал опреснение по-

следних порций отжатой воды. Минерализация практически падала до нуля.

Критическое давление, выше которого начинается опреснение вод, изменяется в широких пределах. Э. Т. Дегенс и Дж. В. Чилингар называют цифру 7,17 бар, В. Д. Безроднов наблюдал начало опреснения со 102—133 бар при выходе из породы различных форм связанной воды. В опытах П. А. Крюкова критическое давление достигало нескольких тысяч бар. Установлено, что резкое уменьшение минерализации в последовательных порциях отжатой воды происходит в глинистых породах при меньших давлениях, чем в песчаных [65, 68].

Описанные эксперименты доказывают, что под влиянием катагенеза подземные воды способны опресняться в результате разбавления отжатыми связанными водами. Причем в природных условиях критические давления могут быть ниже, так как дополнительно оказывают влияние температура недр и геологическое время. Отжатие рыхлосвязанных вод начинается уже при погружении пород на глубину в несколько сотен метров [6, 76, 99]. В породах, находящихся на одной стадии катагенеза, не промытых транзитными растворами и не содержащих каменные соли, минерализация вод должна контролироваться в первую очередь гранулометрическим составом. Действительно, З. В. Пушкина [86], изучавшая поровые воды четвертичных и плиоценовых отложений Бакинского архипелага, наблюдала относительное повышение минерализации в пластах с более грубым гранулометрическим составом. А. Е. Бабинец и Н. И. Радько [2] отмечают, что в Днепровско-Донецком артезианском бассейне соленость вод в глинистых водоупорах несколько меньше, чем в алеврито-песчаных коллекторах. По данным Л. И. Флеровой [106], минерализация растворов, отжатых в лабораторных условиях из шести образцов аргиллитов и алевролитов готерив-барремского возраста Западной Сибири, составляет 5,3—8,5 г/л, из трех образцов песчаников 11,5—24,7 г/л. Нами сопоставлялся гранулометрический состав коллекторов с соленостью насыщающих их вод по 36 пластам из юрских и меловых отложений севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба. Катагенетические изменения пород, слагающих пласты, измерялись рангами зон 1—3. Девять значений общей минерализации были определены в пробах воды, полученной при испытании скважин, остальные значения рассчитаны по уравнению (11) в гл. 2. Сопоставление показало, что общая минерализация вод в алевролитах не превышает 5,4 г/л, в то время как в песчаниках достигает 13,9 г/л.

Очевидно, с увеличением в терригенных коллекторах алеврито-глинистой фракции, с ухудшением сортированности и уменьшением медианного диаметра зерен, во-первых, усложняется структура порового пространства и увеличивается доля связанной воды, во-вторых, уменьшается сопротивление сжатию под действием горного давления, и поэтому в итоге уменьшается минерализация первоначальных, погребенных с осадками вод.

Разную степень участия отжатых из глин растворов в опреснении седиментационных вод севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба предполагали Б. П. Ставицкий [98, 23], Г. Д. Гинсбург, Г. А. Иванова [25, 42], А. Э. Конторович [54, 56] и другие. Однако они не обратили внимания на подчиненность процесса гранулометрическому составу коллекторов.

Отжатые под влиянием катагенеза воды, разбавляя первоначальные, одновременно изменяют их солевой состав. Чем меньше минерализация отжимаемых вод, тем большей растворяющей способностью они обладают. Агрессивность вод повышается растворенным в них углекислым газом, образующимся при катагенезе РОВ. Отжимаемые воды выносят продукты катагенетической переработки минералов и органического вещества. Как показало сопоставление табл. 12 и 13, с увеличением рангов зон катагенеза и содержания в коллекторах алеврито-глинистого материала, с уменьшением медианного диаметра зерен и содержания в водах солевых компонентов первой группы увеличивается концентрация гидрокарбонатов и кремниевой кислоты. На севере Западно-Сибирской плиты и в Енисей-Хатангском прогибе для вод, полученных при испытании скважин, характерно, что на фоне опреснения вод уменьшение концентрации хлор-иона сопровождается абсолютным увеличением общей щелочности вод и сменой типа от хлоридного к гидрокарбонатно-хлоридному и даже к хлоридно-гидрокарбонатному.

По данным Л. И. Флеровой [106], относительное содержание гидрокарбонат-иона в водах из алеврито-глинистых пород оказалось выше, чем в водах из песчаников. Из 36 исследованных нами пластов в 9 испытанных с увеличением доли алеврито-глинистого материала в гранулометрическом составе коллектора возрастает относительное содержание в водах гидрокарбонатов и кремниевой кислоты.

Прямая зависимость концентрации анионов угольной кислоты от содержания в коллекторах алеврито-глинистой фракции обусловлена не только влиянием гранулометрического состава пород на интенсивность выщелачивания. Частично обогащение солевого состава происходит за счет преобразования органического вещества [54, 56]. Причем и в этом случае, очевидно, алеврито-глинистые породы генерируют больше ионов $CO_3^{2-}+HCO_3^-$, потому что больше вмещают РОВ. Не случайно существует обратная зависимость концентрации битумоидов в водах от «песчанистости», определенной по амплитуде ПС [25]. Генетический тип органического вещества, который, по-видимому, влияет на соотношение поступающих в воду компонентов I^-, SO_4^{2-} и $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ тоже, за редким исключением, определяется содержанием алеврито-глинистого материала [16].

Интерпретация факторных матриц в табл. 12 и 13 показала, что катагенетическое преобразование седиментационных вод выражается главным образом в опреснении и обогащении продуктами выщелачивания. Влияние катагенеза представлено межстадиаль-

ным и внутристадиальным направлениями, поэтому и опреснение, и пополнение солевого состава контролируются рангами зон и структурой коллекторов. Поскольку 1-й и 4-й факторы в табл. 13 описывают катагенетическое опреснение вод и обогащение их продуктами выщелачивания, то удельный вес обоих процессов в формировании общей минерализации вод, судя по нагрузкам на признак M, составляет 94%. Основные изменения солевого состава под влиянием катагенеза заключаются в том, что с увеличением степени катагенетического преобразования пород и содержания в них алеврито-глинистого материала (или с уменьшением медианного диаметра обломочных зерен) заметно уменьшается в водах концентрация $K^+ + Na^+$, Mg^{2+}, Cl^-, Br^-, менее заметно — Ca^{2+}, I^- и несколько увеличивается концентрация $CO_3^{2-} + HCO_3^-$, H_2SiO_3. Описанные преобразования вод прослежены на севере Западно-Сибирской плиты и в Енисей-Хатангском прогибе, в общих чертах подтверждаются литературными сведениями по другим регионам и согласуются с результатами лабораторного изучения связанных вод. Они, вероятно, должны быть типичными для терригенных отложений, не содержащих каменных солей и не испытавших притока чужеродных вод.

Одним из доводов в пользу последнего предположения может служить известное в промысловой геофизике уравнение, которое считается приемлемым для всех терригенных коллекторов:

$$АПС = K_0 \cdot \lg \rho_ф/\rho_в, \qquad (8)$$

где K_0 — коэффициент диффузионного потенциала; $\rho_в$ — удельное электрическое сопротивление воды, насыщающей пласт; остальные обозначения встречались ранее.

Коэффициент диффузионного потенциала часто принимают постоянным в пределах отдельных площадей и регионов или вносят в его значение незначительные поправки на пластовую температуру. Значение удельного электрического сопротивления фильтрата промывочной жидкости выдерживается обычно по стволу скважины на участках, измеряемых сотнями метров. Почти в любом терригенном разрезе можно выбрать интервал мощностью несколько сотен метров, где K_0 и $\rho_ф$ практически постоянны. Тогда амплитуда ПС будет находиться только в обратной зависимости от удельного сопротивления пластовой воды или в прямой зависимости от общей минерализации. Интерпретация записи ПС основана на положении об обратной зависимости амплитуды от содержания в коллекторе глинистого цемента. Следовательно, по крайней мере в небольшом интервале разреза общая минерализация вод в почти «чистых» песчаниках должна быть выше, чем в соседних алеврито-глинистых.

Представление о роли гранулометрического состава пород в формировании минерализации подземных вод дополняет сведения о влиянии гранулометрического состава на образование конкреций на стадии диагенеза и на минеральные катагенетические превращения.

Результаты интерпретации факторов в табл. 12 и 13 навели на мысль о возможности и целесообразности включения в выборку по водоносным пластам дополнительных сведений о породах. Новая выборка данных была составлена по 61 пласту из юрских и меловых отложений севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба. Кроме признаков, характеризующих водоносные пласты прежних двух выборок, в новую вошли следующие. По известным удельным сопротивлениям неизмененной части пласта, значениям минерализации вод и температурам рассчитывался параметр пористости. Обратная связь $P_п$ с $K_п$, как будет показано в следующей главе, настолько тесна, что по величине признака можно судить о емкостных свойствах пород, слагающих пласты. Отношение суммарной мощности непроницаемых по записи ПС пород к общей мощности рассматриваемого интервала глубин условно называлось глинистостью разреза. Для каждого пласта подсчитана глинистость в интервале 40 м — Гл40 и в интервале 100 м — Гл100 (половины интервалов отмерялись от середины пласта). Фациальные условия образования отложений, содержащих исследуемые пласты, оценивались в рангах, величина которых возрастает с мористостью — Мр. Отложения лагунно-континентальные обозначались цифрами 1 и 2, морские прибрежные — 3 и 4, морские относительно глубоководные — 5. Мористость определялась по комплексу имеющихся геологических сведений. Новая выборка обрабатывалась по методу главных компонент, статистические характеристики признаков и факторные нагрузки на них приведены в табл. 14.

Взаимоотношение нагрузок 1-го фактора на признаки, содержащиеся в табл. 13 и 14, одинаково. В новой выборке, так же как и в прежней по юрским и меловым отложениям, ранги зон катагенеза, глубина залегания и температура находятся в прямой связи с концентрацией гидрокарбонатов и кремниевой кислоты и в обратной связи с величиной гидрохимических показателей первой группы, где максимальная нагрузка приходится на концентрацию хлор-иона. Та же направленность связей сохранилась у промыслово-геофизических данных с минерализацией вод. И по-прежнему незначима нагрузка на удельное сопротивление фильтрата промывочной жидкости (хотя 13 пластов новой коллекции не были представлены в прежней).

Введенные в выборку дополнительные показатели подтверждают и уточняют сложившиеся представления о системе порода—вода.

Нагрузка 1-го фактора на параметр пористости значима. Как и ожидалось, связи его с другими признаками обратны тем, что установлены для пористости. Значения параметра пористости, например, прямо пропорциональны рангам зон катагенеза, коэффициент парной корреляции признаков равен +0,607. С возрастанием рангов мористости, по-видимому, уменьшается медианный диаметр зерен водонасыщенной породы и увеличивается содержание в ней алеврито-глинистого материала. Поэтому значимая

Таблица 14

Статистические характеристики и факторные нагрузки на признаки выборки юрских и меловых отложений севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-

Признаки	Диапазон изменения	Средние значения	Дисперсия	Факторы 1	2
N	1—4	2,7	0,642	**—0,695**	+0,247
H	800—3950	2104	$4079 \cdot 10^2$	**—0,608**	**+0,607**
t	9—99	52	307	**—0,546**	**+0,618**
АПС	20,0—93,7	52,4	336,0	**+0,535**	+0,049
$\rho_{ВП}$	1,2—62,0	19,6	158,2	**—0,703**	—0,105
$\rho_{ф}$	0,5—10,0	3,1	3,3	—0,111	**—0,563**
$\rho_{к}^{(2,25)}$	1,5—125,0	51,0	1166,5	**—0,513**	+0,141
$P_{п}$	4,1—111,0	29,6	371,5	**—0,526**	+0,249
Гл40	0,05—0,66	0,27	0,01	+0,163	**+0,552**
Гл100	0,09—0,66	0,33	0,02	+0,126	**+0,692**
Мр	2—4,5	2,9	0,25	**—0,487**	—0,001
M	2,035—19,648	6,559	16,101	**+0,915**	+0,104
$K^+ + Na^+$	0,780—7,021	2,409	2,146	**+0,903**	+0,089
Mg^{2+}	0,0002—0,140	0,0167	0,0007	**+0,853**	—0,017
Ca^{2+}	0,002—0,862	0,087	0,022	**+0,607**	+0,088
Cl^-	0,782—11,912	3,116	6,928	**+0,957**	+0,088
Br^-	0,003—0,055	0,016	0,0002	**+0,927**	+0,129
I^-	0,001—0,020	0,008	0,0000	**+0,612**	**+0,290**
SO_4^{2-}	0,00001—0,156	0,0285	0,0009	+0,001	**—0,422**
$CO_3^{2-} + HCO_3^-$	0,038—4,904	1,283	1,301	**—0,383**	+0,057
H_2SiO_3	0,005—0,062	0,027	0,0002	**—0,453**	**—0,373**
Доля фактора, %				38,1	11,7

нагрузка на Мр обладает таким же знаком, как нагрузка на параметр пористости, и противоположным знаку нагрузки на общую минерализацию и амплитуду ПС.

Гидрогеологи, объясняющие опреснение отжатием связанных вод, полагают, что интенсивность процесса зависит главным образом от мощности соседних с коллектором глинистых пластов или от мощности подстилающих глинистых пластов. Однако 1-й фактор, который контролирует почти 84% дисперсии значений общей минерализации, 92% дисперсии значений концентрации хлор-иона и т. д., не коррелируется значимо с глинистостью разреза в 40-метровом и в 100-метровом интервалах. Только в структуре нагрузок 4-го фактора наблюдается существенная связь общей минерализации воды и концентрации некоторых ионов с глинистостью. Здесь, скорее всего, зафиксировано растворение карбонатных пород, содержащихся в песчанистом разрезе. Растворение — потому что с повышением температуры в воде возрастает содержание некоторых ионов и общая минерализация. В песчанистом разрезе — потому что растворение усиливается с уменьшением глинистости в обоих интервалах. О карбонатности растворяемых пород говорит появление в воде катионов вместе с анио-

по 61 водоносному пласту Хатангского прогиба

Факторы 3	4	5	6	7	8	9	10
—0,199	+0,221	**+0,414**	+0,038	+0,033	—0,070	+0,132	+0,073
—0,077	+0,178	—0,043	**+0,320**	—0,085	—0,018	+0,098	—0,001
+0,048	**+0,300**	—0,043	**+0,360**	—0,060	+0,068	+0,132	+0,031
—0,510	—0,044	**+0,309**	**+0,329**	—0,100	+0,060	—0,157	**—0,372**
—0,354	+0,240	—0,052	**—0,436**	—0,150	+0,041	—0,199	—0,041
—0,484	+0,105	**+0,356**	—0,110	**+0,262**	+0,072	**+0,369**	—0,159
—0,627	—0,039	**—0,355**	+0,052	—0,083	+0,070	—0,229	+0,049
—0,302	**+0,576**	+0,159	**—0,346**	—0,043	—0,021	—0,154	+0,045
—0,011	**—0,557**	**+0,302**	**—0,299**	+0,189	+0,232	—0,041	+0,029
—0,106	**—0,485**	**+0,317**	—0,174	—0,069	+0,079	+0,035	+0,077
—0,028	—0,013	+0,071	+0,200	**+0,748**	—0,183	**—0,330**	+0,079
+0,089	**+0,299**	+0,166	+0,033	+0,024	+0,009	—0,086	+0,054
+0,109	**+0,272**	+0,216	+0,038	—0,024	—0,015	—0,131	+0,031
+0,074	**+0,271**	—0,010	—0,069	—0,079	+0,135	—0,100	+0,100
—0,345	**+0,254**	**—0,292**	—0,042	**+0,254**	+0,228	**+0,275**	**+0,313**
—0,070	+0,175	+0,007	+0,020	—0,001	+0,023	—0,091	+0,060
—0,162	+0,127	+0,120	+0,027	+0,049	—0,018	—0,082	—0,030
—0,453	+0,056	—0,163	—0,013	+0,106	—0,100	+0,144	—0,147
—0,411	—0,241	**+0,458**	+0,220	**—0,275**	**—0,273**	—0,028	**+0,396**
+0,517	**+0,423**	**+0,484**	—0,084	+0,027	+0,004	+0,040	—0,049
+0,019	+0,008	+0,161	**+0,252**	—0,015	**+0,704**	—0,129	+0,063
9,4	8,1	6,7	4,5	4,2	3,7	2,8,	2,3

нами угольной кислоты. Уменьшение пористости с увеличением песчанистости разреза и отсутствие значимых нагрузок на удельное сопротивление пород и амплитуду ПС можно объяснить плотностью карбонатных пород и маломощностью большинства линз, прослоев, которые не регистрируются привлеченными каротажными методами. Впрочем, нельзя поручиться, что предложенный вариант интерпретации исключает другие. В то же время по структуре нагрузок невозможно обосновать опреснение, подчиненное глинистости разреза и катагенетическому уплотнению пород. Коэффициенты парной корреляции общей минерализации с глинистостью незначимы, они меньше 0,1.

У структуры 2-го фактора в табл. 14 по сравнению со структурой того же фактора в табл. 13 обнаруживаются черты сходства и различия. Различия приводят к мысли, что часть значимых нагрузок возникает и исчезает в зависимости от особенностей расположения подобранного материала по шкале глубин.

3-й фактор раскрывает зависимость промыслово-геофизических показателей от солевого состава вод. Прямая связь $\rho_{ф}$ с АПС и обоих показателей с концентрацией сульфат-иона описана выше. Значимые нагрузки и одинаковые знаки у $\rho_{ф}$, $\rho_{к}^{(2,25)}$, $\rho_{ВП}$ и $P_{п}$,

зависящего от $\rho_{ВП}$, свидетельствуют о том, что фактор описывает влияние проникновения промывочной жидкости и на ту часть пласта, которая считается неизмененной. Глубокое проникновение искажает солевой состав пластовых вод, но несущественно, поэтому нагрузка на общую минерализацию остается незначимой. Смысл распределения знаков и нагрузок на признаки в структуре последних пяти факторов не вполне ясен.

Результаты математической обработки данных выборки позволяют оценить зависимость основных электрокаротажных показателей от минерализации подземных вод. Коэффициенты парной корреляции общей минерализации с АПС и $\rho_{ВП}$ равны соответственно $+0{,}487$ и $-0{,}630$. Из включенных в выборку ионно-солевых компонентов на амплитуду ПС сильнее других влияют концентрация анионов хлора $r=+0{,}534$ и брома $r=+0{,}607$. Наибольшая зависимость $\rho_{ВП}$ от концентрации катионов калия вместе с натрием и анионов хлора отражена в коэффициентах парной корреляции $-0{,}619$ и $-0{,}600$. Не удивительно, что связь промыслово-геофизических показателей с минерализацией вод, являющихся электролитом, оказалась более тесной, чем с вещественным составом пород. В выборке по 36 пластам (исследование ее описано в разделе 3) наибольшие коэффициенты парной корреляции АПС и $\rho_{ВП}$ с содержанием в водоносных коллекторах алеврито-глинистой и глинистой фракций достигли 0,36—0,40.

Основную информацию о формировании подземных вод содержат 1-й и 4-й факторы. Они (главным образом 1-й фактор) контролируют подавляющую часть дисперсии значений гидрохимических признаков. Если интерпретация 4-го фактора неоднозначна, то интерпретация 1-го вряд ли вызывает сомнения. Анализ распределения знаков и факторных нагрузок подтвердил и уточнил прежние выводы. Введение в исследуемую выборку таких дополнительных признаков, как параметр пористости и мористость, подтвердило, что минерализация вод связана с гранулометрическим составом коллекторов. Введение в выборку признаков глинистости разреза показало, что общая минерализация вод и концентрация основных слагающих ее ионно-солевых компонентов практически не связаны с мощностью глинистых пластов, подстилающих и перекрывающих водоносные коллекторы. Причиной сомнения в таком выводе может послужить только условность рассчитанных по ПС значений глинистости. Однако приведенные в гл. 3 сопоставления общей минерализации вод со строением разреза на конкретных поисково-разведочных площадях свидетельствуют в пользу вывода, и остается только найти объяснение факту.

Уравнение (20) (см. гл. 3) дает возможность выразить количественно зависимость минерализации воды от интенсивности межстадиального катагенетического преобразования и гранулометрического состава коллекторов. По 60 водоносным пластам из юрских и меловых отложений севера Западной Сибири и Енисей-Хатангского прогиба были подобраны исходные данные. Значения

общей минерализации воды определялись в пробах, отобранных при испытании скважин; ранги зон катагенеза, как обычно, по степени углефикации РОВ; содержание алеврито-глинистого материала в породах 9 пластов измерялось гранулометрическим ситовым анализом, а в породах остальных пластов оно рассчитано по уравнению (20). Диапазон изменения общей минерализации составил 1,050—19,648 г/л, рангов зон 1—4, содержания алеврито-глинистого материала 20,0—71,2%. Полученное по подобранным данным уравнение имеет вид

$$M = -3{,}477\,N - 0{,}150\,АГ + 21{,}700. \qquad (9)$$

Коэффициент множественной корреляции равен 0,933, стандартное отклонение 2,68. В дополнение к уравнению (9) было рассчитано другое, по 11 пластам, для которых содержание алеврито-глинистой фракции в породах определено только с помощью гранулометрического анализа:

$$M = -1{,}235\,N - 0{,}111\,АГ + 13{,}832. \qquad (10)$$

Коэффициент множественной корреляции равен 0,936. И хотя формально коэффициент множественной корреляции значим, самостоятельное значение дополнительного уравнения не переоценивается — слишком мало заложено в него данных. Оно приведено для повышения доверия к предыдущему уравнению.

Уравнения (9) и (10) не вполне совершенны: в исходные данные для первого вошли кроме фактических рассчитанные значения, а во второе из них заложено мало исходных данных. Не удивительно, что коэффициенты независимых переменных и свободные члены в обоих уравнениях заметно различаются. Однако коэффициент множественной корреляции в обоих уравнениях весьма высок, и это вновь подтверждает решающую роль межстадиального и внутристадиального катагенеза в формировании подземных вод. Первоначальная минерализация погребенных с осадками вод седиментационных бассейнов настолько изменена под влиянием катагенеза, что теперь воды, насыщающие коллекторы, в основном характеризуют вещественный состав и степень преобразованности пород.

Вероятно, катагенетической переработке могут подвергнуться не только седиментационные воды. Невозможно представить себе, что отжатая из глинистых пород вода не попадала в коллекторы. Можно предположить, что фильтрация очень растянута во времени и вода, пришедшая в коллекторы, успевает приспособиться к ним, уравновешивается с вещественным составом пород. По-видимому, обусловленные погружением пород сдвиги в системе порода — вода вызывают ответные реакции, направленные на уравновешивание в новых условиях. Может быть, по этой же причине зависимость общей минерализации и основных слагающих ее компонентов от рангов зон катагенеза и гранулометрического состава коллекторов не искажается заметно ни поступле-

нием биогенных вод, появляющихся при разложении органического вещества на стадии диагенеза, ни опреснением возрожденными водами, высвобождающимися в результате минеральных преобразований, ни добавлением конденсационных вод, которые выделяются из мигрирующих через водоносные пласты газов, ни проникновением инфильтрационных вод, промывавших в прошлом обнаженные породы, ни оттеснением соленых вод многолетней мерзлотой. Если предположение верно, неуравновешенность системы порода — вода может сохраниться до настоящего времени в тех случаях, когда не хватило времени для ассимиляции чужеродных вод, когда велико отличие внедрившихся вод от уравновешенных, когда внедрение произошло в породы, прошедшие катагенетические стадии активной генерации отжатых и возрожденных вод.

В уравнениях (1) — (3) и (9), (10) открытая пористость пород и общая минерализация подземных вод почти полностью подчинены одним и тем же независимым переменным. При сравнении коэффициентов уравнений становится ясно, что N сильнее влияет на пористость, а АГ — на общую минерализацию вод. Расчет коэффициентов частной корреляции в выборках по 36 пластам при элиминировании амплитуды ПС и удельного сопротивления неизмененной части водоносных коллекторов подтвердил, что корреляция N с пористостью теснее, чем с общей минерализацией. Большее влияние содержания алеврито-глинистого материала на общую минерализацию, чем на пористость, будет продемонстрировано в гл. 3 на природных объектах. В уравнениях (9), (10) в отличие от уравнений (1)—(3) АГ определенно не отражает влияния седиментации и, скорее всего, диагенеза тоже. Следовательно, на пористость сильнее влияет межстадиальный, а на общую минерализацию внутристадиальный катагенез.

В слабо измененных катагенезом породах в формировании пористости и проницаемости коллекторов и минерализации подземных вод принимает участие широкий спектр литологических разностей. Ниже по разрезу спектр постепенно сужается за счет последовательного уменьшения вклада интенсивно консолидированных и обезвоженных пород. Так, в отложениях зоны 4, где РОВ достигло газовой стадии углефикации, все глинистые породы превращаются в аргиллиты, алевролиты практически теряют свойства гранулярных коллекторов и основное влияние на минерализацию воды, которая извлекается при испытании, оказывают песчаники. С дальнейшим повышением ранга зон катагенеза роль гранулометрического состава в изменении емкостных и фильтрационных свойств коллекторов и минерализации подземных вод утрачивает значение. Вниз по разрезу увеличивается влияние межстадиального катагенеза и уменьшается — внутристадиального.

ГЛАВА 2

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕТОДОВ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Разработанные методы являются продолжением и практическим итогом выполненных в предыдущей главе исследований. Реализация в количественной форме изложенных выше соображений позволяет сопоставить их с фактами, дополнить факты и возместить их отсутствие. Методические разработки прямо или косвенно учитывают влияние катагенеза на формирование алевритопесчаных коллекторов и минерализацию подземных вод.

§ 1. Методы определения минерализации подземных вод

В процессе нефтегазопоисковых работ на севере Западно-Сибирской плиты и в Енисей-Хатангском прогибе было испытано несколько сотен водоносных пластов юрско-меловой толщи. Однако отобранные в скважинах пробы воды характеризовали главным образом продуктивные отложения, и их оказалось недостаточно для того, чтобы создать для регионов единую стройную схему пространственного изменения минерализации, схему, которая позволяла бы объяснить подавляющую часть накопленных фактических сведений и осуществлять обоснованный прогноз. В разрезах разведочных площадей намечались как прямая, так и обратная гидрохимические зональности, осложненные к тому же локальными аномалиями. Диапазон изменения минерализации в одновозрастных отложениях обычно не поддавался анализу. Гипотезы, как будто подходившие для нескольких площадей и отдельных участков разреза, оказывались несостоятельными в некотором удалении.

Сложная, часто непредсказуемая изменчивость содержания ионно-солевых компонентов в водах регионов, неравномерность распределения и недостаточность испытанных водоносных горизонтов побудили к поискам методов определения минерализации подземных вод с привлечением промыслово-геофизических данных. Использование промыслово-геофизических данных открывало возможность проследить непрерывную цепь изменения минерализации вод по разрезу.

До сих пор методов определения минерализации подземных вод по электрокаротажу в региональном масштабе разработано не было. Предпринимались отдельные попытки определять общую

минерализацию по амплитуде ПС на некоторых площадях [14, 24, 95], однако развития они не получили, и причины тому были не только субъективные, но и объективные. В основу разрабатывавшихся методов закладывалась приведенная выше формула (8). Коэффициент K_0 в ней зависит от литолого-петрографических особенностей водоносных горизонтов и в меньшей степени от температуры недр. Методы, основанные на формуле (8), находили применение в регионах, где K_0 можно принять постоянным в пределах площадей или по крайней мере на участках разреза скважин. Как показали наши расчеты по опробованным водоносным объектам, в Енисей-Хатангском прогибе в отличие от других K_0 меняется в широких пределах (табл. 15) даже в одновозрастных отложениях и при одинаковой пластовой температуре. Например, в скважине Соленинская-5 в интервале глубин 2330—2338 м при температуре 57° С K_0=100 мВ, а в интервале 2380—2390 м

Таблица 15

Коэффициенты диффузионного потенциала, рассчитанные для опробованных водоносных пластов по формуле $K_0 = \frac{\text{АПС}}{\lg(\rho_ф/\rho_в)}$

Скважины	Интервалы испытания водоносных пластов, м	Возрастные индексы	Пластовые температуры, °С	Коэффициент диффузионного потенциала K_0, мВ
Суходудинская-2	1516—1526	S	34	83,5
Малохетская-15	1020—1026	$I_1p_2^2$ — tr	21	73,2
»	635—646	I_2al_2	11	36,4
Семеновская-2	2648—2654	I_1p_1	70	32,2
»	1667—1678	K_1v_1	43	38,8
»	982—1016	K_1ap_2 — al_{1-2}	19	65,0
Зимняя-1	2234—2253	I_2al_2	60	24,1
Зимняя-5	1852—1863	I_2bt	48	55,3
Нижнехетская-2	978—988	I_3ox — km_1^1	21	43,2
Джангодская-2	1116—1127	K_1v_2 — h	15	82,5
Казанцевская-1	2452—2460		60	230,0
Казанцевская-2	2563—2573		64	255,0
Казанцевская-4	2504—2514		59	62,0
Казанцевская-6	2321—2230		56	77,4
»	2602—2613		65	77,4
»	2650—2660		66	87,0
Озерная-2	2279—2293		50	77,8
Соленинская-2	2390—2398		59	93,3
»	2473—2480		62	82,0
Соленинская-5	2330—2338		57	100,0
»	2380—2390		59	60,3
Соленинская-14	2137—2142		50	78,8
Паютская-2	2224—2234		54	145,7
»	2133—2147		51	181,3
»	2370—2380		60	124,7
Пеляткинская-4	2425—2435		60	80,0
»	2425—2435		60	75,0
»	2650—2659		69	78,9
Пеляткинская-5	2385—2397		60	64,9

той же валанжин-готеривской толщи при температуре 59° С K_0 = =60,3 мВ. В целом же по этой продуктивной толще в интервале глубин 2140—2660 м K_0 меняется от 60,3 до 255 мВ. Аналогичное изменение K_0 в широком диапазоне наблюдалось на севере Западно-Сибирской плиты. Естественно, при такой изменчивости K_0 в рассматриваемых регионах не обеспечивалась достаточная точность определения общей минерализации.

Из исследования (гл. 1, § 4) выборок, содержащих сведения о солености вод и о геолого-геофизических признаках водонасыщенных пластов, вытекает, что наиболее информативными в отношении общей минерализации являются ранги зон катагенеза, амплитуда ПС и удельное электрическое сопротивление неизмененной части пласта. Перечисленные три показателя были использованы при расчете уравнения регрессии по 61 водоносному пласту из юрско-меловых отложений севера Западной Сибири и Енисей-Хатангского прогиба. Исходные данные для расчета приведены в табл. 16, уравнение имеет вид

$$M = -0{,}239\,N + 0{,}020\,\text{АПС} - 8{,}887\lg\rho_{\text{ВП}} + 16{,}716. \qquad (11)$$

Коэффициент множественной корреляции $R = 0{,}961$, стандартное отклонение 2,10. Изменение удельного сопротивления больше, чем изменение других переменных, сказывается на величине рассчитанной общей минерализации. Приближение связи $\rho_{\text{ВП}}$ и M к линейной выполнено с помощью логарифмирования промыслово-геофизического показателя. Как показала интерпретация результатов математической обработки, содержащихся в табл. 13 и 14, значимые и довольно большие нагрузки на N, АПС и $\rho_{\text{ВП}}$ создают факторы, которые описывают катагенетическое опреснение вод и обогащение их продуктами выщелачивания и которые контролируют более 90% дисперсии определений общей минерализации. Поэтому уравнение выражает влияние обоих процессов, а коэффициент множественной корреляции близок к единице. Уравнение использовалось в качестве метода для оценки общей минерализации вод в юрских и меловых отложениях рассматриваемых регионов; хорошая сходимость расчетных данных с фактическими на большинстве разведочных площадей подтвердила представительность исходных данных.

Опыт применения метода показал, что единичные существенные отклонения расчетных значений от фактических приурочены главным образом к юрским отложениям на участках, где они недостаточно надежно изолированы от фундамента и в них проникают рассолы. По существу отклонения являются аномалиями на фоне региональных закономерностей, выраженных уравнением.

Отдельно по 54 пластам только мелового возраста рассчитано другое уравнение:

$$M = -1{,}152\,N + 0{,}038\,\text{АПС} - 7{,}849\lg\rho_{\text{ВП}} + 16{,}671. \qquad (12)$$

Коэффициент множественной корреляции — 0,970, стандартное отклонение 1,82. В коллекторах нижнемеловых отложений вниз по

Таблица 16

Геолого-геофизические данные водоносных пластов и общая минерализация подземных вод юрских и меловых отложений севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба

Скважины	Интервалы испытания водоносных пластов, м	Возрастные индексы	Общая минерализация вод, г/л	Ранги зон катагенеза	Амплитуда ПС, мВ	Удельное сопротивление водоносных пластов, Ом · м
Суходудинская-1	1290—1303	I_2bt	13,25	3	75,0	8,5
Малохетская-15	1020—1026	$I_1p_2^2$ — tr	7,84	4	60,0	16,0
Зимняя-1	2234—2253	I_2al	5,39	4	25,0	62,0
Зимняя-5	1852—1863	I_2bt	6,53	3	31,0	16,0
Семеновская-2	982—1016	K_1ap_2 — al_{1-2}	11,01	1	62,5	6,0
»	1667—1678	K_1v_1	4,63	3	32,0	22,0
»	2648—2654	I_1p_1	7,95	4	27,5	30,0
Джангодская-2	1118—1123	K_1v_2 — h	6,49	3	63,7	32,0
Рассохинская-1	1759—1770	I_2bt	9,52	3	93,7	5,5
Казанцевская-1	2452—2460	K_1v_2 — h	3,27	3	57,5	40,0
Казанцевская-2	2563—2573		3,21	3	117,0	25,0
Казанцевская-6	2321—2330		6,71	2	63,7	10,0
»	2602—2613		2,94	3	37,5	38,0
»	2650—2660		2,50	3	33,8	25,0
Озерная-2	2279—2293		6,97	2	50,0	10,0
»	2366—2381		8,74	3	46,3	15,0
Озерная-3	2346—2353		6,32	2,5	65,0	23,0
Озерная-6	2557—2572		5,32	3	65,0	15,0
Соленинская-2	2390—2398		1,89	3	51,3	60,0
»	2473—2480		2,09	3	50,0	30,0
Соленинская-5	2330—2338		2,60	3	33,8	38,0
»	2380—2390		3,01	3	25,0	38,0
Соленинская-14	2137—2142		7,78	3	62,5	17,0
Соленинская-18	2486—2493		3,94	3	30,0	14,0
Соленинская-19	2355—2365		4,06	3	42,0	24,0
»	2425—2435		2,70	3	37,0	25,0
Соленинская-20	2213—2220		3,50	3	46,2	15,0
»	2430—2437		3,02	3	38,7	10,0
Паютская-2	2133—2147		2,74	2	51,3	25,0
»	2224—2234		3,36	2	58,8	22,0
»	2370—2380		2,98	3	50,0	15,0
Пеляткинская-4	2425—2435		7,49	3	80,0	28,0
»	2650—2659		4,79	3	51,3	32,0
Пеляткинская-5	2385—2397		4,81	2,5	52,5	25,0
»	2440—2455		4,58	3	43,7	30,0
Пеляткинская-14	796—801	K_1t	8,92	1	35,0	10,0
Балахнинская-2	1666—1678	I_2al	5,48	3	85,0	17,0
Арктическая-2	2084—2090	K_1h	7,13	3	57,0	10,5
»	1920—1934	K_1b	12,40	2	80,0	6,3
Арктическая-4	1660—1674	K_1b — ap	15,25	2	81,0	5,0
Арктическая-21	2013—2028		2,92	2,5	22,0	11,0
Среднеямальская-1	2120—2125	K_1b	5,00	2,7	50,0	21,0
»	2245—2253	K_1h	6,00	3	67,0	13,0
Южнотамбейская-1	2101—2107	K_1h_2 — ap	7,90	2	32,0	9,0
»	2293—2298		9,31	2	35,0	8,0
»	2484—2491		10,30	2,5	32,0	9,0
Южнотамбейская-2	2648—2652		5,06	3	40,0	20,0
»	2708—2712		5,15	3	39,0	19,0
Находкинская-42	2702—2712	K_1h	6,27	3,5	45,0	15,0
»	2776—2788		3,30	3,5	54,0	57,0

Продолжение табл. 16

Скважины	Интервалы испытания водоносных пластов, м	Возрастные индексы	Общая минерализация вод, г/л	Ранги зон катагенеза	Амплитуда ПС, мВ	Удельное сопротивление водоносных пластов, Ом · м
Юрхаровская-100	2710—2718	$K_1v - h$	6,90	3,5	82,0	15,0
Заполярная-1	2816—2828	K_1v	3,48	3,5	55,0	55,0
Русская-8	989—996	$K_1al - K_2cm$	11,50	1	60,0	4,1
Самбургская-151	3020—3030	K_1v	1,05	3,5	72,5	50,0
»	3069—3088		3,80	3,5	75,0	60,0
Уренгойская-34	2930—2935		4,45	3,5	102,5	17,0
»	3044—3052		4,67	3,5	93,7	20,0
Уренгойская-81	3008—3019		3,28	3,5	58,7	20,0
Медвежья-15	1209—1213	K_2cm	18,10	1	80,0	2,0
Комсомольская-16	1057—1065		19,65	1	75,0	1,3
Комсомольская-32	1000—1005		18,75	1	73,0	1,2

разрезу увеличивается содержание алеврито-глинистого материала. Глубина залегания пластов коррелируется с рангами зон, и получается, что ранги зон передают в выборке исходных данных не только влияние катагенеза, но и изменение гранулометрического состава коллекторов. Поэтому коэффициент у переменной N в уравнении (12) гораздо больше, чем в предыдущем.

Пополнение числа входных переменных в уравнениях другими информативными показателями не приносило существенного улучшения. Так, после введения в правую часть уравнения (11) переменной «пластовая температура» коэффициент множественной корреляции увеличился всего на 0,003. Замена рангов зон катагенеза на глубину залегания или температуру сузила бы универсальность уравнений. Они стали бы пригодными только на отдельных участках, в пределах которых масштаб соотношения глубины и температуры с рангами зон не меняется. С другой стороны, для локальных участков замена рангов зон в уравнениях способна обеспечить даже повышение точности определений, поскольку шкала глубин и температур более дробна, чем предлагаемая шкала интенсивности катагенеза. В одном из вариантов расчета уравнений с заменой N на H для 51 водоносного пласта западной части Енисей-Хатангского прогиба коэффициент множественной корреляции достиг 0,956, а стандартное отклонение равнялось 1,73.

По 60 пластам из юрских и меловых отложений севера Западной Сибири и Енисей-Хатангского прогиба геолого-геофизические данные были заложены в уравнение для определения концентрации в подземных водах хлор-иона:

$$Cl^- = +1{,}674\,N + 0{,}002\,АПС - 11{,}778 \lg \rho_{ВП} + 12{,}528. \qquad (13)$$

Коэффициент множественной корреляции 0,861, стандартное отклонение 2,33. Изменение концентрации других ионно-солевых компонентов в водах еще хуже описывалось аналогичными уравнениями регрессии. Очевидно, возможности наиболее рациональных

линейных связей были исчерпаны, оставалось перейти к нелинейным.

Собранные по юрским и меловым отложениям данные обрабатывались с помощью тренд-анализа. Поскольку метод обработки применяется для двух независимых переменных, одной из них вы-

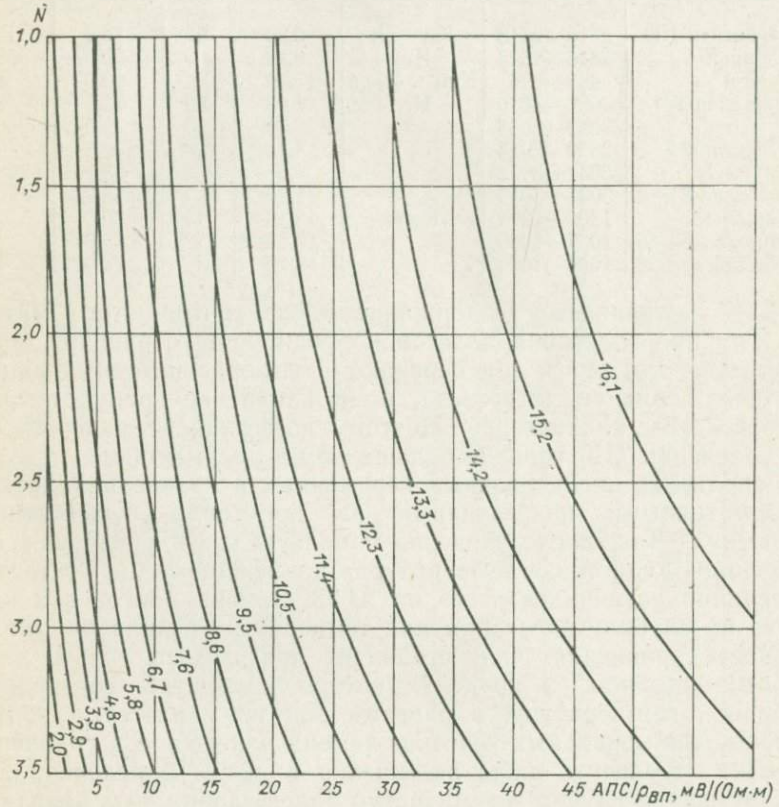


Рис. 3. Зависимость общей минерализации подземных вод M (г/л) от рангов зон межстадиального катагенеза N и амплитуды ПС, деленной на удельное сопротивление водонасыщенного пласта, $АПС/\rho_{ВП}$. Меловые отложения севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба.

$M = +5{,}279 - 0{,}033N^2 + 6{,}478 \ln (АПС/\rho_{ВП})$; количество наблюдений 54; достоверность тренда 95%; сила тренда 85,9%.

бран показатель N, а вторая составлена из двух показателей $АПС/\rho_{ВП}$. Такой вариант сочетания переменных использует все три наиболее информативных показателя и придает картам тренда удобный для анализа вид обобщенных гидрохимических разрезов с нанесенными на вертикальной шкале зонами катагенеза. В результате поиска по программе тренд-анализа оптимальной зависимости общей минерализации от выбранных независимых переменных для 54 водоносных пластов из меловых отложений получены

нелинейное уравнение и соответствующая карта изолиний (рис. 3). Сила тренда для связи, описанной уравнением, равна 85,9%, значит, фактические данные отклоняются от расчетной поверхности обычно не более чем на 14,1% или по обе стороны от поверхности на 7%. Вид уравнения свидетельствует о нелинейной зависимости

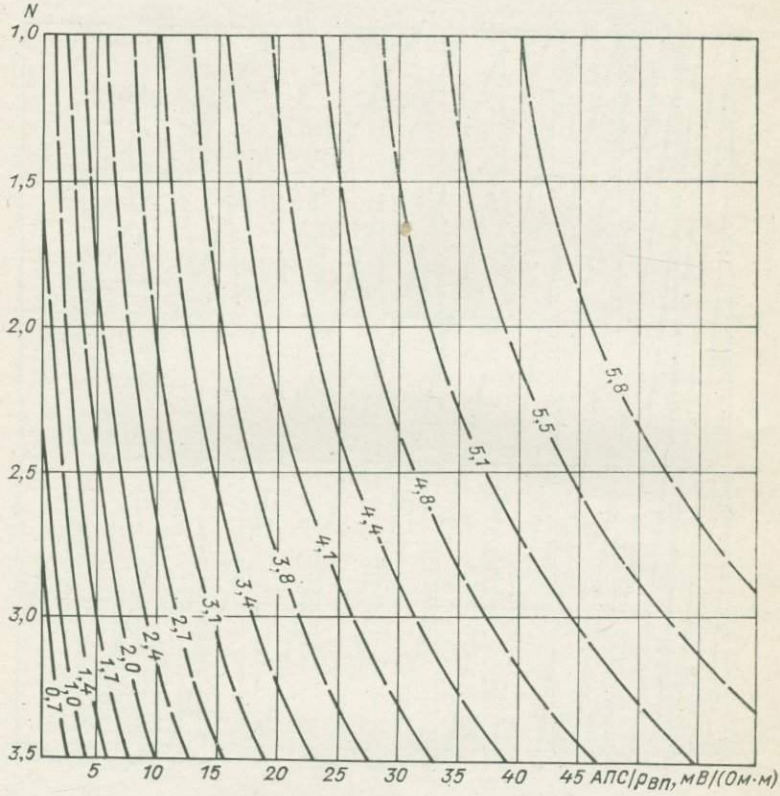


Рис. 4. Зависимость содержания в подземных водах катионов калия и натрия $K^+ + Na^+$ (г/л) от рангов зон межстадиального катагенеза N и амплитуды ПС, деленной на удельное сопротивление водонасыщенного пласта, $АПС/\rho_{ВП}$. Меловые отложения севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба. $K^+ + Na^+ = +1{,}967 - 0{,}013N^2 + 2{,}327 \ln(АПС/\rho_{ВП})$; количество наблюдений 54; достоверность тренда 95%; сила тренда 88,4%.

общей минерализации вод от рангов зон катагенеза. На карте тренда видно, что в верхней части мелового разреза изолинии располагаются почти параллельно оси ординат, отражая широкий диапазон изменения солености вод на фоне относительно слабого действия катагенеза. Ниже, с возрастанием изгиба изолиний, происходит ослабление связи общей минерализации с промыслово-геофизическими признаками и усиление зависимости от интенсивности катагенеза. Заметное увеличение кривизны изолиний начинается при значениях рангов 2—2,5.

По той же выборке исходных данных, что использована для получения тренда общей минерализации, рассчитаны тренды концентрации ионно-солевых компонентов. Карты изолиний и уравнения, обеспечившие наиболее полную аппроксимацию фактических значений теоретическими поверхностями при достоверности 95%,

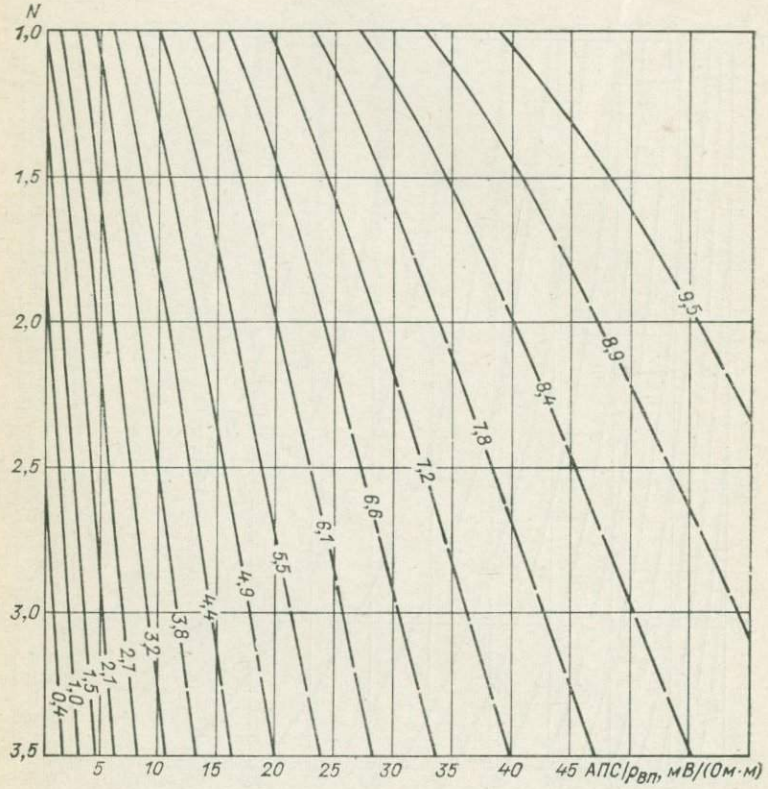


Рис. 5. Зависимость содержания в подземных водах аниона хлора Cl^- (г/л) от рангов зон межстадиального катагенеза N и амплитуды ПС, деленной на удельное сопротивление водонасыщенного пласта, $АПС/\rho_{ВП}$. Меловые отложения севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба.

$Cl^- = +3{,}948 - 1{,}071N^{0{,}5} + 4{,}027 \ln (АПС/\rho_{ВП})$; количество наблюдений 54; достоверность тренда 95%; сила тренда 86,4%.

приведены на рис. 4—6. Если наложить рис. 4 на рис. 3, то обнаруживается едва нарушаемая параллельность изолиний. Рельеф, образованный изолиниями концентрации хлор-иона на рис. 5, несколько отличается: зависимость этого компонента от рангов зон катагенеза ближе к линейной. Вместе концентрация в воде $K^+ + Na^+$ и Cl^- составляет подавляющую долю общего содержания солей, поэтому вид и сила тренда общей минерализации являются в основном итогом суммирования трендов обоих компонентов.

Совершенно отличен от предыдущих по рельефу изолиний тренд концентрации в воде катиона магния (рис. 6). Обращает на себя внимание высокая сила тренда — 93%. Помещенные на рисунках тренды представляют собой номограммы, по которым, зная ранги зон катагенеза, амплитуду ПС и удельное сопротивление водонос-

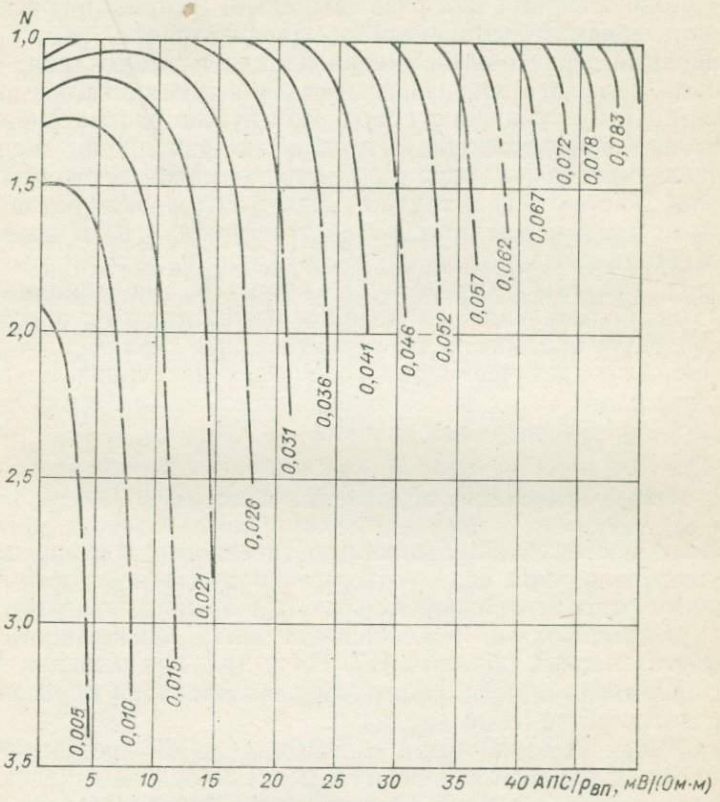


Рис. 6. Зависимость содержания в подземных водах катиона магния Mg^{2+} (г/л) от рангов зон межстадиального катагенеза N и амплитуды ПС, деленной на удельное сопротивление водонасыщенного пласта, $АПС/\rho_{ВП}$. Меловые отложения севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба.

$Mg^{2+} = -0{,}011 + 0{,}011\ АПС/\rho_{ВП} + 0{,}043\ \rho_{ВП}/(N \cdot АПС) + 0{,}198 \cdot 10^{-5} \ln (АПС/\rho_{ВП})$; количество наблюдений 54; достоверность тренда 95%; сила тренда 93,0%.

ных пластов, можно определять гидрохимические показатели в меловых отложениях севера Западной Сибири и Енисей-Хатангского прогиба. Номограммой изменения общей минерализации вод целесообразно пользоваться для решения оперативных, не требующих особой точности задач. Уравнения линейной регрессии, как показал опыт применения, обеспечивают более высокую точность и позволяют определять значения общей минерализации больше 16 г/л. Вероятно, деление амплитуды ПС на удельное сопротивление водо-

носного пласта в уравнении тренда ведет к снижению точности, которое не восполняется нелинейной, более полной аппроксимацией зависимости общей минерализации от геолого-геофизических показателей. Описанные тренды не подводят итоговую черту под возможностями нелинейных связей. Дальнейшие исследования способны усовершенствовать разработанные методы и расширить число определяемых гидрохимических показателей.

Найденные связи общей минерализации и содержания некоторых ионов с геолого-геофизическими данными являются эмпирическими, поэтому уравнения (11) и (12) нужно рассматривать как аппарат для интерполяции, а не для экстраполяции, и условия применения метода не могут быть шире условий, в которых связь получена. Действительно, трудно сказать, сохранятся ли связи неизменными для зон катагенеза, где углефикация РОВ превышает газовую стадию. Возможно также, что они несколько изменятся для пород, которым соответствует запись ПС на «линии глин». Границами применения нелинейных связей служат рамки карт тренда. Следует напомнить, что вероятностный характер найденных связей не позволяет чрезмерно полагаться на единичные определения гидрохимических показателей, надежнее выбирать средние из нескольких рассчитанных величин.

§ 2. Методы выделения водоносных пластов

Прежде чем использовать разработанные методы определения общей минерализации вод и содержания в них некоторых ионов, необходимо отделить водоносные пласты от продуктивных, насыщенных углеводородами. На основании опыта, накопленного в других нефтегазоносных областях [17, 114 и др.], для решения данной задачи применена одна из программ распознавания образов — линейный дискриминантный анализ.

Обучающая выборка была составлена по 69 продуктивным и 63 водоносным пластам из юрских и меловых отложений, вскрытых скважинами на 25 поисково-разведочных площадях севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба. Мощность пластов не менее 4 м; кроме 19 водоносных пластов, остальные испытаны. Неиспытанные пласты привлечены для того, чтобы пополнить выборку данными из зон катагенеза 1—2. Эти пласты приурочены к лишенным покрышек средним частям мощных алеврито-песчаных толщ и к непродуктивным интервалам разреза. Пласты обучающей выборки охарактеризованы семью признаками: рангом зоны катагенеза, амплитудой ПС, мВ, удельным электрическим сопротивлением пласта $\rho_п$, Ом·м, отношением АПС/$\rho_п$ и кажущимся сопротивлением по градиент-зондам размера 0,5 м — $\rho_к^{(0,5)}$, размера 1,05 м — $\rho_к^{(1,05)}$ и размера 2,25 м, Ом·м. Рассчитанное по данным выборки дискриминантное уравнение имеет вид:

$$+1{,}380\,N+0{,}011\,\text{АПС}-0{,}097\,\rho_п+0{,}131\,(\text{АПС}/\rho_п)-$$
$$-0{,}020\,\rho_к^{(0,5)}+0{,}025\,\rho_к^{(1,05)}-0{,}001\,\rho_к^{(2,25)}-1{,}856=0. \qquad (14)$$

Уравнение описывает в признаковом пространстве гиперплоскость, которая обеспечивает оптимальное разделение на классы. Подставляя в него геолого-геофизические данные по конкретным пластам, можно установить характер их насыщения: если рассчитанные значения больше нуля, то пласты водоносные, если меньше нуля — продуктивные. В обучающей выборке среди продуктивных пластов ошибки распознавания с помощью уравнения составили 20,3%, среди водоносных пластов 4,8%. Чтобы улучшить разделение пластов, в выборку дополнительно вводились признаки — глубина залегания и температура (число водоносных пластов было увеличено до 90). Однако результаты изменились незначительно, ошибки распознавания продуктивных и водоносных пластов равнялись соответственно 17,4 и 6,7%.

После неоднократных попыток улучшить разделяющие свойства дискриминантного уравнения наибольший успех был достигнут при исследовании выборки по 31 продуктивному и 32 водоносным пластам из тех же отложений и регионов, что и вышеупомянутые. Все пласты испытаны. Геолого-геофизические данные обучающей выборки помещены в табл. 17. В комплект исходных признаков входили ранги зон катагенеза, глубина залегания, температура, амплитуда ПС, удельное электрическое сопротивление пласта, кажущиеся сопротивления по градиент-зондам размера 0,5; 1,05; 2,25; 4,25; 8,5 м, удельное сопротивление промывочной жидкости ϱ_c и отношение диаметра зоны проникновения к диаметру скважины D/d_c. Единицы измерения встречавшихся ранее в работе показателей остались прежние, $\varrho_к^{(4,25)}$, $\varrho_к^{(8,5)}$ и ϱ_c в Ом·м, величина D/d_c безразмерная. По 12 перечисленным показателям составлено следующее уравнение:

$$+0{,}713\,N+0{,}008\,H-0{,}335\,t+0{,}008\,\text{АПС}-0{,}163\,\rho_п-$$
$$-0{,}087\,\rho_к^{(0,5)}+0{,}006\,\rho_к^{(1,05)}+0{,}050\,\rho_к^{(2,25)}-0{,}033\,\rho_к^{(4,25)}+0{,}034\,\rho_к^{(8,5)}+$$
$$+0{,}129\varrho_c+0{,}364\,\frac{D}{d_c}+4{,}573=0. \qquad (15)$$

Рассчитанные по этому уравнению значения для водоносных пластов больше нуля, для продуктивных — меньше нуля. В обучающей выборке ошибка распознавания продуктивных пластов составила 3,2%, водоносных пластов — 3,1%. Проверка уравнения на 30 заведомо водоносных пластах дала безошибочный результат. Конечно, эффективность уравнения достигнута не только за счет достаточной полноты набора признаков. Дело и в том, что столь полным набором охарактеризованы наиболее мощные и однородные пласты, для которых с электрокаротажных диаграмм можно снять показания, не искаженные экранированием.

Отдельно оценивалась вероятность ошибки при выделении водоносных пластов в продуктивной части разреза. Объектом исследования послужила суходудинская свита (K_1v_2 — h) Енисей-Хатанг-

Таблица 17

Геолого-геофизические данные обучающей выборки по продуктивным и водоносным пластам юрских и меловых отложений севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба

Скважины	H, м	Возрастные индексы	h, м	t, °С	N	АПС, мВ	$\rho_к^{(0,5)}$, Ом · м	$\rho_к^{(1,05)}$, Ом · м	$\rho_к^{(2,25)}$, Ом · м	$\rho_к^{(4,25)}$, Ом · м	$\rho_к^{(8,5)}$, Ом · м	$\rho_с$, Ом · м	$D/d_с$	$\rho_п$, Ом · м
Продуктивные пласты, насыщенные газом и газоконденсатом														
Юрхаровская-100	2790	K_1h — b	12,0	65	3	80,0	45	100	112	100	75	2,8	4	84,0
Среднеямальская-1	2000	K_1b	11,0	62	2,5	63,0	47	60	37	23	25	5,0	2	23,0
Бованенковская-53	1170	K_1al	11,6	34	1	16,0	12	16	14	13	10	4,2	0,1	14,0
»	1350	K_1ap	9,8	42	1	46,0	25	65	100	110	50	4,2	2	90,0
Бованенковская-52	1470	K_1ap	4,0	42	1,5	40,0	26	37	34	25	30	3,2	0,1	26,0
Арктическая-4	2340	I_3 — K_1br — —h	5,0	73	3	37,0	45	50	35	20	20	2,8	2	20,0
»	1990	K_1b — ap	6,0	65	2,5	27,0	30	30	17	19	18	2,8	2	15,0
»	2010		61,2	65	2,5	44,0	27,5	30	17,5	17,5	17,5	5,0	8	17,5
Уренгойская-58	2995	K_1br — v	5,2	84	3	50,0	47	92	100	45	47	3,5	2	50,0
Уренгойская-70	2680	K_1v	7,2	71	2,5	55,0	67	130	125	125	32	3,8	8	35,0
»	3030	K_1br — v	7,6	84	3	45,0	40	87	62	35	26	2,8	2	30,0
Уренгойская-33	2730	K_1v	13,8	84	2,5	61,0	45	70	75	45	37	4,2	4	45,0
Ямбургская-1	2910	K_1v — h	9,2	79	3	20,0	35	75	88	90	75	2,5	0,1	75,0
»	2900		9,2	79	3	15,0	37	97	138	143	87	2,5	0,1	85,0
Ямбургская-24	2580		6,0	68	3	42,0	30	60	90	125	125	2,1	8	80,0
Пеляткинская-2	2410	K_1v_2 — h	11,0	62	2,5	48,0	87	140	120	95	65	5,0	1	95,0
»	2500		10,0	65	3	42,5	80	120	87	55	40	5,0	8	50,0
Пеляткинская-3	2580		6,8	68	3	38,0	47	160	135	90	50	5,0	2	75,0
Пеляткинская-5	2620		13,2	69	3	35,0	40	125	200	220	150	1,7	2	110,0
Соленинская-3	2300		9,6	57	3	37,0	35	115	140	120	105	12,0	2	110,0
»	2310		6,8	57	3	40,0	34	100	120	125	115	12,0	2	110,0
»	2360		20,0	59	3	47,0	37	125	102	70	70	12,0	2	70,0
Соленинская-10	2320		8,8	57	3	32,0	62	120	120	100	55	5,0	1	85,0
Соленинская-13	1480	K_1ap — al_{1-2}	14,0	31	1,5	35,0	65	60	31	31	37	4,0	2	30,0
»	2170	K_1v_2 — h	16,4	51	2,5	45,0	75	158	175	150	135	4,0	2	120,0
»	2190		6,8	51	3	40,0	85	175	185	160	145	4,0	2	120,0
»	2370		9,6	59	3	50,0	55	110	160	90	82	4,0	2	80,0
Соленинская-14	2490		8,0	63	3	45,0	60	110	80	50	30	3,0	4	48,0
Соленинская-15	2180		18,0	52	2,5	45,0	90	175	150	115	100	2,5	8	100,0
»	2350		11,2	59	3	30,0	80	150	77	55	50	1,7	2	50,0
»	2390		10,0	60	3	30,0	75	125	100	60	50	1,7	8	50,0
Пласты, насыщенные водой														
Казанцевская-1	2460	K_1v_2 — h	11,0	60	3	57,5	67	100	105	55	37	2,9	8	40,0
Казанцевская-2	680	K_2t	10,0	8	1	22,5	42	40	34	50	57	14,0	0,1	38,0
Казанцевская-6	2320	K_1v_2 — h	6,0	56	2,5	63,8	75	150	90	26	10	3,8	8	10,0
»	2650	K_1v_2 — h	6,8	66	3	33,8	45	75	50	28	24	3,4	4	25,0
Озерная-2	2280		9,6	50	2	50,0	34	47	18	8	9,5	2,7	2	10,0
»	2370		15,6	52	3	46,3	75	175	90	18	14	8,0	8	15,0
»	2450		4,4	55	3	38,7	80	250	135	40	36	8,0	4	34,0
Озерная-4	2220		9,2	48	3	75,0	95	190	125	35	11	4,0	8	20,0
Озерная-5	2250		9,2	49	3	75,0	100	170	115	50	30	6,0	4	30,0
Озерная-8	3510	I_3ox — Km_1^1	14,4	85	4	20,0	19	22	14	11	8	2,0	8	8,5
Озерная-9	1320	K_1ap_2 — l_{1-2}	17,4	20	1,5	25,0	42	50	25	22	22	4,8	2	25,0
Пеляткинская-5	2390	K_1v_2 — h	13,2	60	2,5	52,5	31	70	58	28	25	5,0	4	25,0
»	2440		6,2	61	3	43,7	33	85	85	38	29	5,0	8	30,0
Пеляткинская-14	800	K_2t_1	14,0	9	1	35,0	45	65	35	13	11	2,0	4	10,0
Соленинская-5	2380	K_1v_2 — h	12,0	59	3	25,0	50	100	65	35	40	3,2	2	38,0
Соленинская-18	1510	K_1ap	10,8	30	2	75,0	60	80	25	4	4	3,0	8	3,0
Зимняя-5	1860	I_2bt	13,0	48	3	31,0	50	70	45	25	19	2,5	4	16,0
Среднепясинская-1	1000	K_1al_3 — K_2cm	14,2	11	1	55,0	42	45	70	40	26	2,0	4	30,0
»	1500	K_1ap	15,2	22	1,5	50,0	24	30	12	12	10	1,8	2	12,0
Тундровая-1	1280	$I_1p_2^2$ — tr	13,6	26	2,5	40,0	45	65	30	25	18	4,6	4	20,0
»	1460		10,0	31	3	45,0	55	85	45	35	22	4,6	4	20,0
Геофизическая-44	2560	K_1h	4,8	69	3	60,0	47	80	60	22	19	4,4	16	18,0
Песцовая-4	2870		5,6	80	2,5	58,0	30	50	32	13	9,5	2,0	8	10,0
Юбилейная-13	1830	K_1ap — al	14,8	53	1,5	65,0	40	40	9	3,5	4	7,0	4	3,8
»	2350		8,4	67	2	65,0	37	78	53	11,5	11	2,5	4	13,0
Губкинская-48	2740	K_1v	20,0	87	2,5	25,0	14	37	25	15	12	5,3	16	12,0
Медвежья-31	2420	K_1h	3,6	70	2	51,0	28	50	35	11	10	1,3	2	2,9
Тамбейская-1	2490	K_1h_2 — ap	6,8	69	2,5	32,0	14	26	23	14	8	1,5	16	9,0
Тамбейская-2	2710		4,2	74	3	39,0	36	65	50	30	18	2,6	16	19,0
Арктическая-21	2020	K_1b — ap	16,0	65	2,5	22,0	37	55	32	14	13,5	3,4	16	11,0
Русская-8	1000	K_2cm	19,1	20	1	60,0	6,5	5	4,3	3,8	4	1,4	2	4,1
Нурминская-7	2240	**K_1h — b**	11,6	72	3	40,0	26	38	20	14,5	15	2,3	2	15,0

ского прогиба. В обучающую выборку было включено 39 испытанных на приток пластов по Казанцевской, Озерной, Соленинской, Пеляткинской, Паютской и Сузунской разведочным площадям в интервале глубин от 2110 до 2660 м. 19 продуктивных и 20 водоносных пластов описаны семью признаками. Поскольку в данной выборке диапазон изменения рангов зон катагенеза оказался слишком малым, использовалась более дробная шкала глубины залегания. Рассчитанное дискриминантное уравнение имеет вид

$$-0{,}002\,H+0{,}004\,\text{АПС}-0{,}169\,\rho_{\text{п}}+0{,}418\,(\text{АПС}/\rho_{\text{п}})-0{,}155\,\rho_{\text{к}}^{(0,5)}+$$

$$+0{,}042\,\rho_{\text{к}}^{(1,05)}+0{,}010\,\rho_{\text{к}}^{(2,25)}+16{,}072=0. \qquad (16)$$

Для водоносных пластов итог вычисления больше нуля, для продуктивных — меньше. В обучающей выборке ошибка распознавания продуктивных пластов составила 10,5, водоносных пластов — 10%. В экзаменационную выборку вошли 65 за редким исключением неиспытанных пластов. Неиспытанные продуктивные объекты отбирались выше ГВК залежей, водоносные — ниже ГВК и в непродуктивных частях разреза. Ошибка распознавания в группе из 11 продуктивных пластов равна 18%, в группе из 54 водоносных — 5,6%.

Опыт отделения водоносных коллекторов от продуктивных в экзаменационных выборках показал, что наиболее информативным признаком в уравнениях (14)—(16) является, как и следовало ожидать, удельное сопротивление пород. Роль комплексирования признаков становится заметной только в случаях неоднозначной интерпретации характера насыщения по $\rho_{\text{п}}$. Обращает на себя внимание то, что часто ошибки в опознании водоносных пластов относятся к участкам разреза, расположенным непосредственно под ГВК залежей. Вероятно, здесь за продуктивные принимаются коллекторы с высокой газонасыщенностью подземных вод.

При практическом использовании дискриминантных уравнений предпочтение отдавалось самому точному (15). Отсутствие по многим пластам полного набора необходимых промыслово-геофизических признаков, чаще всего кажущегося сопротивления по 8-метровому градиент-зонду, вынуждало обращаться к уравнению (14). Уравнение (16) имело вспомогательное значение и изредка использовалось для контроля.

Приведенные уравнения способны частично формализовать и тем самым упростить и сделать более объективным труд интерпретаторов промыслово-геофизических данных в рассматриваемых регионах. Однако заменить ручную обработку уравнения не могут, потому что используют ее результаты — удельное сопротивление пластов и глубину проникновения фильтрата промывочной жидкости. Исключение этих показателей из уравнений резко снижает точность распознавания. Так, при их отсутствии в уравнении (15) средняя ошибка распознавания продуктивных и водоносных пластов в обучающей выборке возросла с 3,1 до 14,3%.

§ 3. Методы определения пористости водонасыщенных коллекторов и содержания в них алеврито-глинистого материала

На севере Западно-Сибирской плиты и в Енисей-Хатангском прогибе лишь несколько процентов от всей проходки по юрским и меловым отложениям охарактеризовано керном, к тому же каменный материал отобран неравномерно по разрезу, главным образом из продуктивных свит. Поэтому возникла необходимость оценки коллекторских свойств пород по промыслово-геофизическим данным.

Наибольший успех в конкретных условиях регионов принесло изучение возможности определения открытой пористости по параметру пористости. Разрабатывались два варианта метода: в первом устанавливалась связь обоих физических показателей, измеренных в лаборатории на образцах керна, во втором — связь пористости, измеренной в лаборатории, с параметром пористости, вычисленным по промыслово-геофизическим данным.

Для первого варианта была подобрана коллекция из 36 образцов алеврито-песчаных пород юрского и мелового возраста с различных площадей и глубин (табл. 18). В образцах определялись открытая пористость $K_п$ и параметр пористости $P_п$ при атмосферных условиях и те же показатели при температурах t и давлениях $P_{эф}$, близких к пластовым — $K_{п(p,\,t)}$ и $P_{п(p,\,t)}$ (минерализация насыщающего раствора NaCl 111 г/л). Определение физических свойств пород в условиях, близких к пластовым, выполнялось на аппаратуре и по методике, разработанным в лаборатории моделирования пластовых условий НИИГА [75]. По лабораторным данным были рассчитаны вначале два уравнения регрессии и построены графики связи пористости с параметром пористости: без учета термобарических условий недр (рис. 7, *а*) и с учетом их (рис. 7, *в*). Коэффициенты парной корреляции равны соответственно —0,731 и —0,859, связи значимы.

Сравнивая графики обеих связей, нетрудно заметить, что существующие в естественном залегании давления и температуры оказывают влияние на искомую связь. Чтобы получить представление о масштабе этого влияния на физические свойства пород, вычислялись относительное уменьшение пористости $\Delta K_п/K_п = (K_п - K_{п(p,\,t)})/K_п$, %, и относительное увеличение параметра пористости $\Delta P_п/P_п = (P_{п(p,\,t)} - P_п)/P_п$, %. Результаты лабораторных работ, приведенные в табл. 18 и полученные дополнительно по 51 образцу [13], показали, что у алеврито-песчаных пород Енисей-Хатангского прогиба с проницаемостью не менее 0,0001 мкм² $\Delta K_п/K_п$ колеблется от 0,4 до 13%. Наиболее часто встречающиеся значения попадают в интервал 5—7%, более половины всех значений расположены в интервале 5—8%. Такое уменьшение пористости в большинстве случаев соизмеримо с ошибкой определения емкости коллекторов существующими лабораторными методами и обычно не учитывается даже при подсчете запасов углеводородов на месторождениях.

Таблица 18

Определения коллекторских свойств пород, выполненные в атмосферных условиях и в условиях, приближенных к пластовым (данные лаборатории моделирования пластовых условий, НИИГА)

Номер образца	Скважины	Интервалы отбора керна, м	Возрастные индексы	Открытая пористость, %		$\Delta K_п = K_п(атм) - K_п(p,t)$	$\Delta K_п / K_п$ 100%	Проницаемость в атмосферных условиях $K_{пр}$, мкм²	Параметр пористости		$\Delta P_п = P_п(p,t) - P_п(атм)$	$(\Delta P_п / P_п)$ 100%	Порода
				в атмосферных условиях $K_п$ (атм)	в условиях, приближенных к пластовым, $K_п(p,t)$				в атмосферных условиях $P_п$ (атм)	в условиях, приближенных к пластовым, $P_п(p,t)$			
45	Зимняя-1	2600—2610	$I_1p_2^2$ — tr	8,2	7,7	0,5	6,4	0,0001	28,4	125,3	96,9	341,0	Песчаник мелкозернистый
65	Семеновская-2	2159,9—2169,7		8,5	8,1	0,4	4,9	0,0003	30,7	85,0	54,3	176,0	То же
66	»	2262—2269		7,24	6,84	0,4	5,8	0,0001	35,6	142,7	107,1	300,0	»
129	Нижнехетская-1	1751,1—1756,4		14,5	14,16	0,34	2,4	0,0053	25,5	48,4	22,9	89,0	»
130	»	1756,4—1761,4		14,8	14,4	0,4	2,8	0,0056	22,6	43,4	20,8	92,0	Песчаник мелко-среднезернистый
572	Зимняя-3	1911,6—1914,6	I_2bt	16,5	14,8	1,7	11,4	0,0319	13,4	36,2	22,8	170,0	Песчаник мелкозернистый
575	»	1914,6—1918,7		15,4	14,4	1,0	0,69	0,0426	22,8	57,5	34,7	152,0	То же
577	»	1918,7—1922,9		16,3	15,05	1,25	8,3	0,0371	13,04	30,0	16,96	130,0	Алевролит
718	Нижнехетская-1	1080,4—1089,1		22,0	21,18	0,82	3,9	0,1777	15,3	26,1	10,8	70,0	Песчаник мелкозернистый
719	»	1573,5—1578,5	$I_1p_2^2$ — tr	17,0	16,84	0,16	0,95	0,0313	21,2	34,8	13,6	64,0	Песчаник среднемелкозернистый
733	Малохетская-15	506,6—514,3	K_1v_1	22,3	21,16	1,14	5,3	0,0001	18,4	18,4	0	0	Алевролит глинистый
740	»	514,3—523,1		21,4	21,32	0,08	0,37	0,0003	14,6	16,1	1,5	10,0	Алевролит
921	Суходудинская-2	1329,9—1336,9	I_2bt	25,7	23,0	2,7	11,7	0,5753	16,9	27,0	10,1	59,0	Песчаник мелкозернистый
922	»	1329,9—1336,9		24,8	22,5	2,3	10,2	0,2248	11,5	21,9	10,4	90,0	То же
1052	Зимняя-6	1758,9—1764	K_1v_1	14,8	14,3	0,5	3,5	0,0087	33,9	79,7	45,8	135,0	Песчаник среднезернистый
1056	»	1775—1780		14,8	14,67	0 13	0,88	0,0016	29,7	54,7	25,0	84,0	Алевролит
1057	»	1775—1780		12,3	11,82	0,48	4,1	0,0001	20,2	44,4	24,2	119,0	»
1061	»	1852—1859	I_3cl	10,1	9,7	0,4	4,1	0,0002	29,8	83,5	53,7	180,0	Алевролит глинистый
1074	Тампейская-1	1989,1—1998	I_2bt	15,7	14,8	0,9	6,1	0,0281	10,8	24,9	14,1	130,0	Песчаник среднезернистый
1077	»	1998—2003		15,8	15,71	0,09	0,57	0,0419	23,6	74,2	50,6	214,0	Песчаник среднемелкозернистый
1089	»	2025,5—2030,3		17,1	16,56	0,54	3,3	0,0131	18,1	50,4	32,3	178,0	Песчаник мелкозернистый
1121	Мессояхская-5	811,9—818,7	K_2cm	9,7	9,0	0,7	7,7	0,0046	46,7	56,0	9,3	19,9	Песчаник среднемелкозернистый
1235	Мессояхская-109	823,4—830,4		24,1	21,99	2,11	9,5	0,2692	18,6	26,0	7,4	39,7	То же
1256	»	870,4—876,7		19,1	17,83	1,27	7,1	0,0571	27,6	34,2	6,6	23,9	Песчаник мелкозернистый
1266	»	870,4—876,7		12,6	12,3	0,3	2,4	0,0097	81,7	104,0	22,2	27,0	Песчаник среднезернистый
1275	Мессояхская-145	811—817		9,8	9,57	0,23	2,4	0,0033	86,9	113,0	26,1	30,0	Алевролит
1365	Казанцевская-4	2367,3—2371,1	K_1v_2 — h	17,8	16,42	1,38	8,4	0,0400	16,9	40,6	23,7	140,0	Песчаник мелкозернистый
1376	»	2522,1—2537,7		6,2	6,05	0,15	2,4	0,0001	100,7	294,2	193,5	192,0	Песчаник среднезернистый

Продолжение табл. 18

Номер образца	Скважины	Интервалы отбора керна, м	Возрастные индексы	Открытая пористость, %		$\Delta K_п = K_п(атм) - K_п(p,t)$	$\Delta K_п/K_п$ 100%	Проницаемость в атмосферных условиях $K_{пр}$, мкм²	Параметр пористости		$\Delta P_п = P_п(p,t) - P_п(атм)$	$(\Delta P_п/P_п)$ 100%	Порода
				в атмосферных условиях $K_п$ (атм)	в условиях, приближенных к пластовым, $K_п(p,t)$				в атмосферных условиях $P_п$ (атм)	в условиях, приближенных к пластовым, $P_п(p,t)$			
1407	Казанцевская-4	2552,3—2565,7		8,1	7,96	0,14	1,5	0,0001	73,3	249,4	176,1	240,0	Алевролит глинистый
1454	Казанцевская-5	2419,8—2434,6		13,0	12,44	0,56	4,5	0,0071	40,7	98,8	58,1	143,0	Песчаник среднезернистый
1467	»	2434,6—2448,6		15,0	14,1	0,9	6,4	0,0326	41,8	76,5	34,7	83,0	То же
1560	Озерная-2	2406,2—2410,6	$K_1b - ap_1$	11,4	10,2	1,2	11,7	0,0011	117,9	224,9	106,1	90,0	Алевролит
1611	Соленинская-3	2262,8—2267,4	$K_1v_2 - h$	8,1	7,5	0,6	8,0	0,0147	40,9	53,2	12,3	30,0	Песчаник мелкозернистый
1630	Казанцевская-4	1905,3—1910,8	$K_1b - ap_1$	19,8	18,6	1,2	6,4	0,0561	19,5	29,3	9,8	50,0	То же
1695	»	1920,8—1926		21,6	21,1	0,5	2,4	0,0561	21,7	26,1	4,4	20,0	Песчаник среднезернистый
1854	Мессояхская-138	813,2—821,8	K_2cm	31,2	29,1	2,1	7,2	0,6873	9,8	9,8	0	0	Алевролит

В то же время разница между значениями параметра пористости в атмосферных условиях и в условиях, приближенных к пластовым, существенна. У двух третей имеющихся значений $\Delta P_п/P_п$ находится в интервале 0—50%, почти у всех остальных — в интервале 50—200%, наибольшая разница — 341%.

В Западной Сибири при моделировании термобарических условий недр в лабораториях СНИИГГИМС и МИНХ и ГП для пород, аналогичных рассматриваемым, были получены похожие результаты [69]. Относительное уменьшение пористости колеблется там в основном от 2 до 9%. Относительное увеличение параметра пористости несколько меньше, чем в Енисей-Хатангском прогибе, но тем не менее часто превышает 90%, и пренебречь столь большим изменением нельзя. Поэтому было рассчитано уравнение, учитывающее термобарическое влияние недр только на параметр пористости:

$$\lg K_п = -0{,}436 \lg P_{п\,(p,\,t)} + 1{,}910. \qquad (17)$$

Коэффициент парной корреляции $r = -0{,}859$, связь значима. Построенный по уравнению график показан на рис. 7, *б*.

В настоящее время по поисково-разведочным скважинам рассматриваемых регионов накоплено достаточно сведений для разработки второго варианта метода, т. е. для установления связи пористости, определенной в лаборатории при атмосферных условиях, с параметром пористости, вычисленным по промыслово-геофизическим данным $P_{п(скв)} = \varrho_{ВП}/\varrho_В$.

Для установления искомой связи были отобраны участки разреза, где залегают мощные литологически однородные (за исключением редких плотных пропластков) алеврито-песчаные коллекторы с преимущественно глинистым цементом. Степень однородности выяснялась по совокупности промыслово-геофизических данных, результатам гранулометрического анализа и по шлифам из пород керна. Отбирались пласты, охарактеризованные комплексом БКЗ и определениями открытой пористости.

Снижающийся в рыхлых породах и повышающийся в плотных выход керна в среднем составил 54%. На 1 м поднятого керна приходится от 0,9 до 16,5 значений пористости. Достоверность и представительность используемых значений несколько увеличивается за счет того, что почти каждое из них является в свою очередь средним арифметическим из определений пористости 2—3 образцов, находившихся в керне на расстоянии 1—10 см один от другого. Для 18 из отобранных пластов общая минерализация насыщающих вод определена в пробах, полученных при испытании скважин, остальные значения M рассчитаны по уравнению (11). Пластовые температуры сняты с графиков, построенных по записям термокаротажа и точечным измерениям. Всего удалось отобрать 58 пластов, основные геолого-геофизические данные по ним сведены в табл. 19.

Пласты вскрыты скважинами на 19 площадях рассматриваемых регионов на глубинах 863—3062 м в стратиграфическом диапазоне от батского яруса юрской системы до сеноманского яруса меловой. Интервал изменения рангов зон катагенеза 1—3,5. Пласты, судя по описанию шлифов и результатам гранулометрического ситового анализа, сложены алеврито-песчаными породами с вещественным составом, присущим коллекторам всего юрско-мелового разреза.

Отсортированность средняя, около 1,7—2,2, редко выше; медианный диаметр зерен обычно меньше 0,25 мм. Содержание цемента изменяется от 5 до 40, наиболее частое 8—15%. В составе цемента глинистый материал преобладает над карбонатным, достигая, как правило, 80—100%. Средние арифметические значения пористости по пластам изменяются в пределах 12,5—38,1%. При подсчете средних значений исключались редкие определения, которые отно-

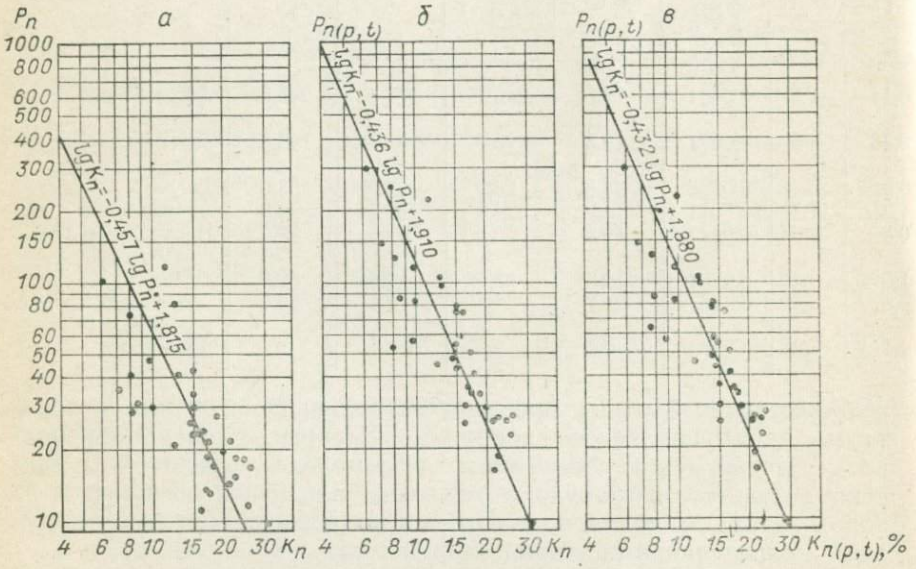


Рис. 7. График связи открытой пористости с параметром пористости по лабораторным данным при различных термобарических условиях.

сятся к маломощным линзам плотных карбонатизированных пород, не искажающих среднепластовые геофизические характеристики.

По содержащимся в табл. 19 данным рассчитано уравнение регрессии

$$\lg K_п = -0{,}485 \lg P_{п\,(скв)} + 1{,}962. \qquad (18)$$

Установленная для 58 пластов при коэффициенте парной корреляции —0,922 связь значима. Стандартное отклонение равно 1,12 абс. % пористости. График, построенный по уравнению, изображен на рис. 8.

Сравнивая уравнение (18) с однотипным ранее полученным (17), можно убедиться в их сходстве. Сходство доказывает, что, с одной стороны, в лаборатории при определении $P_{п(p,\,t)}$ удается создать условия, близкие к пластовым, а с другой, — что связь по данным моделирования как бы «подстраховывает» связь, полученную по промыслово-геофизическим данным, придает ей бóльшую убедительность.

Оба направления исследований — моделирование пластовых условий и использование промыслово-геофизических данных — привели к почти одинаковым результатам, и трудно сказать, какой из них точнее отражает природное явление. При выборе связи для применения в качестве метода предпочтение отдается той, что получена с привлечением промыслово-геофизических данных, потому что в ней заложены близкие к подлинным минерализации пластовых вод, не точечные, а среднепластовые значения и материалы интерпретации БКЗ, т. е. сведения, по которым затем на практике должны рассчитываться значения пористости. Точность метода в таком случае определяется только теснотой самой связи.

Поскольку уравнение (18) и соответствующий график на рис. 8 базируются на сведениях, представительных для обширных регионов, с помощью метода рекомендуется решать в первую очередь региональные задачи. Чтобы определять пористость по отдельным пластам, желательно разрабатывать аналогичные методы на локальном материале. Если необходимых данных по пласту не хватает для установления значимой связи, то целесообразно разрабатывать вариант метода, основанный на моделировании пластовых условий. Именно так поступают петрофизики СНИИГГИМС, составляя уравнения вида $K_{п(p,\ t)}=f(P_{п(p,\ t)})$ по основным продуктивным горизонтам центральной части Западно-Сибирской низменности [69]. Многие уравнения по своим коэффициентам близки рассчитанному нами аналогичным образом. Сравните, например, уравнение по пласту $БВ_8$ нижнемеловых отложений центральной части Западно-Сибирской низменности $\lg K_{п(p,\ t)}=-0{,}403 \lg P_{п(p,\ t)}+1{,}849$ с уравнением на рис. 7, *в*.

В настоящее время при подсчете запасов углеводородов на месторождениях рассматриваемых регионов используется связь пористости и параметра пористости, измеренных в лаборатории на образцах в атмосферных условиях. Как уже упоминалось ранее, термобарические условия недр незначительно уменьшают пористость и существенно увеличивают параметр пористости. Поэтому определение емкости коллекторов на месторождениях по уравнениям вида $K_п=f(P_п)$ дает значения ниже истинных на несколько абсолютных процентов.

Заслуживает упоминания одна из попыток связать пористость непосредственно с геолого-геофизическими показателями, минуя стадию определения минерализации воды. По 51 пласту в юрских и меловых отложениях рассматриваемых регионов было рассчитано уравнение:

$$K_п=-3{,}126\,N-0{,}028\,АПС-5{,}950 \lg \rho_{вп}+35{,}352. \qquad (19)$$

Коэффициент множественной корреляции весьма высок, он достиг значения 0,992. Однако стандартное отклонение (2,49) оказалось больше, чем для уравнения (18). По-видимому, делением $\rho_{вп}$ на $\rho_в$ в уравнении (18) удается в какой-то мере нейтрализовать влияние электролита в системе порода—вода, а в уравнении (19) влияние минерализации создает дополнительные «шумы».

Таблица 19

Сопоставление среднепластовой открытой пористости, определенной в керне, и параметра пористости, вычисленного по промыслово-геофизическим данным, в юрских и меловых отложениях севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба

Скважины	Интервалы отбора керна, м	Возрастные индексы	Среднепластовая пористость, %	Удельное сопротивление водоносных пластов, Ом · м	Общая минерализация вод, г/л	Температура пластов, °С	Удельное сопротивление пластовых вод, Ом · м	Параметр пористости
Зимняя-1	1639—1649	K_1v_2 — h	20,4	20,0	5,7	40	0,72	27,8
Зимняя-3	1912—1923	I_2bt	17,3	15,0	6,9	50	0,51	29,4
Зимняя-5	1851—1864		18,2	15,0	6,5	48	0,55	27,3
Зимняя-6	1775—1780	K_1v_1	14,8	25,0	4,2	46	0,88	28,4
Майская-1	1502—1507	K_1b — ap_1	23,2	5,5	12,0	35	0,40	13,7
»	1751—1757		24,7	7,0	10,6	45	0,37	18,9
»	1848—1855	K_1v_2 — h	22,5	7,5	10,3	48	0,37	20,3
Тампейская-1	2007—2030	I_2bt	17,7	11,0	7,9	53	0,43	25,6
»	1990—2002		15,7	16,0	6,5	53	0,53	30,2
Нижнехетская-1	958—969	I_3ox — km	25,7	13,5	7,2	20	0,85	15,9
Джангодская-1	1040—1063	K_1b — ap_1	31,0	8,0	8,8	15	0,82	9,8
Джангодская-2	863—873		28,3	12,0	8,0	10	1,00	12,0
Джангодская-5	927—948		30,1	11,5	7,7	12	1,00	11,5
Казанцевская-4	1900—1905,8		21,5	11,0	8,9	40	0,47	23,4
»	1915,8—1926		22,8	7,0	10,8	40	0,40	17,5
»	2522,1—2557,5	K_1v_2 — h	16,0	21,0	5,7	60	0,52	40,4
Казанцевская-5	2442—2448,6		15,7	21,0	5,9	61	0,51	41,2
Казанцевская-6	2323,2—2331,2		16,0	10,0	6,7	56	0,48	20,8
»	2451—2471		15,1	18,0	5,7	59	0,55	32,7
»	2650—2654,8		16,9	25,0	2,5	66	1,10	22,7
Пеляткинская-3	2509,1—2516,9		18,8	28,0	3,1	65	0,90	31,1
Пеляткинская-5	2437,6—2448,8		14,1	30,0	4,6	61	0,64	46,9
»	2522,7—2529,1		15,0	42,0	2,3	65	1,20	35,0
Пеляткинская-9	2548—2556		17,0	35,0	3,5	65	0,80	43,7
Соленинская-2	2410—2420		16,0	23,0	4,9	60	0,61	37,7
»	2453—2458		17,2	18,0	5,8	62	0,51	35,3
Соленинская-5	2378—2390		16,7	38,0	3,0	59	1,00	38,0
Соленинская-10	2330—2336		15,6	25,0	4,2	57	0,75	33,3
»	2420—2424		18,0	34,0	3,0	60	0,98	34,7
Соленинская-14	2410,4—2420,9		15,8	30,0	3,8	59	0,79	38,0
Соленинская-17	2425,5—2428		16,1	27,0	3,8	60	0,78	34,6
»	2532,5—2537		16,5	20,0	5,3	65	0,54	37,0
Соленинская-18	2488,5—2499,4	K_1v_2 — h	15,8	15,0	3,9	62	0,72	20,8
Соленинская-19	2354—2366		14,5	24,0	4,1	57	0,76	31,6
»	2425—2435		15,9	25,0	2,7	60	1,10	22,7
Озерная-2	2281—2287		20,3	10,0	7,0	50	0,50	20,0
»	2365,8—2370,8		17,6	15,0	8,0	52	0,44	34,1
Озерная-3	2345—2354		17,4	23,0	6,3	52	0,55	41,8
Сузунская-1	2415—2422		23,5	8,5	9,1	53	0,39	21,8
»	2488—2492,8		21,4	9,5	8,7	56	0,39	24,4
Харасовэйская-4	1530,8—1547,9	K_1ap	27,3	4,2	11,8	51	0,32	13,1
Харасовэйская-5	1549—1558		24,6	5,3	10,8	52	0,33	16,0
Южнотамбейская-1	2102—2105		19,2	9,0	7,9	55	0,42	21,4
Арктическая-2	1921,5—1936,4	K_1b	19,6	6,3	12,4	62	0,26	24,2
Среднеямальская-1	1990—1995,8		20,5	20,0	2,1	63	1,30	15,4
Юрхаровская-100	2715—2725	K_1v — h	17,4	15,0	6,9	63	0,43	34,9
Находкинская-42	2777—2786	K_1h	10,5	57,0	3,3	70,5	0,77	74,0
Ямбургская-2	1190—1208	K_2cm	32,6	4,0	13,3	29	0,41	9,8
Ямбургская-4	1187—1195,7		34,5	5,0	12,4	29	0,44	11,3
Ямбургская-21	1170—1177		33,1	3,0	13,9	28	0,40	7,5
Заполярная-1	2814—2822	K_1v	13,6	55,0	3,5	75	0,72	76,4
Заполярная-20	1358—1369,3	K_2cm	32,1	4,0	12,4	32	0,41	9,7
Заполярная-36	2897—2916,1	K_1v	12,5	50,0	1,9	76	1,25	40,0
»	3050—3062		15,4	50,0	2,1	81	1,10	45,4
Уренгойская-10	1261,4—1265,4	K_2cm	38,1	2,0	15,3	33	0,33	6,1
Уренгойская-18	1253,8—1264,4		37,5	3,0	14,04	32	0,37	8,1
Уренгойская-46	2922—2937	K_1v	16,4	12,0	7,1	80	0,35	34,3
Уренгойская-69	2807—2815		18,1	11,0	7,7	78	0,33	33,3

Сравнение уравнений (11) и (19), содержащих в правой части одинаковые показатели, обнаруживает многократную разницу коэффициентов при N. Увеличение коэффициента в последнем уравнении подтверждает высказанное ранее положение о том, что межстадиальный катагенез сильнее влияет на пористость, чем на общую минерализацию. Значения коэффициентов у остальных показателей в обоих уравнениях различаются мало.

Переменные в правой части уравнений (11) и (19) нельзя назвать полностью независимыми. Как было показано в предыдущей главе, катагенетические преобразования пород отражаются на амплитуде ПС и удельном сопротивлении. Очевидно, часть информации о межстадиальном катагенезе в упомянутых, а также в дискриминантных уравнениях несут промыслово-геофизические данные, поэтому коэффициенты у признака N относительно невелики. Сравнивая уравнения вида $K_п = f(N, АГ)$ и $K_п = f(N, АПС, \rho_{вп})$, $M = f(N, АГ)$ и $M = f(N, АПС, \rho_{вп})$, нетрудно заметить, что по той же причине в уравнениях, содержащих промыслово-геофизические данные, коэффициенты при N ниже.

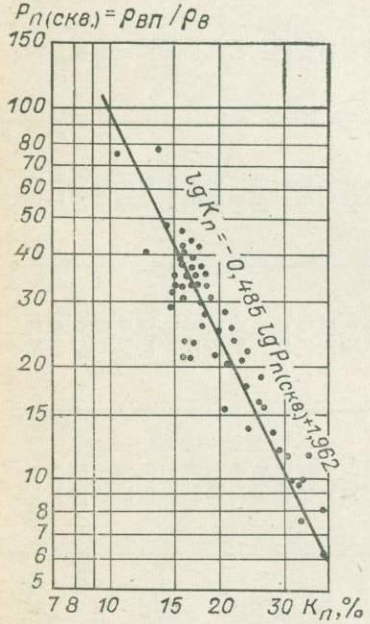


Рис. 8. График связи открытой пористости $K_п$ с параметром пористости $P_{п\ (скв.)}$ в неизмененной части водоносного коллектора.

Поскольку включенные в уравнения промыслово-геофизические показатели содержат информацию и о гранулометрическом составе пород, была предпринята попытка извлечь ее и оценить количественно. Факторный анализ геологических и промыслово-геофизических данных по 36 пластам водоносных коллекторов из юрских и меловых отложений севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба (гл. 1, § 3) показал, что на амплитуду ПС и удельное сопротивление пород больше других признаков гранулометрического состава влияет содержание алеврито-глинистого материала. К тому же среди связей вещественного состава и физических свойств пород со структурными признаками связь с содержанием алеврито-глинистого материала — одна из самых сильных и устойчивых в исследованных отложениях. По перечисленным соображениям предпочтение было отдано установлению зависимости промыслово-геофизических данных именно от содержания алеврито-глинистого материала. Исходные сведения для расчета уравнения взяты из выборки, охарактеризованной в гл. 1, § 3. Кроме амплитуды ПС и удельного сопротивления водоносного пласта в правую часть уравнения был введен и пока-

затель N, чтобы полнее учесть влияние межстадиального катагенеза на промыслово-геофизические данные. В результате математической обработки исходных значений по 36 пластам было получено следующее уравнение:

$$АГ = -1{,}993\,N - 0{,}262\,АПС + 0{,}206\,\rho_{вп} + 54{,}177. \qquad (20)$$

Коэффициент множественной корреляции 0,928, стандартное отклонение 15,35 вес.%.

Судя по значению коэффициента множественной корреляции, информативность промыслово-геофизических данных в отношении содержания алеврито-глинистого материала довольно высока. Большая величина стандартного отклонения обусловлена в первую очередь трудностью осреднения гранулометрического состава по разрезу пластов в исходной выборке. При установлении связи промыслово-геофизических показателей с минерализацией подземных вод сопоставляются интегрированные по пласту величины. При установлении подобных связей с характеристиками пород определение представительных для пласта величин требует осреднений результатов изучения керна. Подбор пластов или частей пластов, в разрезе которых пористость колеблется в небольших пределах и осреднение оправданно, дело достаточно сложное. Гранулометрический состав изменяется гораздо контрастнее, чем пористость (связь между ними явно нелинейная), и подобрать участки разреза, более или менее однородные по структуре, практически невозможно из-за ритмичности отложений. Поэтому вычисления среднепластового гранулометрического состава неизбежно ведут к загрублениям и добиваться в них высокой точности нет смысла.

Отсюда и отношение к уравнению (20). В качестве метода его целесообразно использовать не для оценки абсолютного значения содержания алеврито-глинистого материала, а для выявления мелкомасштабных изменений по разрезу и площади, для изучения региональных тенденций, которые подчас трудно уловить по редко и неравномерно отобранному керну.

Завершая главу, следует отметить, что количественные сведения о минерализации подземных вод, о пористости водоносных коллекторов и о содержании в них алеврито-глинистого материала описанные методы извлекают из одних и тех же геолого-геофизических данных. Такое явление свидетельствует в пользу существования единой уравновешенной системы порода—вода, где все определяемые показатели косвенно связаны между собой. Отсюда следует, что нарушение равновесия в системе можно обнаружить по существенным отклонениям расчетных значений от фактических.

ГЛАВА 3

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД И МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО РАЗРЕЗУ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КАТАГЕНЕЗА

В гл. 1 влияние катагенеза исследовалось в масштабе образцов пород и пластов, в данной главе исследования выполнены в масштабе толщ, мощность которых измеряется сотнями и тысячами метров. Переход к такому масштабу стал возможен благодаря комплексу методов, описанных в предыдущей главе. Изменения физических свойств пород и минерализации подземных вод прослеживались по разрезам юрских и меловых отложений на поисково-разведочных площадях севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба. Для первого из двух регионов построены разрезы по всем площадям, расположенным севернее Полярного круга, и по некоторым площадям к югу от этой границы. Самая южная из рассмотренных площадей — Комсомольская. Для второго региона построены разрезы по всем имеющимся к настоящему времени площадям.

Поскольку разрезы отдельных скважин содержат, как правило, недостаточно сведений для выявления каких-либо закономерностей, они в пределах каждой из поисково-разведочных площадей объединялись вместе. Эффективность объединения данных по площадям искупала некоторые издержки, о которых следует упомянуть. При наложении одного разреза скважины на другой сказывается разница в альтитуде и в расположении на структуре. В результате стратиграфические, литологические, физические и гидрогеологические границы по разным скважинам не совпадают, сдвигаются по шкале глубин. Наибольший сдвиг может достигать 150—200 м. На площадях, где отложения обладают большой мощностью, перекрытие данных «смазывает» закономерности изменения исследуемых показателей в прикровельных и приподошвенных частях свит. На площадях, где высота структуры соизмерима с мощностью свит, влияние ритмичности отложений на физические свойства пород и минерализацию подземных вод плохо различается.

Перед извлечением из промыслово-геофизических данных количественной информации для разрезов отбирались водоносные пласты. Если набор необходимых исходных сведений был достаточно полным, характер насыщения определялся по дискриминантному уравнению (15). Выделение водоносных пластов, описанных сокращенным набором промыслово-геофизических данных, выполнялось по уравнению (14). Иногда контрольные расчеты для сухо-

дудинской свиты Енисей-Хатангского прогиба производились по уравнению (16). По уравнениям (20), (11) и (18) были рассчитаны и нанесены на разрезы среднепластовые значения содержания алеврито-глинистого материала, общей минерализации подземных вод, открытой пористости пород.

Вместе с рассчитанными помещены фактические значения M — по анализам проб воды из испытанных скважин, $K_п$ — по лабораторным определениям в образцах из керна, АГ — по гранулометрическому анализу пород. Кроме того, на разрезы нанесены удельные электрические сопротивления водоносных коллекторов, на некоторые из них — глинистость, представляющая собой отношение суммарной мощности непроницаемых по ПС пород к общей мощности пачек и толщ, а также сведения о влиянии катагенеза на РОВ и породу.

Глинистость подсчитывалась на участках мощностью 25 м. Следует напомнить, что значение ее условно: на высоких стадиях катагенеза запись ПС на «линии глин» соответствует не только глинистым, но и уплотненным, сцементированным песчано-алевритовым породам. Стадия углефикации РОВ измерялась значением показателя преломления витринита. В соответствии с итогами исследований в гл. 1, § 1 влияние вещественного состава пород на показатель преломления не учитывалось и при выделении зон катагенеза по степени углефикации РОВ за достоверные принимались наиболее часто встречающиеся значения. В редких случаях, когда определения показателя преломления были единичными или отсутствовали вовсе, приходилось прибегать к интерполяции между соседними разрезами, охарактеризованными представительно. При интерполяции зон учитывалось, что границы между ними на валах и бортах прогиба расположены ниже по стратиграфической шкале, чем в прогнутой части.

Необратимые катагенетические деформации песчаников оценивались количественно долей контактов внедрения от всех контактов обломочных зерен (подсчеты в шлифах Б. А. Лебедева). По сумме наблюдаемых в шлифах качественных постдиагенетических изменений [93] породы отнесены (З. З. Ронкиной и Е. П. Колокольцевой) к верхней I_1, нижней I_2 зонам начального катагенеза и к верхней зоне глубинного катагенеза II. Зона I_1 соответствует примерно выделенным по степени углефикации РОВ зонам 1—2, I_2 — зоне 3 и II — зоне 4.

Наиболее полно охарактеризованные геологическими и промыслово-геофизическими данными разрезы приведены в приложении.

§ 1. Основные закономерности изменения содержания алеврито-глинистого материала в водоносных коллекторах

Распределение на разрезах данных о содержании алеврито-глинистого материала таково, что рассчитанные значения трассируют полосу минимальных значений АГ. Фактические значения изме-

няются в более широком диапазоне и многие из них достигают 80—100%. Дело в том, что рассчитанные значения АГ характеризуют только алеврито-песчаные породы, вызывающие отклонение кривой ПС от «линии глин». Фактические данные наносились все без исключения, так как чаще всего невозможно было среди них выделить относящиеся к коллекторам. Полоса фактических данных шире, чем расчетных, еще и потому, что первые получены для единичных образцов, а вторые — среднепластовые.

Прослеживая изменение расчетных и минимальных фактических значений АГ по юрско-меловому разрезу, можно отметить следующее. Наименьшее содержание в коллекторах алеврито-глинистого материала (около 25—30%) наблюдается в сеноманских, барремских и батских отложениях. Наиболее песчанистые коллекторы залегают в барремских отложениях. В Енисей-Хатангском прогибе они тяготеют в приподошвенной части яруса, иногда попадают даже в прикровельную часть готеривской толщи. На севере Западно-Сибирской плиты они расположены несколько выше по стратиграфической шкале. Относительное увеличение АГ приурочено к коллекторам апт-альбского и юрского (кроме упомянутых выше батских) возраста. Самые высокие значения АГ, до 50—55%, относятся к турон-кампанским и валанжинским отложениям. Переход от высоких АГ к низким на границе туронских и сеноманских отложений выглядит резким, скачкообразным, а увеличение АГ в нижнемеловой толще от барремских отложений к валанжин-готеривским происходит постепенно с небольшими колебаниями.

Описанные в общих чертах литологические особенности регионов как будто свидетельствуют о том, что содержание алеврито-глинистого материала в коллекторах находится в прямой зависимости от концентрации в разрезе алеврито-глинистых пластов. Однако более детальное исследование выявляет много отступлений от правила. Сопоставляя рассчитанную по записи ПС глинистость разреза с данными об АГ на Арктической, Тазовской, Зимней и Казанцевской площадях, нетрудно заметить, что теснота упомянутой зависимости не на всех участках юрско-меловой толщи одинакова. На Зимней площади, например, в относительно глинистом разрезе апт-альбских отложений коллекторы содержат почти столько же алеврито-глинистого материала, сколько коллекторы сеноманских и барремских отложений. В валанжин-готеривских отложениях на Арктической площади глубже 2100 м, на Тазовской глубже 2600 м, на Казанцевской глубже 2500 м содержание алеврито-глинистого материала в коллекторах заметно увеличивается до 40—50% на фоне довольно низкой глинистости разреза, примерно такой же, как у барремских отложений (несмотря на систематическое увеличение глинистости, рассчитанной по записи ПС, с возрастанием интенсивности катагенеза).

В то же время известны случаи, когда маломощные коллекторы в довольно глинистой валанжинской толще обладают повышенной песчанистостью. На Малохетском валу такими являются базальные пласты. Для 36 алеврито-песчаных пластов из юрских и меловых

отложений обоих рассматриваемых регионов коэффициенты парной корреляции содержания в коллекторе алеврито-глинистого материала с глинистостью в 40- и 100-метровом интервалах (половины интервалов отмерялись от середины пластов-коллекторов) равны соответственно +0,406 и +0,323. Оба коэффициента невелики, последний — ниже 5%-ного уровня значимости. Факторный анализ выборки по тем же пластам показал, что преобладающая часть дисперсии АГ в коллекторах не связана с глинистостью разреза.

Если располагать разрезы по площадям в таком порядке, чтобы образовались профили, можно проследить изменение АГ по территории регионов. В целом по меловым отложениям песчанистость коллекторов повышается на 5—10% начиная от Медвежьей, Уренгойской, Тазовской площадей и южнее. С уменьшением мощности меловых отложений от наиболее прогнутых частей севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба к валам и бортам содержание алеврито-глинистого материала в коллекторах возрастает. В альб-сеноманской песчаной толще АГ особенно заметно увеличивается на Нурминском мегавалу. На Рассохинском валу средние значения АГ в готерив-альбских отложениях достигают 40—45%. Содержание алеврито-глинистого материала в коллекторах апт-альбского возраста не контролируется современным структурным планом, и наибольшие значения литологического показателя зафиксированы на Озерной и Муксунихской площадях, несколько меньшие — на близлежащих Соленинской, Пеляткинской, Казанцевской и Джангодской.

Сопоставляя юрские отложения, можно отметить, что наиболее песчанистыми коллекторы батского яруса являются на Рассохинском валу и на Суходудинской площади. Коллекторы позднеааленского возраста на Балахнинском валу содержат на несколько процентов меньше алеврито-глинистого материала, чем в западной части Енисей-Хатангского прогиба. Однако наибольшее впечатление производит то, что описанные различия в абсолютных значениях АГ не нарушают единообразия относительного изменения показателя по разрезу в пределах обширных регионов. Территориальное прослеживание изменений АГ наводит на мысль, что картирование рассчитанных значений вместе с фактическими по свитам и горизонтам может способствовать решению палеогеографических задач.

§ 2. Основные черты гидрохимической зональности

Разработка методов оценки гидрохимических показателей позволила заполнить пробелы в фактических данных и увидеть закономерности в пространственном изменении минерализации подземных вод. Общая минерализация вод была рассчитана для 25 площадей севера Западно-Сибирской плиты и 20 площадей Енисей-Хатангского прогиба, некоторые результаты приведены в приложении. Разрезы по площадям наглядно выражают развиваемое в предыдущих главах положение о решающей роли гранулометрического состава коллекторов и интенсивности их катагенетического

преобразования в формировании общей минерализации. Зависимость общей минерализации от обоих показателей заключается в том, что в одной зоне катагенеза вода преснее в коллекторе, который содержит больше алеврито-глинистого материала, а при одинаковом гранулометрическом составе коллекторов соленость воды обратно пропорциональна рангам зон межстадиального катагенеза.

В юрско-меловом разрезе регионов на фоне обусловленного катагенезом постепенного снижения максимальных значений общей минерализации происходят колебания, которые отражают ритмичность в распределении алеврито-глинистого материала. Из наиболее песчанистых коллекторов при испытании скважин получены самые минерализованные воды: в прикровельной части сеноманских отложений минерализация достигает 15—25, в барремских 16, в батских 14 г/л. В остальных частях разреза с относительно бо́льшим содержанием алеврито-глинистого материала максимальные значения общей минерализации заметно ниже. Самые малые из них приурочены к турон-кампанским и валанжинским коллекторам, известным наиболее высокой глинистостью. Так, на Тазовской площади (см. приложение) из турон-кампанских отложений получены воды с общей минерализацией не более 6 г/л. В валанжинских отложениях почти на всех разведочных площадях рассмотренных регионов концентрация солей не превышает 7—8 г/л. В тех случаях, когда апт-альбские отложения заметно выделяются в разрезе повышенным содержанием в коллекторах алеврито-глинистого материала, как, например, на Озерной площади, в них тоже содержатся опресненные воды. В коллекторах юрского возраста, за исключением упомянутых выше батских, в соответствии с гранулометрическим составом пород и степенью их катагенетического изменения общая минерализация вод не превышает обычно 7—9 г/л.

Наиболее резкое увеличение общей минерализации наблюдается при столь же резком переходе от алеврито-глинистых пород турона и верхней юры к песчаникам сеномана и келловея-бата. Выделенное первоначально на нескольких площадях Енисей-Хатангского прогиба [10] скачкообразное уменьшение общей минерализации в валанжин-барремской толще прослежено теперь на большинстве площадей обоих регионов. Выявлению скачка немало способствовали рассчитанные значения минерализации. Глубина залегания границы, на которой происходит скачок, зафиксирована по некоторым площадям в нижнемеловых отложениях:

Разведочные площади	Глубина залегания границы, м	Разведочные площади	Глубина залегания границы, м
Южнотамбейская	2700	Песцовая	2900
Арктическая	2000	Находкинская	2650
Каменномысская	2300	Юрхаровская	2700
Геофизическая	2500	Тазовская	2350
Среднеямальская	2200	Уренгойская	2750
Нурминская	2200	Самбургская	2800
Ямбургская	2550	Заполярная	2500

Разведочные площади	Глубина залегания границы, м	Разведочные площади	Глубина залегания границы, м
Юбилейная	2750	Озерная	2200
Дерябинская	2100	Мессояхская	2000
Танамская	2250	Зимняя	1750
Паютская	2100	Семеновская	1600
Пеляткинская	2400	Нижнехетская	800
Соленинская	2150	Джангодская	1150
Казанцевская	2400		

Это скачкообразное уменьшение общей минерализации отмечено на участке постепенного нарастания с глубиной содержания алеврито-глинистого материала в коллекторах и объясняется нелинейностью связи M с N и АГ. Нелинейность связи M с N была показана ранее (см. рис. 3), а с АГ иллюстрируется в данном разделе (рис. 9). На разрезах по площадям, удаленным от палеозойского обрамления Западно-Сибирской плиты и бортов Енисей-Хатангского прогиба, вблизи границы скачкообразного изменения минерализации вод совершается переход от буроугольной стадии углефикации РОВ к длиннопламенной. На границе содержание алеврито-глинистого материала повышается обычно до 40—45%. Если подставить $N=3$ и АГ=40% в уравнение (9), то получается близкое к реальному среднее значение общей минерализации около 5 г/л.

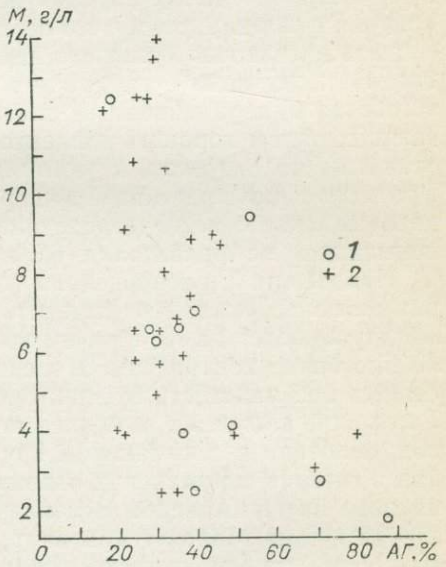


Рис. 9. Зависимость общей минерализации подземных вод от содержания в водоносных коллекторах алеврито-глинистого материала.

Значения минерализации вод: *1* — фактические; 2 — расчетные.

Наибольший перепад максимальных значений общей минерализации существует на границе туронских и сеноманских отложений, в зоне 1 межстадиального катагенеза. На Тазовской и Пеляткинской площадях он составляет 18 г/л. В зонах с более высоким рангом перепад не превышает 10 г/л.

Выполненные в гл. 1 исследования показали, что общая минерализация связана не столько с глинистостью разреза, сколько с содержанием алеврито-глинистого материала в самих водоносных коллекторах. Поэтому на Балахнинской площади, где ааленские коллекторы зажаты в мощной алеврито-глинистой толще, общая минерализация вод 5—8 г/л, т. е. такая же, как на площадях Малохетского и Рассохинского валов, где глинистость разреза значи-

тельно ниже. По той же причине в прикровельной части сеноманских песчаников на Тазовской площади общая минерализация не меньше, чем, например, на Мессояхской площади, хотя мощность алеврито-глинистой толщи над коллекторами первой площади в несколько раз больше, чем над коллекторами второй. Однако, изолируя коллекторы, алеврито-глинистые пласты участвовали в формировании и сохранении вертикальной гидрохимической зональности. С увеличением мощности и глинистости покрышек в удалении от палеозойского обрамления вертикальная дифференциация минерализации вод становится отчетливее, определеннее.

Заглинизированные коллекторы, характеризующиеся небольшими отклонениями кривой ПС от «линии глин», обычно неоднородны, маломощны, обладают низкими коллекторскими свойствами, поэтому их обходят при интерпретации БКЗ и испытании. Если же их в исключительных случаях испытывают, то часто не получают притока флюида, потому что по тем или иным причинам не удается создать достаточно большого перепада давлений в пласте и на забое. Если же вода с трудом и в небольших объемах извлекается, то общая минерализация ее оказывается ниже, чем у воды в залегающих рядом хороших коллекторах. Такие пласты почти не представлены на разрезах, и упоминаются они для полноты картины. Расчетные значения общей минерализации для 32 «сухих» пластов, которые, скорее всего, вследствие глинизации не дали притока при испытании, не превышали 6,5 г/л и снижались вниз по разрезу.

Прослеживая распределение общей минерализации по территории регионов, нельзя не заметить, что отмеченные выше изменения АГ отражаются на *М*. Причем из-за нелинейности связи изменения *М* еще более контрастны. В меловых отложениях вслед за увеличением песчанистости коллекторов на Медвежьей, Уренгойской и Тазовской площадях и южнее повышается общая минерализация вод, особенно в сеноманском ярусе. Снижение общей минерализации в готерив-сеноманских отложениях приурочено к крупным поднятиям: на Нурминском мегавалу значения обычно не превышают 11—12 г/л, на Малохетском валу, за редким исключением, — около 10—11 г/л, на Рассохинском валу — снижаются до 7—9 г/л. В разрезах Суходудинской и Большелайдинской площадей, расположенных на юго-западном борту Енисей-Хатангского прогиба, значения общей минерализации тоже невысоки, 10 г/л. При уменьшении абсолютных значений общей минерализации упомянутая относительная вертикальная зональность сохраняется. Так же, как и наименьшие значения АГ, наименьшие значения *М* в апт-альбских отложениях наблюдаются на Озерной и Муксунихской площадях и несколько более высокие (но, разумеется, ниже, чем в сеноманских и барремских отложениях) — на окружающих Соленинской, Пеляткинской, Казанцевской и Джангодской. Поскольку коллекторы батского яруса на Рассохинском валу более песчанистые, чем на Малохетском, воды на Джангодской и Рассохинской площадях минерализованы больше, чем на Зимней и Семеновской, при примерно одинаковой степени катагенетического преобразования пород.

Повсеместно, где прослежена зависимость общей минерализации от гранулометрического состава коллекторов и интенсивности их катагенетического преобразования, пропорционально M изменяется в водах концентрация фактических и расчетных значений $K^+ + Na^+$ и Cl^-.

На большинстве разрезов фактические и расчетные значения общей минерализации, дополняя друг друга, образуют единую схему, подчиненную главным образом гранулометрическому составу коллекторов и интенсивности катагенеза. На Джангодской и Балахнинской площадях схема сохранилась несмотря на существование доказанных тектонических нарушений. Однако наблюдаются и отклонения, которые выражаются в значительном различии фактических и расчетных значений общей минерализации для одних и тех же коллекторов. Многократные отклонения от схемы установлены на Новопортовской, Медвежьей и Губкинской площадях. Здесь в юрских, реже в нижневаланжинских коллекторах получены воды, общая минерализация которых достигает 25—35 г/л, в одном случае — 53 г/л, в то время как расчетные значения не выходят из диапазона 4—10 г/л. Такое же различие фактических и расчетных значений выявляется и на некоторых других площадях, расположенных южнее Песцовой, Уренгойской, Самбургской и Заполярной. Сравнительно высокие, возможно, аномальные единичные значения общей минерализации в основании юрских отложений известны на Зимней (17,2 г/л) и Суходудинской (до 20,5 г/л) площадях.

Не укладывающиеся в схему высокие минерализации, скорее всего, объясняются подтоком рассолов в осадочный чехол из палеозойского фундамента, содержащего галогенные образования [22]. Изучая закономерности распространения рассолов в Западно-Сибирском артезианском бассейне, Л. Г. Учителева установила [103], что максимальная площадь развития их оконтуривается в нижней части юрской толщи, залегающей на фундаменте. Вверх по разрезу площадь сокращается, и в неокомских отложениях рассолы отсутствуют. Л. Г. Учителева убедительно доказывает, что внедрение происходило по тектоническим нарушениям, которые затухают в осадочном чехле с удалением от фундамента, и отмечает резкий переход к рассолам от вод нормальной солености. С изложенными наблюдениями согласуются данные по разрезам, где отмечены отступления от господствующей в рассматриваемых регионах схемы изменения общей минерализации. По результатам бурения известно, что юрские отложения на Новопортовской и Суходудинской площадях залегают непосредственно на фундаменте. Воды, существенно отличающиеся своей высокой минерализацией от расчетных значений, сосредоточены главным образом в юрских отложениях, изредка встречаются в нижневаланжинских и отсутствуют в вышележащей толще.

Из одновозрастных коллекторов в соседних скважинах получены притоки аномальных высокоминерализованных вод и вод, не смешанных с рассолами. Общая минерализация последних колеб-

лется в тех же пределах, что и расчетная. Очевидно, их равновесие с породой сохранялось в неприкосновенности или было нарушено незначительно и восстановилось с течением времени. Связывая появление аномально высоких значений общей минерализации с подтоком рассолов из палеозойского фундамента, можно ожидать аналогичные отступления от установленной схемы на площадях, где юрские коллекторы не экранированы алеврито-глинистыми породами триасового возраста. Следует отметить, что на участках широкого распространения чужеродных высокоминерализованных вод наряду с газовыми появляются нефтяные залежи. В этом смысле есть определенное сходство Среднего Приобья и северной части Анабаро-Хатангской седловины.

В пределах рассматриваемых регионов обнаружено несколько случаев отклонения от описанной схемы по другим причинам. На Новопортовской площади в меловых отложениях встречаются воды, общая минерализация которых ниже расчетной. Вероятно, вблизи палеозойского обрамления происходит инфильтрация поверхностных вод, опресняющих подземные. В скв. 40 Тазовской площади в интервале глубин 2780—2818 м из пород поздневаланжинско-готеривского возраста отобраны пробы воды с общей минерализацией от 12,8 до 16,7 г/л, в то время как остальные многочисленные фактические и расчетные значения общей минерализации на площади начиная с глубины 2500 м не превышают 4—5,5 г/л. Кроме того, удельное электрическое сопротивление испытанных объектов неправдоподобно велико (35; 74 Ом·м) для пород, насыщенных водами с такой концентрацией солей. Вероятно, неожиданно высокие значения общей минерализации обусловлены последствиями ликвидации аварии с помощью торпедирования на глубине около 2800 м.

На разрез по Тазовской площади сомнительные значения не наносились. На Среднепясинской площади систематическое отклонение расчетных значений от фактических в бóльшую сторону на несколько граммов в литре, скорее всего, связано с разбавлением подземных вод фильтратом промывочной жидкости. Остальные, подчас кажущиеся аномальными, случаи можно понять, зная гранулометрические особенности коллекторов и степень их катагенетического изменения. Одним из таких случаев можно считать наличие относительно высоких (до 14 г/л) минерализаций в верхнеюрских коллекторах на Рассохинской площади, но рассчитанное здесь малое содержание алеврито-глинистого материала в коллекторах (до 25%) и буроугольная стадия катагенеза РОВ объясняют результаты испытания. Возможно, те же причины, а не только подток из фундамента, способны обеспечить повышенные значения общей минерализации в нижней части разреза на Суходудинской площади.

Перечисленные отклонения от описанной схемы пространственного изменения общей минерализации объясняются (не считая технического брака при испытании) внедрением рассолов из фундамента плиты или современной инфильтрацией пресных поверх-

ностных вод. В итоге не остается заметных аномалий, которые могли бы быть вызваны появлением возрожденных, биогенных, конденсационных и образованных в результате роста многолетнемерзлой толщи вод. Наоборот, помещенные на разрезах материалы трудно связать с влиянием упомянутых вод. Непосредственно под многолетнемерзлой толщей установлены воды не высокой, а низкой минерализации. Опреснение в турон-кампанских коллекторах невозможно связать с гидрослюдизацией монтмориллонита, потому что минеральное преобразование активизируется начиная с зоны 3, т. е. в более древних отложениях. Трудно поверить в конденсационную гипотезу, если на непродуктивных структурах и в неструктурных условиях, например на Паютской, Муксунихской, Суходудинской и Рассохинской площадях, существует та же вертикальная гидрохимическая зональность, что и на крупнейших газовых месторождениях.

С другой стороны, в газоносных частях разреза встречается больше, чем в непродуктивных (но вмещающих коллекторы), мощных алеврито-глинистых покрышек, а в более глинистом разрезе часто и коллекторы содержат больше алеврито-глинистого материала. Поэтому, исходя из развиваемых в работе положений, в газоносных отложениях следует ожидать, как правило, воды с относительно низкой общей минерализацией и относительно высокой гидрокарбонатностью. Влияние биогенных вод трудно выделить, вероятно, потому, что концентрация органического вещества в породах связана с гранулометрическим составом. Поступление биогенных вод может наращивать амплитуду опреснения, не образуя заметных самостоятельных аномалий.

Выявленное пространственное изменение общей минерализации совершенно не увязывается со сложившимися представлениями о солености вод древних бассейнов [28]. В наиболее мористых верхнеюрских — валанжинских и туронских отложениях коллекторы насыщены самыми маломинерализованными водами.

Конкретный материал по площадям иллюстрирует положение о коренной переработке вод в ходе постседиментационных преобразований.

Возможность оценки минерализации вод по промыслово-геофизическим данным и выявление гидрохимической зональности на севере Западно-Сибирской плиты и в Енисей-Хатангском прогибе позволяют поставить вопрос о пересмотре принципов выбора водоносных объектов для испытания. При определении пористости по параметру пористости, например, общую минерализацию во многих случаях целесообразно определять по каротажу. На новых площадях, чтобы проверить выдержанность обычной зональности, достаточно единичных анализов вод. По сходимости расчетных значений минерализации с фактическими в какой-то мере можно судить о закрытости недр, о надежности водоупоров и вероятных путях миграции флюидов, в том числе и углеводородов.

§ 3. Катагенетическая зональность коллекторских свойств алеврито-песчаных пород

Фактические и определенные по геолого-геофизическим данным значения общей минерализации подземных вод были использованы для расчета пористости коллекторов по уравнению (18). Рассчитанные по уравнению значения, дополняя лабораторные, позволили почти непрерывно проследить вертикальную зональность пористости коллекторов в юрско-меловой толще. Пористость рассчитывалась для наилучших (по записи ПС) коллекторов, поэтому полоса расчетных значений проходит на построенных разрезах по максимальным лабораторным определениям.

Заложенные в период седиментации первичные коллекторские свойства алеврито-песчаных пород, судя по гранулометрическому составу, не изменялись бы существенно с глубиной, если бы не оказали влияние последующие преобразования. Наблюдаемые в настоящее время различия обусловлены главным образом механическим уплотнением и цементацией в результате катагенеза. На разрезах по Нижнехетской, Семеновской и Казанцевской площадям показано, как уплотнение песчаников сопровождается увеличением с глубиной доли контактов внедрения от всех контактов обломочных зерен.

На разрезах по изученным площадям обоих регионов каждой зоне межстадиального катагенеза соответствуют свои характерные максимальные значения открытой пористости. В зоне 1, где РОВ преобразовано до подстадии $Б_{1-2}$, коллекторы представлены широким спектром алеврито-песчаных разностей. Здесь максимальные значения пористости обычно находятся в интервале 25—40%. С увеличением степени катагенетических изменений вниз по разрезам спектр постепенно сужается за счет исключения из него консолидированных пород. В зоне 2, отложения которой содержат РОВ на подстадии $Б_3$, происходит наиболее заметное уменьшение максимальной пористости до относительной стабилизации на уровне 18—24%. В зоне 3, в которой катагенез пород измеряется длиннопламенной стадией углефикации РОВ, максимальная пористость сохраняется равной 18—24%. В зоне 4, где РОВ достигло газовой стадии углефикации, алевролиты практически теряют свойства гранулярных коллекторов, а пористость песчаников не превышает обычно 15—17%. В зоне 5 РОВ преобразовано до жирной стадии, в ней только песчаники с наибольшей размерностью зерен (мелкосреднезернистые), содержащие наименьшее количество карбонатно-глинистого цемента, сохраняют пористость до 12—13%. Диапазон изменения максимальной пористости в каждой зоне зависит от гранулометрического состава коллекторов и сокращается с увеличением ранга зон, по мере сужения спектра литологических разностей, слагающих коллекторы.

Наиболее резкое изменение максимальных фактических и расчетных значений пористости на разрезах зафиксировано на границе туронских и сеноманских отложений. Перепад достигает 10—12%.

Изредка почти такое же резкое изменение бывает на участках, где коллекторы апт-альбского возраста сменяются более песчанистыми. Отмеченные скачки приурочены к зонам катагенеза 1—2. В зонах с более высокими рангами скачки измеряются несколькими процентами. С уменьшением мощности зон от наиболее прогнутых частей регионов к валам возрастает градиент изменения максимальных значений пористости. На Джангодской площади в зоне 2 (в которой градиент больше, чем в других) максимальные значения пористости образовали ступень с перепадом в 10%.

Анализ изменения фильтрационных свойств в образцах алеврито-песчаных пород показал, что в зоне 1 преобладают коллекторы с проницаемостью 0,1—1 мкм², в зонах 2 и 3 проницаемость обычно находится в интервале 0,01—0,1 мкм², а в зонах 4 и 5 — не превышает тысячных долей квадратного микрометра. С приближением к границе зон 3 и 4 даже небольшие примеси карбонатного материала к глинистому в цементе резко ухудшают проницаемость пород. Если на тренд вида $K_{пр}=f(N, K_п)$ (см. рис. 2) нанести максимальные значения пористости по зонам, то можно снять с него соответствующие максимальные значения проницаемости. После выполнения такой операции оказалось, что для зоны 1 максимальная проницаемость измеряется единицами квадратных микрометров, в зоне 2 падает на два порядка и в зоне 3 равна 0,5—0,6 мкм². В зоне 4 максимальная проницаемость способна достигнуть 0,15 мкм², а в зоне 5 не превышает тысячных долей квадратного микрометра.

Установленная в юрских и меловых отложениях севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба вертикальная катагенетическая зональность коллекторских свойств алеврито-песчаных пород прослеживается вниз по стратиграфической шкале до каменноугольных отложений и на восток по мезозойским прогибам, окаймляющим Сибирскую платформу. Так, на Нордвикской, Ильинской и Кожевниковской площадях триасовые, юрские и меловые отложения, в которых РОВ находится на буроугольной стадии углефикации, обладают пористостью 30—35%. В нижней части триасовых отложений и в пермской толще, где содержится органическое вещество на длиннопламенной стадии, максимальные значения пористости равны 22—23%. В пермских породах, вмещающих измененное до газовой стадии органическое вещество, пористость не превышает 17%.

Прослеживая изменение пористости по территории, обнаруживаем прежде всего влияние межстадиального катагенеза. Несмотря на малое колебание содержания алеврито-глинистого материала в нижнеааленских коллекторах, пористость их на Тундровой площади при $N=2$ достигает 25—27%, на Балахнинской площади при $N=3$ максимальные значения — 24%, на Зимней, Семеновской и Джангодской при $N=4$ — 17—18%. Описанные выше изменения по территории показателя АГ также отражаются на пористости. Наиболее высокими емкостными свойствами обладают алеврито-песчаные породы мелового возраста, залегающие в зонах 1 и 2 на

Медвежьей, Уренгойской, Тазовской площадях и южнее, т. е. там, где отмечалось относительное повышение песчанистости коллекторов. В тех же зонах катагенеза с возрастанием содержания алеврито-глинистого материала в меловых коллекторах от наиболее прогнутых частей рассматриваемых регионов к валам и бортам пористость часто ухудшается. На Харасовэйской, Южнотамбейской, Нурминской площадях пористость только в единичных образцах достигает 33—35%. На Рассохинском валу лишь одно значение среднепластовой пористости превышает 33%. На Суходудинской, Нижнехетской, Большелайдинской площадях среди многих определений пористости нет значения больше 35%. Наиболее яркий случай ухудшения коллекторских свойств с возрастанием АГ выявлен на Озерной и Муксунихской площадях. Здесь в коллекторах апт-альбского возраста, залегающих в зоне 1, максимальные значения пористости упали до 23—24%.

Связанное с ритмичностью изменение АГ в юрско-меловой толще фиксируется как извилистостью линии максимальных значений пористости, так и похожей по очертаниям извилистостью линии максимальных значений общей минерализации. Только уменьшение пористости под влиянием межстадиального катагенеза выражено намного сильнее и сразу обращает на себя внимание. В прикровельной части сеноманских отложений (зона 1) общая минерализация вод достигает 25 г/л, пористость — 40%; в батских отложениях (зона 4) максимальные значения тех же показателей (если не учитывать подток рассолов из фундамента) 14 г/л и 17%. Насыщенные водами примерно одинаковой солености коллекторы турон-кампанского и валанжинского ярусов при разнице рангов зон 2 (3—1) отличаются по максимальным значениям пористости на 7—10%. С другой стороны, с возрастанием ранга зон межстадиального катагенеза уменьшение влияния гранулометрического состава коллекторов на пористость заметнее, чем на общую минерализацию вод. Поэтому разница содержания алеврито-глинистого материала в коллекторах туронских и сеноманских отложений ярко выражена в изменении как пористости, так и общей минерализации, а повышение с глубиной значения АГ в валанжин-барремской толще вызывает резкое падение M и не всегда различаемый скачок в снижении максимальных значений $K_п$.

То, что общая минерализация вод теснее связана с гранулометрическим составом коллекторов, а пористость — с рангом зон межстадиального катагенеза, было выявлено ранее на образцах пород, пластах и теперь установлено в разрезах. Именно поэтому описание по разрезам закономерностей изменения общей минерализации воды опиралось в основном на связь с АГ, а пористости — с N.

§ 4. Основные закономерности изменения промыслово-геофизических данных по разрезу

Катагенетические преобразования системы порода—вода отражены каротажными записями. В зоне 2, где отмечен наибольший

градиент снижения максимальных значений пористости, происходит самое интенсивное уплотнение пород. Если в зоне 1 залегает много алевритов и песков, то в зоне 3 рыхлых разностей не встречается. Только с поверхности отдельных образцов каолинизированных песчаников в руках осыпаются зерна. В разрезах уплотнение особенно заметно при сокращении мощности зоны 2 на валах. На Нижнехетской, Семеновской, Зимней, Майской, Мессояхской и Рассохинской площадях ниже границы зон 1 и 2, судя по механическому каротажу, в несколько раз уменьшается скорость бурения скважин. На многих площадях к границе между зонами приурочено увеличение удельного сопротивления алевритово-глинистых пород. Иллюстрации к сказанному были опубликованы ранее [12] и здесь не приводятся.

Основные колебания амплитуды кривой ПС подчинены изменению гранулометрического состава коллекторов и связанной с ним минерализации подземных вод. Если бы данные о среднепластовой АПС были нанесены на разрезы, то линия максимальных значений в какой-то мере повторила бы очертания линии минимальных значений АГ, только изгибалась бы контрастнее, потому что связь АПС с глинистостью нелинейна [34], и с возрастанием ранга зон линия отклонялась бы в сторону уменьшения величин.

В связи с нелинейностью зависимости удельного электрического сопротивления водоносных коллекторов от общей минерализации вод даже небольшое опреснение легко обнаруживается на разрезах без расчетов *М*, по скачкообразному расширению полосы значений промыслово-геофизического показателя. Расширение происходит за счет многократного увеличения максимальных значений $\rho_{вп}$ и небольшого увеличения минимальных значений. Это явление было замечено первоначально в валанжин-готеривских отложениях на нескольких площадях западной части Енисей-Хатангского прогиба [10] и потом прослежено по всей юрско-меловой толще рассматриваемых регионов.

Глубину залегания границы опреснения в валанжин-барремских отложениях на большинстве перечисленных на с. 98—99 площадей можно определить по изменению удельных сопротивлений обычно от 5—15 до 30—80 Ом·м. Одним из примеров отчетливой фиксации границы может служить разрез по Тазовской площади (см. приложение). Переход от водоносных коллекторов батского возраста к более древним, содержащим воды относительно низкой минерализации, сопровождается увеличением удельных сопротивлений на Зимней площади от 32 до 62, на Джангодской — от 15 до 50, на Рассохинской — от 5 до 40 Ом·м. Некоторое понижение минерализации вод в апт-альбских отложениях вызывает увеличение удельных сопротивлений в 2 раза и более. На Озерной площади, где известно наибольшее опреснение, максимальные значения удельного сопротивления барремских водоносных коллекторов 9, а апт-альбских — 35 Ом·м. На границе сеноманских и туронских отложений тоже происходит резкое изменение удельных сопротивлений. Если для сеноманских водоносных коллекторов характерны значения 2—5 Ом·м, то для вышележащих 10—30 Ом·м. На Тазовской

площади из пластов турон-кампанской толщи с удельным сопротивлением около 20 Ом·м получены воды с общей минерализацией 2—4 г/л.

Установленные закономерности пространственного изменения общей минерализации вод уточняют привычные представления о возможном значении удельного сопротивления водоносных пластов. Н. А. Ирбэ [43] считает, что коньяк-сантонские коллекторы на Казанцевской (Песчаной) площади газоносны, потому что их удельное сопротивление превышает сопротивление водоносных сеноманских коллекторов в 2,5—4 раза. Зная, что минерализация вод на границе сеноманских и перекрывающих отложений резко изменяется, она, возможно, сократила бы мощность предполагаемых газонасыщенных пород непосредственно под многолетнемерзлой толщей на упомянутой площади. По предположению Н. А. Ирбэ, газонасыщенными являются также апт-альбские коллекторы на Рассохинской площади. В нижнемеловых отложениях на Рассохинском валу, как сказано в гл. 3, § 2, минерализация вод понижена, и удельные сопротивления 13—17 Ом·м на Рассохинской площади вполне могут относиться к водоносным пластам. На соседней Джангодской площади в аналогичном разрезе при испытании получены воды с концентрацией солей 3—5 г/л. К тому же в апт-альбских отложениях, нередко отличающихся повышенной глинистостью, можно ожидать дополнительное снижение общей минерализации.

Сокращение под влиянием катагенеза спектра литологических разностей, участвующих в формировании коллекторских свойств пород и минерализации подземных вод, проявляется на разрезах по площадям. При большом количестве на разрезах значений M и $K_п$ согласованное колебание линий максимальных значений обоих показателей обусловлено ритмичностью в изменении гранулометрического состава пород, слагающих коллекторы. С увеличением ранга зон межстадиального катагенеза колебание линий максимальных значений M и $K_п$ постепенно затухает, причем затухание колебаний по значениям пористости происходит быстрее на более ранних стадиях катагенеза, чем затухание колебаний по значениям общей минерализации. Изменение влияния ритмичности отложений на коллекторские свойства пород и минерализацию подземных вод отражается промыслово-геофизическими данными. С увеличением ранга зон межстадиального катагенеза затрудняется выявление ритмичности в разрезах по электрокаротажу в результате снижения его информативности для консолидированных пород. Закономерности катагенетической консолидации пород в рассматриваемых разрезах позволяют сделать вывод, что в отложениях, находящихся в зонах 1—3, особенно важно уделять внимание изучению и прогнозу покрышек, а в зонах с более высокими рангами — изучению и прогнозу коллекторов.

ГЛАВА 4

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД И МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КАТАГЕНЕЗА

В предыдущих главах установлено, что емкостные и фильтрационные свойства терригенных отложений контролируются главным образом гранулометрическим составом, который передает суммированную информацию о влиянии седиментации, диагенеза, внутристадиального катагенеза, и степенью интенсивности межстадиального катагенеза. Очевидно, любой претендующий на полноценность метод прогнозирования качества коллекторов должен опираться на показатели, контролирующие условия формирования. Методы прогнозирования минерализации подземных вод должны учитывать те же показатели. Правда, за ними в данном случае будет скрыто влияние диагенеза и обоих направлений катагенеза, но не седиментации, поскольку гранулометрический состав водоносных пород не содержит информацию о седиментационных водах.

§ 1. Методы прогнозирования коллекторских свойств пород и минерализации подземных вод

Прогнозирование коллекторских свойств пород. Метод *количественного* прогнозирования пористости использует уравнения регрессии вида $K_п = f(N, АГ)$. Уравнения по существу являются простейшей моделью коллекторов. Входящие в уравнения независимые переменные не только высокоинформативны, но и доступны для пространственного прослеживания начиная с ранних этапов поисковых работ. Сведения о стадиях катагенеза, о соотношении в отложениях песчаников и алевролитов становятся известны уже по полевым визуальным описаниям обнажений, по результатам каротажных и сейсморазведочных работ. Применение уравнений возможно при наличии цифровых исходных данных об исследуемом объекте. Точность прогноза зависит от изученности региона, от точности наших представлений о показателях, заложенных в уравнения.

Для прогнозирования пористости коллекторов в пермских, триасовых и юрских отложениях Анабаро-Хатангской седловины можно использовать уравнение (3), приведенное в гл. 1. Если задаться, например, целью предсказать в различных зонах катагенеза пористость песчаников, содержащих 10% алеврито-глинистого материала, то получатся следующие результаты. В зоне 1, где степень

изменения пород измеряется индексом $Б_{1-2}$ углефикации РОВ, пористость песчаников будет равна 31%, в зоне 2 (углефикация РОВ на подстадии $Б_3$) пористость — 25%, в зоне 3 (длиннопламенная стадия изменения РОВ) пористость — 19% и в зоне 4 (РОВ на газовой стадии) — 13%. Для глинистых алевролитов, не содержащих примеси песчаной фракции, значения пористости в каждой зоне должны быть примерно на 7% ниже.

Метод количественного прогнозирования позволил выяснить истинную причину отсутствия коллекторов в нижнеюрских отложениях на Балахнинской площади. На первый взгляд по имеющимся данным создается впечатление, что коллекторы, известные на Сындасской площади, постепенно оглиниваются в западном направлении и поэтому исчезают на Балахнинской площади. Однако если мысленно перенести породы, слагающие коллекторы на Сындасской площади, в геологические условия Балахнинского вала, то обнаружится ошибочность первого впечатления.

Среди лабораторных анализов керна, поднятого в скв. 201 Сындасской площади (данные П. С. Воронова, 1953 г.), имеются определения емкостных и фильтрационных свойств, а также гранулометрического состава пород по 16 образцам коллекторов из юрских отложений. С учетом гранулометрической характеристики образцов были рассчитаны по уравнению (3) значения пористости для различных зон межстадиального катагенеза, за редкими исключениями расчетные значения для зоны 2 оказались близки к фактическим. Существенные различия между фактическими и расчетными значениями пористости в нескольких образцах, скорее всего, обусловлены неоднородностью породы. Пористость и гранулометрический состав определялись, несомненно, в отличающихся по литологии частях образца. Так, вряд ли образец № 43, который на 58% сложен алевролитовым и на 42% глинистым материалом, может обладать пористостью 25,9%. Тем более, что пористость примерно такого же по гранулометрическому составу образца № 133 (АГ=95%) равна 16,2%. Сходство большинства рассчитанных для зоны 2 и фактических значений пористости свидетельствует о том, что РОВ в юрских отложениях Сындасской площади находится на поздней буроугольной подстадии.

Представим себе, что на Сындасской площади произошло такое же погружение, как на Балахнинской. В табл. 20, где приведены фактические и расчетные значения пористости, видно, что при $N=3$ многие образцы перестали бы быть коллекторами. При $N=4$ свойства гранулярных коллекторов практически утратили бы не только алевролиты, но и песчаники. Действительно, в нижнеюрских отложениях на Балахнинской площади, судя по описаниям шлифов, встречаются аналогичные упомянутым в табл. 20 алевролиты и песчаники, но коллекторские свойства их в такой степени понижены, что не обеспечивают отклонение записи ПС от «линии глин». Следовательно, причиной отсутствия коллекторов в нижнеюрских отложениях на Балахнинской площади является не столько оглинивание разреза, сколько влияние катагенеза.

Таблица 20

Определенные в лаборатории и рассчитанные по уравнению (3) значения пористости алеврито-песчаных пород юрского возраста из керна скв. 201 Сындасской площади

Номера образцов	Глубина залегания, м	Породы	Пористость		
			лабораторная	расчетная	
				$N=3$	$N=4$
14	600	Алевролит	20,5	15,0	9,1
17	609	»	22,6	15,1	9,2
27	635	»	21,3	12,4	6,5
32	643	Песчаник	24,4	16,3	10,4
36	649	»	24,6	16,6	10,7
40	658	Алевролит	19,1	12,5	6,6
43	672	»	25,9	12,2	6,4
52	697	»	19,5	12,3	6,4
53	706	»	18,4	12,3	6,4
55	716	»	19,6	12,3	6,4
63	735	Песчаник	30,7	15,3	9,4
67	745	Алевролит	27,9	13,7	7,8
118	912	»	21,5	14,6	8,7
133	949	»	16,2	12,6	6,7
140	968	»	19,0	13,8	8,0
142	971	Песчаник	20,7	15,9	10,0

Приведенный пример использования метода количественного прогнозирования коллекторских свойств продемонстрировал возможность оценивать интенсивность межстадиального катагенеза при наличии сведений о гранулометрическом составе и пористости пород. Уравнение вида $N=f(АГ, K_п)$ может дать представление о степени катагенетического преобразования РОВ в отложениях, которые содержат мало детрита или переотложенный детрит, не характеризующий стадию катагенетического изменения породы.

Применение метода количественного прогнозирования пористости наиболее рационально в регионах, где предварительно изучено пространственное изменение влияния межстадиального катагенеза и гранулометрического состава коллекторов. Итоги изучения могут быть представлены, например, в виде карт по пластам, пачкам, толщам с зонами катагенеза и изолиниями содержания алеврито-глинистого материала в коллекторах. На Западно-Сибирской плите и в Енисей-Хатангском прогибе, зная ранги зон межстадиального катагенеза и пористость коллекторов юрского и мелового возраста, можно определять соответствующие, наиболее вероятные значения проницаемости по рис. 2, который имеет вид номограммы.

Метод *полуколичественного* прогнозирования коллекторских свойств использует описанную в предыдущей главе катагенетическую зональность. Каждой зоне межстадиального катагенеза соответствуют свои максимальные значения пористости и наиболее характерные значения проницаемости. В указанном для каждой зоны

интервале изменения максимальных значений пористости наибольшие относятся к средне-мелкозернистым, реже к мелко-среднезернистым песчаникам с содержанием глинистого цемента меньше 10% и практически без карбонатного цемента; наименьшие значения в интервале относятся к алевритовым, глинистым песчаникам и к алевролитам. Так что, представляя хотя бы приблизительно литологию разреза и катагенетическую зональность в нем, можно дать обоснованную оценку ожидаемых коллекторских свойств.

В регионах с единой историей геологического развития гранулометрическую основу для прогнозирования коллекторских свойств дает ритмичность отложений. Так, в юрско-меловом разрезе Енисей-Хатангского прогиба ритмично чередуются преимущественно алеврито-песчаные толщи пород с преимущественно алеврито-глинистыми, и границы толщ совпадают с границами свит. Простираясь по территории прогиба и обладая мощностью от десятков до сотен метров алеврито-песчаные толщи представляют собой региональные коллекторы, алеврито-глинистые — региональные покрышки; сочетание каждого из региональных коллекторов с региональной покрышкой над ним образует литологический комплекс, в той или иной степени изолированный от соседних по разрезу. Всего в юрских и меловых отложениях прогиба было выделено нами 9 комплексов [9]. Наложение на систему подобных комплексов системы зон катагенеза способно обеспечить необходимые условия для полуколичественного прогнозирования.

В пределах больших регионов, где в период формирования изучаемых отложений не существовало единого седиментационного бассейна, приходится выделять участки с выдержанным типом разреза и оперировать не свитами, а более крупными стратиграфическими подразделениями. Такой подход применен в гл. 4, § 2 при прогнозировании коллекторских свойств в терригенных верхнепалеозойских и мезозойских отложениях мезозойских прогибов, окаймляющих северную часть Сибирской платформы.

Как упоминалось в предисловии, постдиагенетические изменения пород не ограничиваются рассматриваемым типом катагенеза, который называется прогрессивным. В некоторых регионах при прогнозировании коллекторских свойств надо иметь в виду дополнительное влияние динамокатагенеза и контактового термального катагенеза. Динамокатагенез проявляется, например, в мезозойских прогибах на участках, примыкающих к Таймырской и Верхоянской складчатым областям.

Полагая, что степень углефикации РОВ в породах не зависит или почти не зависит от влияния складчатости [93] и служит главным образом мерой интенсивности прогрессивного межстадиального катагенеза, можно получить представление о масштабе уплотнения и цементации пород под действием динамокатагенеза. Достаточно для одновозрастных, одинаковых по гранулометрическому составу и глубине максимального погружения пород из значений пористости, сформированной только под действием прогрессивного катагенеза $K_{п1}$, вычесть значения пористости, являющейся резуль-

татом совместного действия прогрессивного катагенеза и динамокатагенеза $K_{п2}$.

Вычитание было выполнено на материале по нижнему течению р. Лены, где удалось выделить два участка, охарактеризованные одновременно определениями пористости и показателей преломления витринита в образцах из обнажений среднеюрских и нижнемеловых пород. Один из участков в районе поселков Кюсюр и Булкур расположен ближе к Верхоянской складчатой области, чем другой — в устье левого притока Лены, р. Элиэтибийэ.

Органическое вещество в породах на обоих участках находится на длиннопламенной стадии преобразования. Значит, если бы уплотнение и цементация здесь были обусловлены только прогрессивным катагенезом, то в соответствии с описанной ранее закономерностью максимальные значения пористости достигли бы 18—24%. Среднеюрские коллекторы в низовьях Лены представлены алевролитами, поэтому для них примем нижний предел интервала, $K_{п1}=18\%$. На первом, северном, участке наиболее часто встречаются фактические значения $K_{п2}=6\%$. Разность $K_{п1}-K_{п2}=18-6=12\%$. На южном участке $K_{п2}=5\%$, разность — 13%.

Для песчаников раннемелового возраста возьмем среднюю пористость $K_{п1}$, из интервала максимальных значений — 21%. На северном участке, в районе поселков Кюсюр и Булкур, разность $K_{п1}$ и $K_{п2}$ равна $21-6=15\%$. На южном участке используем не одиночное высокое значение $K_{п2}$, равное 14%, а тоже максимальное, только более характерное 12%. $21-12=9\%$.

Простые, но, на наш взгляд, наглядные вычисления показали, что под действием давления со стороны складчатой области и цеолитизации юрские и меловые коллекторы теряют от 9 до 15% пористости, или в относительном измерении до 70%. Если, вопреки допущению, тепловой поток от складчатой области заметно преобразует РОВ, то значения разности $K_{п1}-K_{п2}$ должны быть еще больше. Привлекает внимание то, что вблизи складчатой области меловые песчаники и юрские алевролиты обладают почти одинаковой пористостью, а в некотором удалении намечается дифференциация. Вероятно, алевролиты при динамокатагенезе, как и при прогрессивном катагенезе, хуже сопротивляются сжатию, чем песчаники. Пористость триасовых и пермских отложений изменяется меньше, так как влияние динамокатагенеза наложилось на уже сильно измененные прогрессивным катагенезом породы.

В мезозойских прогибах, окаймляющих северную часть Сибирской платформы, практика полуколичественного прогнозирования коллекторских свойств пород вблизи складчатых областей сводилась к выделению горизонтальной катагенетической зональности [93]. Две зоны, если их рассматривать в плане, вытягивались полосами вдоль границы прогибов со складчатой областью. В ближней к границе внутренней зоне шириной от 10 до 100 км породы отличаются сильным уплотнением, цементацией и трещиноватостью, частично залеченной отложением из растворов кальцита, хлорита, гипса и цеолита. Глинистые породы превращены в аргиллиты.

В алевролитах и песчаниках преобладают инкорпорационные, часты микростилолитовые контакты. Широко развита регенерация кварца и полевых шпатов.

Пористость алеврито-песчаных пород в тех случаях, когда наложилась еще и цеолитизация, обычно составляет 2—3%. Коллекторами можно считать только отдельные прослойки песчаников с наибольшим медианным размером зерен, сохранивших межзерновую пористость (5—8%) и проницаемость в тысячные доли квадратного микрометра, а также характерные для этой зоны динамокатагенеза трещиноватые породы.

Внешняя зона имеет ширину 10—80 км и сужается вниз по разрезу вследствие расширения внутренней зоны. Породы во внешней зоне уплотнены и сцементированы гораздо меньше, чем во внутренней. В ней наряду с аргиллитами встречаются аргиллитоподобные глины. Инкорпорационные и микростилолитовые межзерновые контакты в алеврито-песчаных породах наблюдаются редко. Регенерация полевых шпатов проявляется слабо. Максимальная пористость алевролитов и песчаников в зоне колеблется от 18 до 22%, глинистых пород — около 14%.

Явления контактового термального катагенеза широко распространены в пределах Таймырской складчатой области, Сибирской платформы, а также встречаются в пермских и триасовых отложениях мезозойских прогибов арктической части Сибирской платформы [26, 27, 41]. При внедрении интрузий осадочные породы изменяются главным образом под влиянием высоких температур и магматических растворов. Механическое уплотнение наблюдается только на контакте с интрузией. Измененные осадочные породы образуют концентрические зоны вокруг магматических тел. В ближайшей к интрузии зоне алеврито-песчаные породы превращены в роговики и кварциты, глинистые — в сланцы, угли графитизируются. Как правило, коллекторские свойства пород в зоне резко ухудшаются, но иногда обнаруживаются участки, где под механическим воздействием интрузий возникает трещиноватость и где в результате метасоматоза увеличивается емкость пор [29, 116]. Ю. Г. Самойлович [20] описывает случаи притока вод при испытании скважин не только из трещиноватой приконтактовой зоны, но и из самих разбитых трещинами интрузий. Мощность зоны метаморфизованных пород определяется размером интрузий, вещественным составом магмы и вмещающих осадочных отложений, она колеблется от долей метра до первых сотен метров. Наибольшая мощность зоны наблюдается возле крупных дифференцированных интрузий, интенсивность изменения вмещающих пород убывает в ряду песчаники—алевролиты—аргиллиты [29].

В следующей, более удаленной от интрузии зоне степень преобразованности пород значительно слабее. Глинистые разности представлены аргиллитами, в алеврито-песчаных породах происходит интенсивная регенерация кварца, в меньшей степени полевых шпатов, а также серицитизация и хлоритизация глинистого цемента. Такие изменения можно отнести к катагенетическим. Коллектор-

ские свойства в зоне ненамного ниже, чем у отложений, находящихся на той же стадии прогрессивного катагенеза, но не испытавших влияния интрузий. Мощность зоны термального контактового катагенеза не превышает десятков — первых сотен метров. Так, слабо измененные песчаники, которые, вероятно, относятся к данной зоне, А. Б. Гуревич и С. А. Топорец [29] проследили на расстоянии 172—213 м от Талнахской интрузии. Термальный контактовый катагенез имеет локальный характер, однако при прочих равных условиях коллекторские свойства у отложений, насыщенных интрузивными телами, в целом ниже, чем у ненасыщенных или малонасыщенных. Это следует учитывать при сравнительной оценке качества коллекторов в различных регионах.

Динамокатагенез, как и прогрессивный, можно расчленить на межстадиальный, обусловленный действием давлений (и, возможно, в какой-то мере температур), и внутристадиальный, обусловленный перераспределением вещества в растворах. Последствиями межстадиального динамокатагенеза являются уплотнение, взаимное внедрение обломочных зерен и трещиноватость. В результате внутристадиального динамокатагенеза происходит регенерация кварца и полевых шпатов и образуются цеолиты. Не случайно самая интенсивная цеолитизация установлена [92] в песчаниках с наибольшим размером зерен. У термального контактового катагенеза тоже можно выделить оба направления, только в межстадиальном влияние давления практически отсутствует.

Прогнозирование общей минерализации подземных вод. Метод *количественного* прогнозирования общей минерализации подземных вод может быть основан на использовании уравнения вида $M = f(N, \text{АГ})$. В отличие от полученных уравнений (9) и (10) уравнение для прогнозирования необходимо рассчитать по фактическим значениям АГ и на достаточно представительном материале.

В настоящее время при прогнозировании общей минерализации приходится ограничиться *полуколичественным* методом, в основу которого положена установленная для севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба вертикальная гидрохимическая зональность (гл. 3, § 2). Зная или предполагая тенденцию изменения N и АГ на участке прогнозирования, вероятно, значения M можно корректировать по уравнению (9). При прогнозировании общей минерализации необходимо предусмотреть возможность случаев нескомпенсированного нарушения равновесия в системе порода—вода после подтока чужеродных вод. Такие нарушения равновесия можно ожидать вдоль обрамления мезозойских прогибов, на участках, где перетоку вод способствует существование разломов или отсутствие водоупоров.

Поскольку соленость вод, как пористость и плотность, тесно связана с рангами зон межстадиального катагенеза и гранулометрическим составом пород, основные границы резкого изменения общей минерализации прослеживаются по сейсмическим реперам. На Западно-Сибирской плите изменение минерализации в кровле сеноманских песчаников отмечается репером «Г», в кровле келло-

вей-батских песчаников — репером «Б». Высокие значения общей минерализации в баррем-аптской толще на севере плиты приурочены к отражающим площадкам репера «М» в коллекторах, выделяющихся в разрезе своим относительно пониженным содержанием алеврито-глинистого материала.

Граница резкого опреснения вод в валанжин-барремских отложениях фиксируется в западной части Енисей-Хатангского прогиба сейсмическим горизонтом $1^г$. Разница в глубинах залегания границы и сейсмического репера на Нижнехетской, Семеновской, Зимней, Майской, Мессояхской, Соленинской, Пеляткинской, Казанцевской, Озерной и Джангодской площадях не превысила 150 м. Учитывая, что точность отбивки границы обычно составляет 50—150 м, а точность корреляции горизонта $1^г$ между площадями около 50 м, результат сопоставления можно считать вполне удовлетворительным.

Очевидно, основанную на генетической общности близость границ резкого изменения общей минерализации к сейсмическим реперам можно использовать для прогнозирования, причем если стратиграфическое положение реперов изменится на каком-то участке, то контролирующее их значение по отношению к минерализации вод сохранится. Исчезновение того или иного сейсмического репера будет свидетельствовать об отсутствии скачка в изменении общей минерализации по разрезу.

Методы прогнозирования пористости разработаны для Западно-Сибирской плиты, Анабаро-Хатангской седловины, Енисей-Хатангского, Лено-Анабарского и Приверхоянского прогибов, включая части упомянутых структур, приуроченные к акваториям. Метод прогнозирования общей минерализации подземных вод получен для севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба и, вероятно, может быть использован за пределами этих регионов, например в меловой толще центральной части Западно-Сибирской плиты, где содержатся алеврито-глинистые пласты и пачки, способные защитить вышележащие коллекторы от внедрения рассолов из палеозойского фундамента. Положения, установленные в предыдущих главах и послужившие основой описанных методов, могут быть учтены при разработке аналогичных методов прогнозирования в других регионах.

§ 2. Распространение и качество экранированных коллекторов в терригенных верхнепалеозойских и мезозойских отложениях мезозойских прогибов арктической части Сибирской платформы

В данном разделе систематизировано и объяснено распределение тысяч фактических значений пористости и проницаемости и выполнен прогноз коллекторских свойств пород за пределами разбуренных площадей. При систематизации учитывались изложенные выше положения о влиянии катагенеза на физические свойства пород, а для прогнозирования применялся полуколичественный метод. Фактические данные о строении толщ и коллекторских свой-

ствах пород выбирались из работ Е. Г. Бро, П. С. Воронова, М. К. Калинко, М. Е. Каплана, Т. Н. Копыловой, Л. Л. Кузнецова и др. [9, 18, 45, 46, 48, 58, 66]. Однако использованные работы посвящены отдельным частям рассматриваемых регионов, отличающимся по геологическому строению и по степени изученности. В данном разделе сопоставлены и обобщены результаты фрагментарных, разномасштабных и разнонаправленных исследований.

Описание толщ выполнено в рамках крупных возрастных единиц: пермь, триас, отделы юрской и меловой систем. При этом верхнеюрские породы рассматриваются вместе с фациально близкими берриасскими. Из верхнемеловых отложений описываются только сеноман-нижнетуронские, так как вышележащая часть разреза почти целиком расположена в многолетнемерзлой зоне. Лишь в верхнетуронской — сантонской алеврито-песчаной толще (насоновской свите) в западной части Енисей-Хатангского прогиба могут быть встречены локальные покрышки, способные экранировать небольшие залежи типа встреченной на Казанцевской площади. Изменение коллекторских свойств пород прослеживалось в Енисей-Хатангском прогибе и на Анабаро-Хатангской седловине по тысячам определений в керне и по промыслово-геофизическим данным, восточнее — главным образом по десяткам определений в образцах из обнажений.

Описание нефтегазоносных и перспективных толщ ведется сверху вниз — в направлении усиления влияния катагенеза, развития катагенетических преобразований.

Нижне-верхнемеловые ($K_1al_3 — K_2t_1$) отложения распространены в Енисей-Хатангском прогибе. В восточной части и на бортах прогиба они выходят на дневную поверхность и находятся в пределах зоны многолетней мерзлоты. Максимальная глубина залегания наблюдается в западной части прогиба, она равна 1500 м.

В разрезе четко выделяются две толщи. Верхняя, алеврито-глинистая с прослоями песчаников, является региональной покрышкой, возраст ее раннетуронский. Покрышка прослеживается из Западной Сибири, в восточной части Енисей-Хатангского прогиба она опесчанивается и теряет экранирующие свойства. В западной части прогиба мощность ее составляет 44—115 м. Песчанистость (отношение в разрезе суммарной мощности проницаемых пород к общей мощности) на Озерной, Большелайдинской и Сузунской площадях равна 0,5. На площадях, более удаленных от бортов прогиба и валов, песчанистость не больше, чем над Мессояхской и Пеляткинской залежами газа, где она равна 0,3—0,4. Алеврито-глинистые породы сосредоточены главным образом в нижней половине покрышки и выдержанны по простиранию. Дополнительную надежность покрышке придает наличие в составе глин значительных количеств разбухающих компонентов — смешаннослойных минералов с высоким содержанием монтмориллонита.

Нижняя толща алеврито-песчаная, с редкими и невыдержанными по простиранию глинистыми прослоями, является региональным коллектором; возраст ее позднеальбский—сеноманский, мощ-

ность достигает 600 м. Малое содержание цемента (до 6%) и хорошая сортированность (до 2,0) у алевролитов и песчаников, а также слабое катагенетическое преобразование пород обусловливают высокие емкостные и фильтрационные свойства регионального коллектора. В его прикровельной части пористость и проницаемость несколько снижаются вследствие увеличения содержания алеврито-глинистой фракции. Поэтому средние показатели по разрезу (пористость 15%, проницаемость 0,05 мкм^2) значительно отличаются от наилучших (пористость 35%, проницемость 1,258 мкм^2). На бортах и валах прогиба, где покрышка размыта, и в восточной части прогиба, где нижнетуронские отложения опесчанены, региональный коллектор может быть экранирован многолетнемерзлыми породами [8].

Наиболее благоприятные условия для образования ловушек углеводородов существуют в удалении от бортов и валов западной части Енисей-Хатангского прогиба, где коллектор сеноманской толщи перекрыт нижнетуронской покрышкой и где рассматриваемые отложения не затронуты многолетней мерзлотой.

Нижнемеловые ($K_1v - al_{1-2}$) отложения распространены по всем рассматриваемым регионам. Подошва толщи погружена на глубину более 1000 м в Енисей-Хатангском прогибе, в Нижнеленской впадине и в восточной части Приверхоянского прогиба, максимальная глубина залегания в перечисленных структурах равна соответственно 3500, 2000 и 4500 м. Значительная часть отложений, залегающая на малых глубинах, расположена в зоне многолетней мерзлоты. В направлении погружения пластов увеличиваются мощности: в Енисей-Хатангском прогибе и Нижнеленской впадине они достигают 3000, в Приверхоянском прогибе — 4500 м.

Основной общей особенностью строения толщи является увеличение вверх по разрезу песчанистости за счет увеличения мощности и частоты встречаемости песчаных прослоев. В том же направлении возрастает медианный диаметр зерен обломочных пород. В Енисей-Хатангском прогибе, на Анабаро-Хатангской седловине и в западной части Лено-Анабарского прогиба наибольшее количество алеврито-глинистых пачек приурочено к валанжин-готеривским отложениям, в восточной части Лено-Анабарского прогиба и в Приверхоянском прогибе — только к нижневаланжинским. Многие пачки выдержанны по простиранию и прослеживаются зонально.

Детальнее всего изученная в западной части Енисей-Хатангского прогиба наиболее глинистая часть разреза содержит до 16 алеврито-глинистых пачек, переслаивающихся с алеврито-песчаными [66], мощность их достигает 70 м. Чередование пород благоприятно для формирования залежей углеводородов, так как каждый ритм заканчивается наиболее проницаемыми и перекрывается наименее проницаемыми разностями. Существование в верхневаланжин-готеривской (суходудинской) продуктивной толще газоконденсатных залежей наилучшим образом рекомендует экранирующие свойства алеврито-глинистых пачек. Количество и мощность

покрышек увеличиваются с мощностью нижнемеловой толщи — от бортов и валов к приосевой части прогиба. Но в наиболее погруженных частях Енисей-Хатангского прогиба и в восточной его половине валанжинские отложения оглиниваются, количество и мощность песчаных пачек сокращаются и увеличивается содержание в них алеврито-глинистой фракции.

В верхней, относительно более песчанистой части нижнемелового разреза алеврито-глинистые пачки встречаются главным образом в угленосных свитах, они не выдержанны по простиранию и могут служить лишь локальными покрышками. Так, в западной части Енисей-Хатангского прогиба выделяется зона, где от трети до половины разреза яковлевской свиты сложено алеврито-глинистыми породами. На Соленинской и Озерной площадях под нижними пачками алеврито-глинистых пород свиты установлены залежи газа.

Коллекторы представлены пачками алеврито-песчаных пород мощностью десятки и сотни метров. Заложенное в период седиментации уменьшение медианного размера зерен вниз по разрезу и влияние прогрессивного катагенеза обусловили некоторое ухудшение коллекторских свойств алеврито-песчаных пород с глубиной. Но породы нижнемеловой толщи залегают главным образом в зонах начального катагенеза ($N=1\div3$), поэтому пористость их достигает 20—30%, проницаемость — десятых и сотых долей квадратного микрометра. В центральной части Енисей-Хатангского прогиба, где РОВ в основании разреза, вероятно, находится на газовой стадии углефикации, максимальная пористость снижается до 17%, проницаемость — до тысячных долей квадратного микрометра. Свойства поровых коллекторов сохраняются только у песчаников с малым содержанием цемента.

В восточной части Лено-Анабарского прогиба и в Приверхоянском прогибе кроме прогрессивного катагенеза в формировании коллекторских свойств нижнемеловых отложений принимал участие динамокатагенез. Несмотря на значительное уплотнение и цеолитизацию пород, во внешней зоне динамокатагенеза встречаются алеврито-песчаные разности с пористостью, равной 22%. Во внутренней зоне дифференциация коллекторских свойств по зонам прогрессивного катагенеза подавлена и стерта мощным влиянием динамокатагенеза. Пористость здесь резко снижается и не превышает 8%.

Оценивая коллекторские и экранирующие качества нижнемеловых отложений, в первую очередь необходимо, очевидно, исключить из рассмотрения выведенную к дневной поверхности толщу, которая сложена мерзлыми породами. Из оставшихся после такого исключения участков наиболее благоприятными для формирования залежей литологическими параметрами обладает западная часть Енисей-Хатангского прогиба. Здесь в баррем-альбских отложениях известны примерно такие же коллекторы и покрышки, как в восточной части Лено-Анабарского прогиба и в Приверхоянском прогибе, однако в валанжин-готеривских отложениях содержится больше алеврито-глинистых пачек, способных служить покрышками, и

алеврито-песчаные пачки характеризуются в целом более высокими коллекторскими свойствами.

Верхнеюрские — нижнемеловые ($J_3 - K_1br$) осадки накапливались во всех регионах, но впоследствии были размыты на наиболее контрастных структурах. От Анабаро-Хатангской седловины они погружаются на запад и восток. В Енисей-Хатангском прогибе они залегают на глубине до 4800 м, в Приверхоянском — до 5000 м. Мощность возрастает в направлении погружения и, вероятно, достигает в Енисей-Хатангском прогибе 1300, в Приверхоянском — 600 м.

На территории от Енисея до Лены рассматриваемая толща сложена преимущественно алеврито-глинистыми породами с высокими экранирующими свойствами. В средней части разреза содержится алеврито-песчаная пачка с прослоями конгломератов оксфорд-кимериджского возраста. Мощность этого регионального коллектора в западной части Енисей-Хатангского прогиба колеблется от 0 до 200 м, песчанистость около 0,7—0,8. Восточнее Рассохинского вала в пачке повышается содержание алеврито-глинистого материала, а мощность сокращается до первых метров. На большей части описываемой территории алеврито-песчаные породы залегают в зонах начального катагенеза, где проблемы коллекторов не существует, но на наиболее погруженных участках Енисей-Хатангского прогиба, в верхней зоне глубинного катагенеза ($N=4$), максимальная пористость снижается до 17%, проницаемость — до тысячных долей квадратного микрометра. Способность коллектора вмещать углеводороды, а покрышки экранировать подтверждена существованием Нижнехетского газового месторождения.

В Приверхоянском прогибе верхнеюрские — берриасские отложения представлены менее мористыми фациями. Песчанистость их возрастает в южном и восточном направлениях. Пачки алеврито-глинистых пород не выдержаны по простиранию и прослеживаются не более чем в пределах локальных участков. Во внешней зоне динамокатагенеза максимальная пористость песчаников равна 22%, во внутренней — 8%. Лишь содержащиеся в разрезе прослои гравелитов могут противостоять высоким давлениям и сохранить более высокую емкость пор.

Таким образом, наилучшими экранирующими и коллекторскими показателями характеризуется западная часть Енисей-Хатангского прогиба. Восточнее, вплоть до Приверхоянского прогиба, верхнеюрская — берриасская толща не содержит коллекторов хорошего качества и частично залегает в многолетнемерзлой зоне. В Приверхоянском прогибе возникают трудности с выделением надежных и выдержанных экранов.

Среднеюрские отложения распространены по всем регионам. Так же, как и верхнеюрские, они погружаются на запад и восток от Анабаро-Хатангской седловины. Максимальная глубина залегания их в Енисей-Хатангском прогибе составляет 6000 м, мощность 1200 м, в Приверхоянском прогибе глубина около 5700 м, мощность 700 м.

Выделяются три типа разрезов. Один из них, распространенный на Анабаро-Хатангской седловине и в восточной части Лено-Анабарского прогиба, практически не содержит коллекторов. Второй известен в западной части Лено-Анабарского прогиба. Здесь верхняя часть батского яруса мощностью 100—150 м сложена алевритопесчаными породами с песчанистостью 0,5—0,8 и под многолетнемерзлой зоной способна служить коллектором. Ниже отложения представлены преимущественно алевритово-глинистыми разностями и могут быть отнесены к экранам. Третий тип разреза характерен для Енисей-Хатангского и Приверхоянского прогибов. В нем алевритово-песчаные батская (местами байос-батская) и верхнеааленская толщи переслаиваются с алевритово-глинистыми байосской и нижнеааленской. Алевритово-песчаные толщи являются региональными коллекторами, алевритово-глинистые — региональными покрышками. Енисей-хатангские разрезы более глинистые, чем приверхоянские (особенно южные), и покрышки там, вероятно, надежнее. Коллектор батского возраста экранирован алевритово-глинистыми породами верхней юры, размытыми полностью только на наиболее контрастных структурах. В Енисей-Хатангском прогибе непосредственно под ними открыта газовая залежь на Зимней площади.

Доля отложений, расположенных в зонах начального прогрессивного катагенеза, здесь заметно меньше, чем у описанных ранее толщ. В прогибах, в удалении от бортов и валов, алевритово-песчаные коллекторы средней юры залегают в верхней зоне глубинного катагенеза, в которой максимальные значения пористости не превышают обычно 17%, а проницаемость — тысячных долей квадратного микрометра. В Центральнотаймырском мегапрогибе нижняя часть толщи залегает даже в средней зоне глубинного катагенеза ($N=5$), где только песчаники средне-мелкозернистые и мелко-среднезернистые сохраняют пористость до 13%. Во внешней зоне динамокатагенеза пористость песчаников не превышает 22, во внутренней зоне — 8%.

Сравнивая регионы с разными типами разрезов, предпочтение, естественно, следует отдать Енисей-Хатангскому прогибу и внешней зоне динамокатагенеза в Приверхоянском прогибе. В этих регионах два мощных региональных коллектора перекрыты региональными покрышками.

Нижнеюрские отложения еще резче, чем вышележащие, погружаются на запад и восток от Анабаро-Хатангской седловины. В Енисей-Хатангском прогибе глубина погружения достигает 7500, в Приверхоянском — 6500 м. В направлении погружения увеличивается мощность в Енисей-Хатангском прогибе до 1500, в Приверхоянском — до 800 м.

Нижнеюрские отложения в целом содержат большое количество алевритово-глинистого материала. Разрезы, в строении которых заметную роль играют песчаники, типичны для западной части Енисей-Хатангского прогиба и Приверхоянского прогиба. Между названными районами в восточном направлении наблюдается оглинивание разрезов, и в восточной части Лено-Анабарского прогиба

нижнеюрские отложения практически не содержат коллекторов. Как показано в предыдущем разделе, отсутствие коллекторов в юго-западной половине Балахнинского вала обусловлено не столько палеогеографическими условиями, сколько влиянием катагенеза.

Общей чертой разрезов западной части Енисей-Хатангского прогиба и Приверхоянского прогиба является преобладание алеврито-песчаных пород в нижнеплинсбахском подъярусе. Основные особенности западных разрезов заключаются в следующем. Здесь намечается падение песчанистости отложений в направлении погружения. Толща имеет трехчленное строение: преимущественно алеврито-песчаные зимняя ($I_1h - p_1$) и джангодская ($I_1p_2^2 - tr$) свиты, которые можно считать зональными коллекторами, разделены алеврито-глинистой левинской свитой ($I_1p_2^1$), которая в отличие от коллекторов прослеживается по всему прогибу и, вероятно, способна служить региональной покрышкой. Песчанистость покрышки не превышает 0,1. Мощность коллекторов и покрышки — сотни метров. Коллектор джангодской свиты экранирован алеврито-глинистыми нижнеааленскими породами средней юры. Для восточных разрезов характерно увеличение размера обломочных зерен пород в восточном и южном направлениях. Здесь в алеврито-глинистой толще выделяется один алеврито-песчаный региональный коллектор раннеплинсбахского возраста мощностью 100—200 м.

Нижнеюрская толща погружается круче и глубже, чем вышележащие, и поэтому достигает более высоких стадий прогрессивного катагенеза, а площади распространения алеврито-песчаных пород с высокими коллекторскими свойствами сужаются, образуя полосы вдоль бортов и валов Енисей-Хатангского прогиба. Около половины площади распространения толщи в прогибе погружено в верхнюю зону глубинного катагенеза, где встречаются коллекторы с пористостью не выше 17% и с проницаемостью не выше тысячных долей квадратного микрометра. В Центральнотаймырском мегапрогибе на глубине более 4500—5000 м толща залегает в средней зоне глубинного катагенеза. В этой зоне межзерновая пористость редко превышает 8—10%, а проницаемость — тысячные доли квадратного микрометра. Степень уплотнения пород в зоне примерно такая же, как во внутренней зоне динамокатагенеза, и, видимо, такая же повышенная трещиноватость. Тогда условия для формирования (и эксплуатации) залежей углеводородов могут обеспечить межзерновая пористость и трещинная проницаемость.

Влияние складчатости во внешней зоне динамокатагенеза Приверхоянского прогиба наложилось на более высокую, чем в перекрывающих отложениях, стадию прогрессивного катагенеза. Поэтому пористость в зоне не превышает 16%. Во внутренней зоне максимальная пористость 8%.

При наличии в нижнеюрских отложениях (с учетом перекрывающих юрских толщ) мощных региональных покрышек с низкой песчанистостью ощущается дефицит хороших коллекторов. Наилуч-

шими емкостными и фильтрационными свойствами обладают преимущественно алеврито-песчаные свиты, мало измененные катагенезом на валах и бортах западной части Енисей-Хатангского прогиба.

Триасовые отложения развиты в рассматриваемых регионах повсеместно. На Анабаро-Хатангской седловине, в Лено-Анабарском прогибе и на бортах Енисей-Хатангского и Приверхоянского прогибов глубины залегания триасовых отложений менее 2000—3000 м. Погружаясь в приосевой части Енисей-Хатангского и Приверхоянского прогибов соответственно на запад и юг, отложения достигают глубин 7000—8000 м. Мощность отложений, изменяясь в интервале 400—2000 м, увеличивается от окраины Сибирской платформы на север и на восток.

Для разрезов триасовых отложений характерно переслаивание алеврито-песчаных и алеврито-глинистых пачек, которые обычно трудно проследить в пределах крупных структур. Наибольшее содержание алеврито-песчаных пород наблюдается в разрезах Анабаро-Хатангской седловины и южной части Приверхоянского прогиба. По мере удаления от названных регионов разрезы оглиниваются и уменьшается медианный размер псаммитового материала. Выделяется своей повышенной глинистостью оленекский ярус мощностью от десятков до первых сотен метров, он почти целиком сложен алеврито-глинистыми породами. Очевидно, его следует считать региональной покрышкой. В основании карнийского яруса находится алеврито-глинистая пачка мощностью около 20 м. Она прослеживается на Анабаро-Хатангской седловине и в Лено-Анабарском прогибе в пределах развития верхнетриасовых отложений. Непосредственно под покрышкой известны нефтепроявления, а на Нордвикской площади небольшая залежь нефти.

Оценивая строение толщи с позиции распределения в ней коллекторов, можно выделить три территории. В связи с оглиниванием разреза в Енисей-Хатангском прогибе алеврито-песчаные породы занимают подчиненное положение, и скопления углеводородов можно ожидать только в локальных коллекторах. Регионы, расположенные восточнее, характеризуются наличием мощных выдержанных по простиранию коллекторов в среднем и верхнем триасе, а на севере Лено-Анабарского прогиба (судя по улахан-юряхскому разрезу) — и в индском ярусе нижнего триаса.

Коллекторские свойства триасовых отложений, как и вышележащих мезозойских, контролируются главным образом гранулометрическим составом пород и интенсивностью межстадиального катагенеза. Поэтому в разрезах на Малохетском и Рассохинском валах, где преобладают алеврито-глинистые породы, максимальные значения пористости не достигают полученных в этой же зоне катагенеза для песчаников — 17%. На разведочных площадях Тигяно-Анабарского вала в разрезе триасовых отложений проходит граница верхней и нижней зон начального прогрессивного катагенеза. Выше границы пористость песчаников достигает 32%, проницаемость — десятых долей квадратного микрометра, а ниже пористость не превышает 23%, проницаемость обычно измеряется сотыми долями

квадратного микрометра, причем вверх по разрезу оленекско-ладинских и карнийско-рэтских отложений с увеличением медианного диаметра зерен и уменьшением содержания алеврито-глинистого материала улучшаются коллекторские свойства. В результате на границе ладинского и карнийского ярусов возникло благоприятное для накопления углеводородов сочетание коллектора и покрышки. В зоне активного влияния Таймырской и Верхоянской складчатых областей пористость, как правило, не превышает 8%. Резкое ухудшение коллекторов вблизи инъективных и дизъюнктивных дислокаций носит локальный характер и не распространено далее десятков метров.

Сочетание коллекторов и покрышек наблюдается в восточных регионах. Возможно, к ним относится восточная часть Енисей-Хатангского прогиба. Но в Енисей-Хатангском и Приверхоянском прогибах триасовые породы залегают на столь больших глубинах и так изменены под влиянием катагенеза, что поровые коллекторы могут быть обнаружены только на сводах валов. Кроме аргиллитов экранировать залежи здесь способны измененные под действием катагенеза алевролиты и глинистые песчаники. Наилучшими коллекторскими свойствами, при наличии к тому же региональных покрышек, отличаются триасовые отложения Анабаро-Хатангской седловины и западной части Лено-Анабарского прогиба. Дополнительным экраном для них может послужить насыщенная алеврито-глинистыми породами юрская толща.

Пермские отложения установлены в восточных регионах. На Анабаро-Хатангской седловине, в Лено-Анабарском прогибе и у северной окраины Приверхоянского прогиба пермские отложения залегают не глубже 3000—4000 м; погружаясь на запад в Енисей-Хатангском прогибе и на юг — в Приверхоянском, они вместе с терригенными породами каменноугольной системы достигают глубин 8000—11000 м. Мощность терригенного верхнепалеозойского комплекса увеличивается с удалением от окраин Сибирской платформы. На южном борту прогибов она равна 300—800 м, в пределах Таймырской и Верхоянской складчатых областей возрастает до нескольких тысяч метров.

Весь разрез пермских отложений представлен ритмично чередующимися пачками алеврито-песчаных и алеврито-глинистых пород. Количество последних увеличивается в направлении увеличения мощности пермской толщи. На изученных бурением северных участках Анабаро-Хатангской седловины выделено 36 песчаных пачек (горизонтов) [45]. На Сындасской площади, где пермские отложения вскрыты до кунгурского яруса включительно, намечено [18] всего 19 песчаных пачек, на южном борту Лено-Анабарского прогиба подобных пачек прослеживается 7 [58]. Опесчанивающийся снизу вверх разрез расчленяется на три цикла: терригенный каменноугольный — артинский, кунгурский и верхнепермский. Верхний из них дополняется индским ярусом триаса. В каждом цикле снизу вверх увеличиваются мощность и частота встречаемости песчани-

ков; а в основании содержатся наиболее глинистые и наиболее выдержанные по простиранию пачки.

В основании верхнепермского цикла на Анабаро-Хатангской седловине и в Лено-Анабарском прогибе прослеживается алевритоглинистая покрышка с песчанистостью обычно около 0,1—0,2 и мощностью от десятков до первых сотен метров. Непосредственно под ней наблюдается повышение продуктивности коллекторов, и на Южно-Тигянской площади открыта небольшая залежь нефти. В основании кунгурского цикла трудно прокоррелировать единую экранирующую толщу, но наличие пусть даже не выдержанных по простиранию регионально алеврито-глинистых пачек создает условия для относительного увеличения под ними продуктивности коллекторов.

Коллекторские свойства пермских пород в пределах рассматриваемых регионов значительно изменяются, в первую очередь в зависимости от расположения в различных зонах прогрессивного катагенеза и динамокатагенеза. На приплатформенных крыльях Анабаро-Хатангской седловины (Сындасская площадь), Лено-Анабарского прогиба (Оленекское месторождение битумов) и, вероятно, Приверхоянского прогиба, где породы находятся в верхней зоне начального прогрессивного катагенеза, максимальная пористость равна 30—33%, а проницаемость — десятым долям и единицам квадратных микрометров. В северной части Анабаро-Хатангской седловины отложения верхней и частично нижней перми находятся в нижней зоне начального катагенеза, а нижней перми — в верхней зоне глубинного катагенеза. Соответственные максимальные значения пористости 24 и 17%, а проницаемости — от десятых до тысячных долей квадратного микрометра. По-видимому, такие же коллекторские свойства можно ожидать у пород в центральной части Рассохинского и северной — Балахнинского валов. В наиболее погруженных частях Енисей-Хатангского и Приверхоянского прогибов распространены малопористые коллекторы и мощные, но, возможно, трещиноватые покрышки.

В восточной части Лено-Анабарского прогиба, в Приверхоянском прогибе и на северном борту Енисей-Хатангского прогиба в результате значительного уплотнения и цеолитизации пород во внешней зоне динамокатагенеза пористость песчаников обычно не превышает 16, во внутренней зоне — 8%. Однако наряду с интенсивно уплотненными породами даже во внутренней зоне встречаются изредка разности с пористостью до 14—16%. Так, Т. М. Емельянцев и др. [40] отмечают повышенные коллекторские свойства базального песчаного горизонта в пермских отложениях на Булкурской антиклинали. При среднем значении в разрезе около 3% пористость базального горизонта равна 5%, а в единичном образце достигает 14,4%. В прискладчатых регионах, где перспективы нефтегазоносности ограничены отсутствием хороших поровых коллекторов, упомянутое и ему подобные исключения из правила вызывают особый интерес и требуют детального изучения.

Изменение коллекторских свойств хорошо согласуется с цикличностью. В разрезе каждого цикла снизу вверх возрастает медианный диаметр зерен, поэтому, например, на Нордвикской площади проницаемость песчаников в кровле артинского цикла (горизонт XVI) достигает 0,061 мкм^2, а проницаемость песчаников, встречающихся в основании казанского, не превышает десятитысячных долей квадратного микрометра, хотя обе части разреза расположены в одной (нижней) зоне начального прогрессивного катагенеза. Влияние гранулометрического состава можно также показать, сравнивая верхнепермские отложения на Южно-Тигянской и Нордвикской площадях, где максимальные значения пористости соответственно 17 и 22%. На первой из упомянутых площадей в разрезе содержится больше алеврито-глинистого материала и поэтому коллекторы хуже. В результате совместного влияния гранулометрического состава и межстадиального катагенеза коллекторские свойства пород улучшаются вверх в целом по разрезу и внутри каждого цикла. На локальных участках отрицательное влияние на коллекторские свойства пород Енисей-Хатангского прогиба и Анабаро-Хатангской седловины оказали интрузии, соляные штоки и, вероятно, разрывные нарушения.

В Енисей-Хатангском и Приверхоянском прогибах пермские отложения находятся на труднодоступных для бурения глубинах. Между обеими структурами наиболее благоприятное сочетание условий, влияющих на качество коллекторов и покрышек, существует в юго-западной части Лено-Анабарского прогиба. По сравнению с Анабаро-Хатангской седловиной здесь уменьшается роль дизъюнктивных проявлений, по сравнению с восточной частью Лено-Анабарского прогиба уменьшается роль динамокатагенеза.

Заканчивая раздел, можно отметить, что изложенные результаты оценки и прогнозирования коллекторских свойств терригенных верхнепалеозойских и мезозойских отложений были использованы при выборе направления поисковых и разведочных работ на нефть и газ в прогибах и при подсчете прогнозных запасов углеводородов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование влияния прогрессивного катагенеза на систему порода—вода позволяет выделить два направления преобразований. Первое, межстадиальное, включает общие тенденции изменения всех разностей пород и насыщающих их вод вниз по разрезу, по зонам, РОВ которых находится на последовательных стадиях углефикации. Межстадиальный катагенез приводит к уплотнению пород, сужению диапазона минеральных разностей, опреснению вод и обогащению их продуктами выщелачивания. Второе, внутристадиальное, направление катагенеза объединяет дифференцированные, избирательные, зависящие от особенностей вещественного состава пород и минерализации подземных вод изменения системы в пределах каждой из зон, где РОВ находится на одной стадии углефикации. Внутристадиальный катагенез связан с растворением вещества в наиболее жестких термобарических условиях, с переносом его в растворах и переотложением в менее жестких условиях.

Перераспределение вещества регулируется гранулометрическим составом пород. Отжатие маломинерализованных связанных вод из уплотняющихся в первую очередь глинистых пород сопровождается выносом продуктов выщелачивания. Песчаные породы лучше, чем глинистые, противостоят уплотнению, растворение идет только на контактах обломочных зерен, а в межзерновом пространстве из растворов с относительно высокой минерализацией образуются аутигенные минералы, поры заполняются вторичным цементом. Внутристадиальный катагенез является продолжением диагенеза: перераспределение вещества связано с фильтрацией растворов и неравномерным уплотнением вначале осадка, а затем — породы.

Мерой интенсивности межстадиального катагенеза могут служить значения глубины залегания, пластовой температуры, показателя преломления витринита, рангов зон, доли контактов внедрения обломочных зерен от общего числа контактов. Мерой интенсивности внутристадиального катагенеза могут служить контролирующие размер и форму пор, расход растворов структурные признаки, такие, как содержание алеврито-глинистой, глинистой фракций и медианный диаметр зерен.

На Западно-Сибирской плите, в мезозойских прогибах арктической части Сибирской платформы и в других регионах под влиянием межстадиального катагенеза в интервале зон 1—5 помимо

увеличения показателя преломления витринита и доли контактов внедрения зерен от общего числа контактов происходит вдавливание обломков глинистых пород в поровое пространство между более прочными зернами, разложение полевых шпатов, гидрослюдизация монтмориллонита и каолинита. Гидрослюдизация монтмориллонита становится заметной в зоне 3, где РОВ находится на длиннопламенной стадии углефикации, и нарастает вниз по разрезу. В зоне 4, где РОВ достигает газовой стадии, монтмориллонит сохраняется практически только в составе смешаннослойных образований. Гидрослюдизация каолинита обнаруживается начиная с зоны 4. Хлоритизация глинистой массы не наблюдается: вероятно, процесс набирает силу в зонах, где углефикация РОВ превышает жирную стадию.

Под влиянием внутристадиального катагенеза в ряду литологических разностей от глин и аргиллитов до мелко-среднезернистых песчаников происходит каолинизация хлорита, монтмориллонита и, вероятно, полевых шпатов, регенерация зерен кварца и многократное переотложение карбонатов. Основная масса хлорита перерабатывается в каолинит в зонах 1—2. Максимум каолинизации широкого набора минералов приходится на зону 3, начало зоны 4. С дальнейшим увеличением ранга зон каолинизация слабеет, подавленная гидрослюдизацией под влиянием межстадиального катагенеза.

Влияние катагенеза на минерализацию подземных вод в юрско-меловой толще севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба представлено межстадиальным и внутристадиальным направлениями, поэтому опреснение и пополнение солевого состава контролируются рангами зон и структурой коллекторов. Основные изменения минерализации под влиянием катагенеза заключаются в том, что с увеличением стадии преобразования пород и содержания в них алеврито-глинистого материала (или с уменьшением медианного диаметра обломочных зерен) заметно уменьшается в водах концентрация $K^+ + Na^+$, Mg^{2+}, Cl^-, Br^-, менее заметно — Ca^{2+}, I^- и несколько увеличивается концентрация $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ H_2SiO_3.

Полученные в результате исследования связей между различными характеристиками коллекторов и вод уравнения вида $K_п = f(N, АГ)$ и $M = f(N, АГ)$ описывают в наиболее рациональной форме зависимость пористости и общей минерализации от геологических условий. Коэффициент множественной корреляции колеблется от 0,93 до 0,97, т. е. зависимость близка к функциональной. В обоих уравнениях N передает в рангах зон влияние межстадиального катагенеза. Вторая независимая переменная, содержание алеврито-глинистого материала в коллекторах — АГ, в уравнении вида $K_п = f(N, АГ)$ несет информацию о седиментации, возможно, о диагенезе и совершенно определенно о внутристадиальном катагенезе. В уравнении вида $M = f(N, АГ)$ АГ не отражает влияние седиментации и, скорее всего, диагенеза тоже. Исследования в об-

разцах пород, в пластах и толщах показали, что на пористость сильнее влияет межстадиальный, а на общую минерализацию внутристадиальный катагенез. Подземная вода является не только непременным участником, но и продуктом внутристадиальных преобразований.

Первоначальная минерализация погребенных с осадками вод седиментационных бассейнов настолько изменена под влиянием катагенеза, что теперь воды, насыщающие коллекторы, в основном характеризуют вещественный состав и степень преобразованности пород. Выявленное на севере Западно-Сибирской плиты и в Енисей-Хатангском прогибе пространственное изменение общей минерализации совершенно не увязывается со сложившимися представлениями о солености вод древних бассейнов. Так, в наиболее пористых верхнеюрских—валанжинских и туронских отложениях коллекторы насыщены самыми маломинерализованными водами.

Очевидно, катагенетической переработке могут подвергнуться не только седиментационные воды. Иначе зависимость общей минерализации и основных слагающих ее компонентов от рангов зон катагенеза и гранулометрического состава коллекторов была бы существенно искажена опреснением водами, отжатыми из глинистых толщ и возрожденными в результате минеральных преобразований, поступлением биогенных вод, появляющихся при разложении органического вещества, добавлением конденсационных вод, которые выделяются из мигрирующих через водоносные пласты газов, проникновением инфильтрационных вод, промывавших в прошлом обнаженные породы, оттеснением соленых вод многолетней мерзлотой и т. д. Можно предположить, что поступление перечисленных вод очень растянуто во времени и вода, пришедшая в коллекторы, успевает приспособиться к ним, уравновешивается с вещественным составом пород. По-видимому, обусловленные погружением пород сдвиги в системе порода—вода вызывают ответные реакции, направленные на уравновешивание в новых условиях.

Юрские и меловые отложения севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба можно считать удачными объектами для изучения катагенетического изменения подземных вод, потому что здесь, как показал анализ геолого-геофизических данных на разведочных площадях, крайне редко нарушается равновесие в системе порода—вода. Отдельные нескомпенсированные аномалии объясняются подтоком рассолов в юрские, реже валанжинские коллекторы из палеозойского фундамента, инфильтрацией атмосферных вод на окраинах рассматриваемых регионов и техническим браком при испытании скважин. Равновесие в системе порода—вода, вероятно, можно ожидать в меловых отложениях южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна, а также в Южно-Каспийском, Сахалинском и других бассейнах.

Каротажные записи отражают катагенетические преобразования системы порода—вода. Поэтому они были привлечены для разработки методов количественной оценки минерализации подземных вод, пористости водоносных коллекторов и содержания в них алев-

рито-глинистого материала. То обстоятельство, что из одних и тех же промыслово-геофизических данных удалось извлечь перечисленные сведения, свидетельствует в пользу существования единой уравновешенной системы, где все определяемые показатели косвенно связаны между собой. Отсюда следует, что нарушение равновесия в системе можно обнаружить по отклонениям значений, рассчитанных с помощью методов, от фактических.

Терригенные поровые коллекторы, из которых добываются минерализованные воды, жидкие и газообразные углеводороды, существуют только на ранних стадиях катагенетического преобразования. В слабо измененных катагенезом породах в формировании пористости и проницаемости коллекторов и минерализации подземных вод принимает участие широкий спектр литологических разностей. Ниже по разрезу спектр постепенно сужается за счет последовательного уменьшения вклада интенсивно консолидированных и обезвоженных пород. В результате уплотнения и цементации закрываются в первую очередь мелкие поры, исчезновение которых заметнее отражается на пористости, чем на проницаемости. В отложениях зоны 4, где РОВ достигло газовой стадии углефикации, все глинистые породы превращаются в аргиллиты, алевролиты практически теряют свойства гранулярных коллекторов и основное влияние на минерализацию воды, которая извлекается при испытании, оказывают песчаники. С дальнейшим повышением ранга зон катагенеза роль гранулометрического состава в изменении емкостных и фильтрационных свойств коллекторов и минерализации подземных вод утрачивает значение. Вниз по разрезу увеличивается влияние межстадиального катагенеза и уменьшается — внутристадиального.

На разрезах по разведочным площадям рассматриваемых регионов колебание линий максимальных значений M и $K_п$ обусловлено ритмичностью в изменении гранулометрического состава пород, слагающих коллекторы. С увеличением ранга зон межстадиального катагенеза колебание линий постепенно затухает. Причем затухание колебаний по значениям пористости происходит быстрее на более ранних стадиях катагенеза, чем затухание колебаний по значениям общей минерализации.

Выявленные в работе закономерности позволяют не только объяснить и систематизировать сведения о минерализации подземных вод, коллекторских свойствах пород и электрокаротажных показателях, но и прогнозировать их с учетом влияния катагенеза.

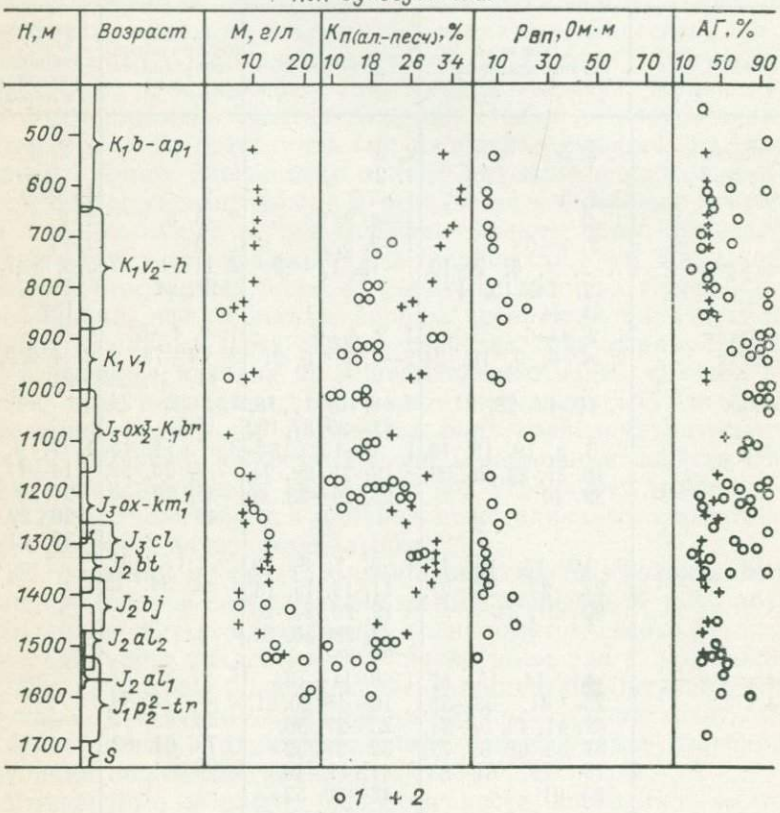
ПРИЛОЖЕНИЕ

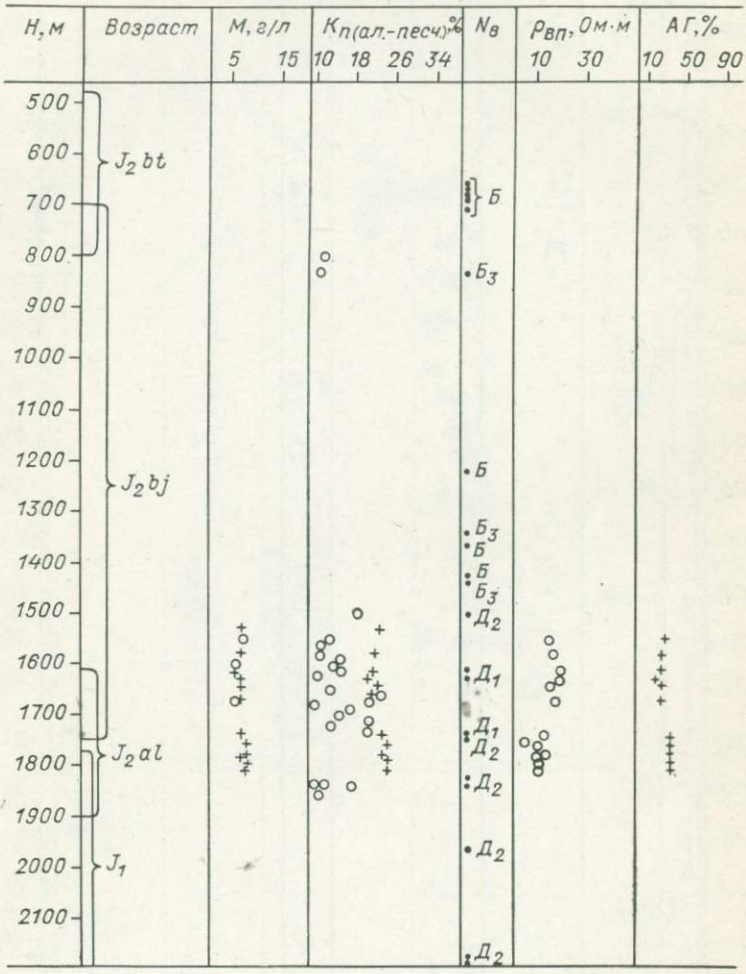
Изменение литологических характеристик, степени углефикации РОВ, физических свойств пород и минерализации подземных вод по разрезу на поисково-разведочных площадях севера Западно-Сибирской плиты и Енисей-Хатангского прогиба.

Параметры: *1* — фактические; *2* — расчетные.

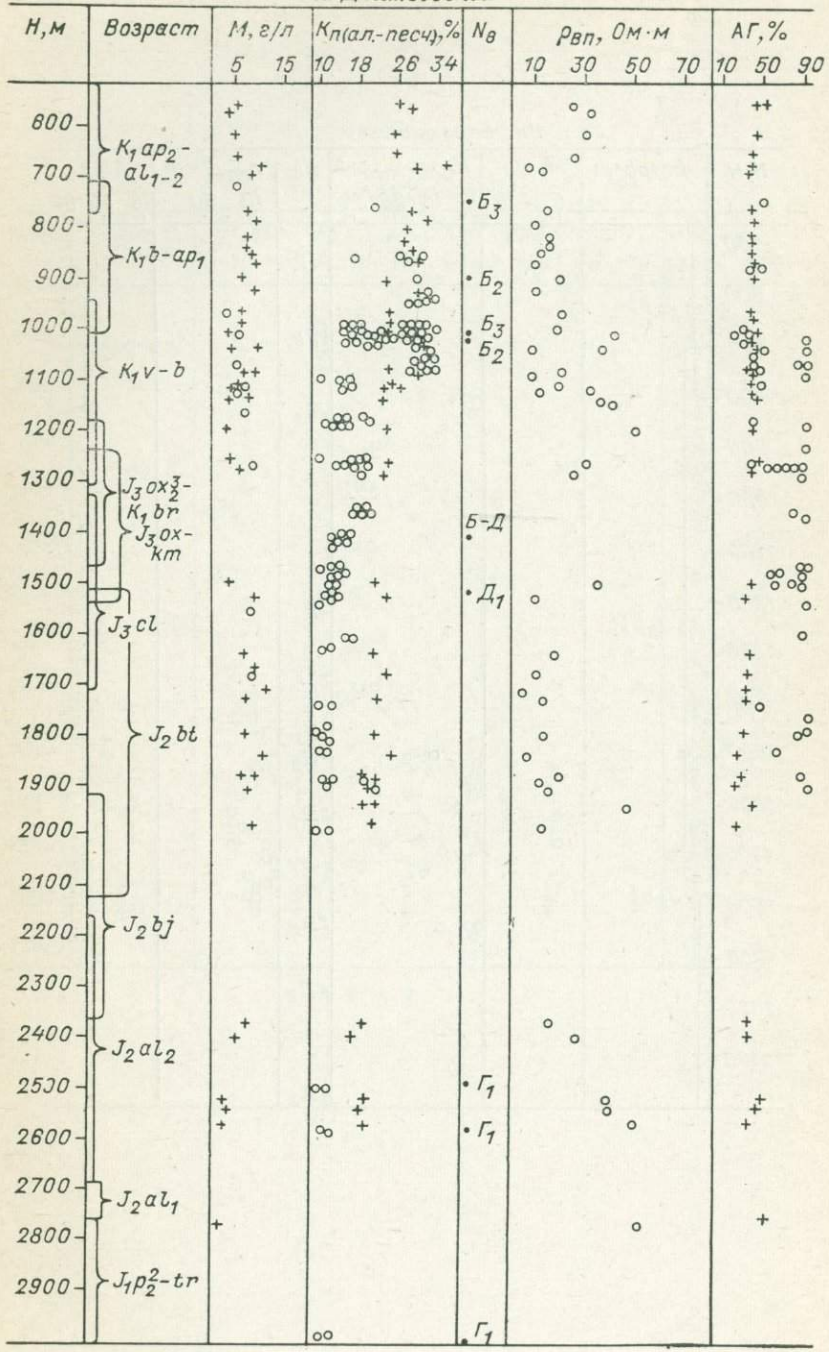
Фактические определения (номера скважин)

Площадь	Общая минерализация	Пористость	Удельное электрическое сопротивление	Содержание алеврито-глинистого материала в породах
Суходудинская	1, 2, 3	2, 3	2	1, 2, 3
Балахнинская	2	1, 2	2, 4	—
Джангодская	2, 3, 5	1—5	1, 2	1, 3—5
Озерная	2—9	1—6, 8, 9	2—6, 8, 9	1, 2
Зимняя	1, 2, 4—6	1—3, 5, 6	1—3	1—6
Соленинская	1, 2, 4, 5, 7—10, 12, 14, 15, 17—21, 24	1—15, 17—22	2, 11—13, 17, 21, 24	2, 3, 5—7, 10, 14, 17—19, 138
Казанцевская	1, 2, 4—6	1, 2, 4—6	1, 2, 4—6	4—6
Арктическая	2, 4, 5, 9, 10, 21	2—7, 9, 10, 21	2, 4—7, 9, 11, 21, 22	2—4, 6, 9, 10, 21
Ямбургская	1, 10, 14, 22, 24	1—8, 10—15, 18, 21—27, 37, 102	1, 22, 24, 102	—
Тазовская	2, 3, 5, 10, 13, 16, 18, 21, 24, 26, 33, 39, 40	1, 3—13, 15—19, 21, 22, 24, 25, 29—33, 40	3, 7, 14, 15, 17, 20, 22, 26, 29, 33, 40	4, 7, 8, 11, 14—17, 19, 21, 22, 24—26, 29, 30, 32, 40
Медвежья	6, 10, 13, 15, 17, 22, 23, 25—27, 29—31, 34	4, 5, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 22, 23, 25, 26, 28, 30, 31, 34, 35	16, 17, 31, 32, 34, 35	—
Уренгойская	1, 11, 14, 15, 17, 25, 31, 33—35, 42, 44, 49, 53, 54, 57, 58, 68, 69, 72, 75, 79, 81—83, 85, 91	1—8, 11—13, 16—18, 20, 21, 23—27, 30, 32—37, 39—41, 44—46, 48—50, 52—56, 58, 60, 61, 63, 64, 66, 67, 70—72, 75, 78, 80—85, 87—91, 97, 100, 104, 107—109	1, 17, 25, 27, 33, 34, 44, 53, 69, 70, 78, 81, 82, 99	—

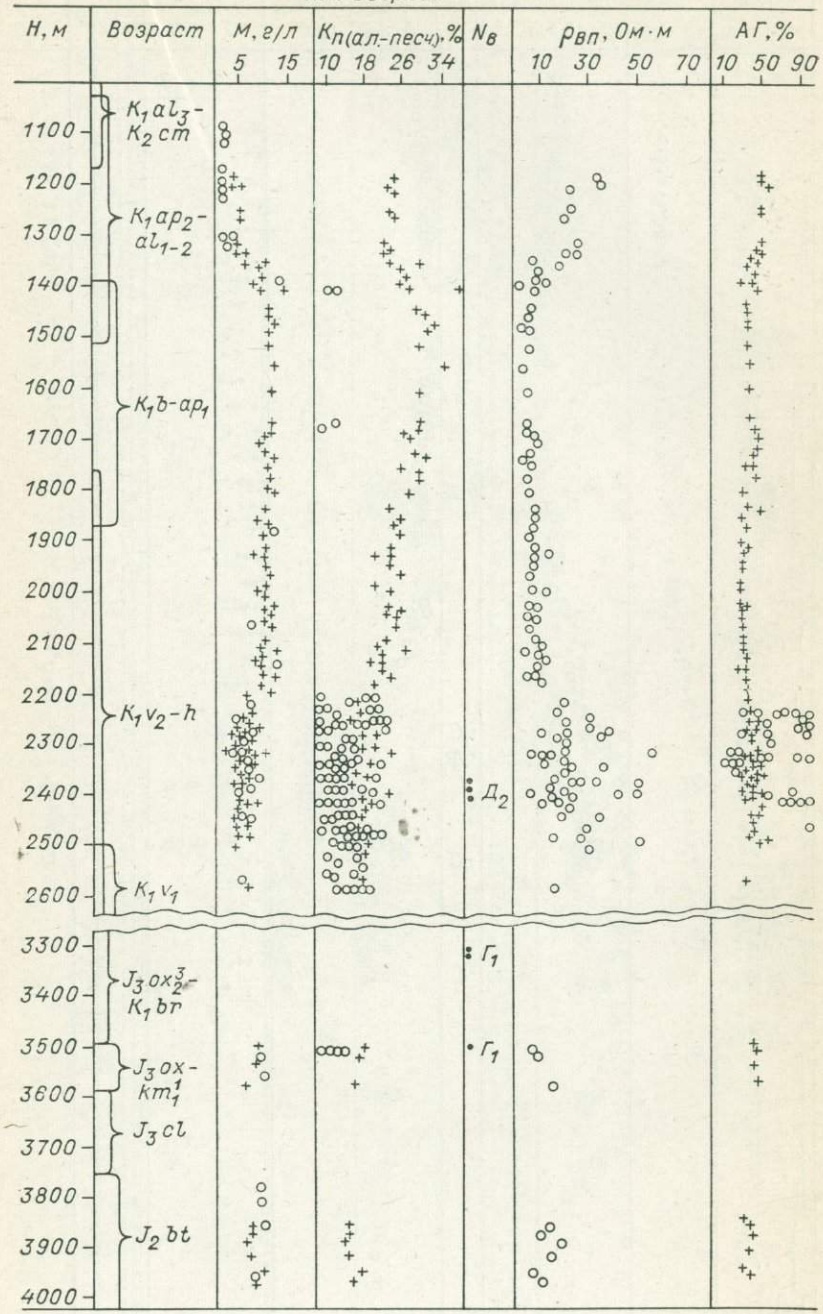

Пл. Суходудинская
H, м
Возраст
M, г/л
10 20
Kп(ал-песч), %
10 18 26 34
Рвп, Ом·м
10 30 50 70
АГ, %
10 50 90
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600
1700
K1b-ap1
K1v2-h
K1v1
J3ox2-K1br
J3ox-km1
J3cl
J2bt
J2bj
J2al2
J2al1
J1p2-tr
S
o 1 + 2

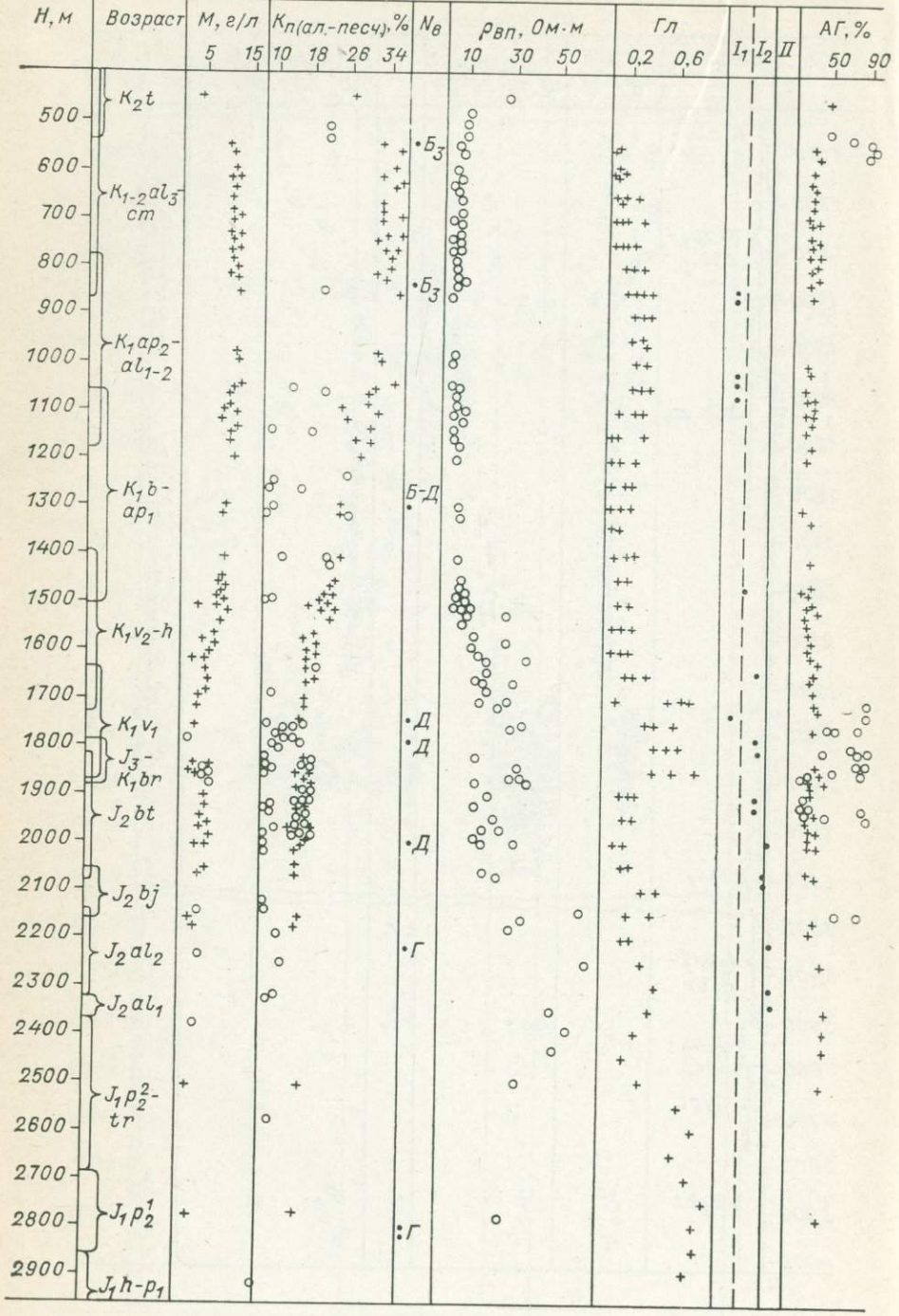

Пл. Балахнинская
H, м
Возраст
M, г/л
5
15
Kп(ал.-песч.)%
10
18
26
34
Nв
Pвп, Ом·м
10
30
АГ,%
10
50
90
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600
1700
1800
1900
2000
2100
J2 bt
J2 bj
J2 al
J1
Б
Б3
Б
Б3
Б
Б3
Д2
Д1
Д1
Д2
Д2
Д2
Д2

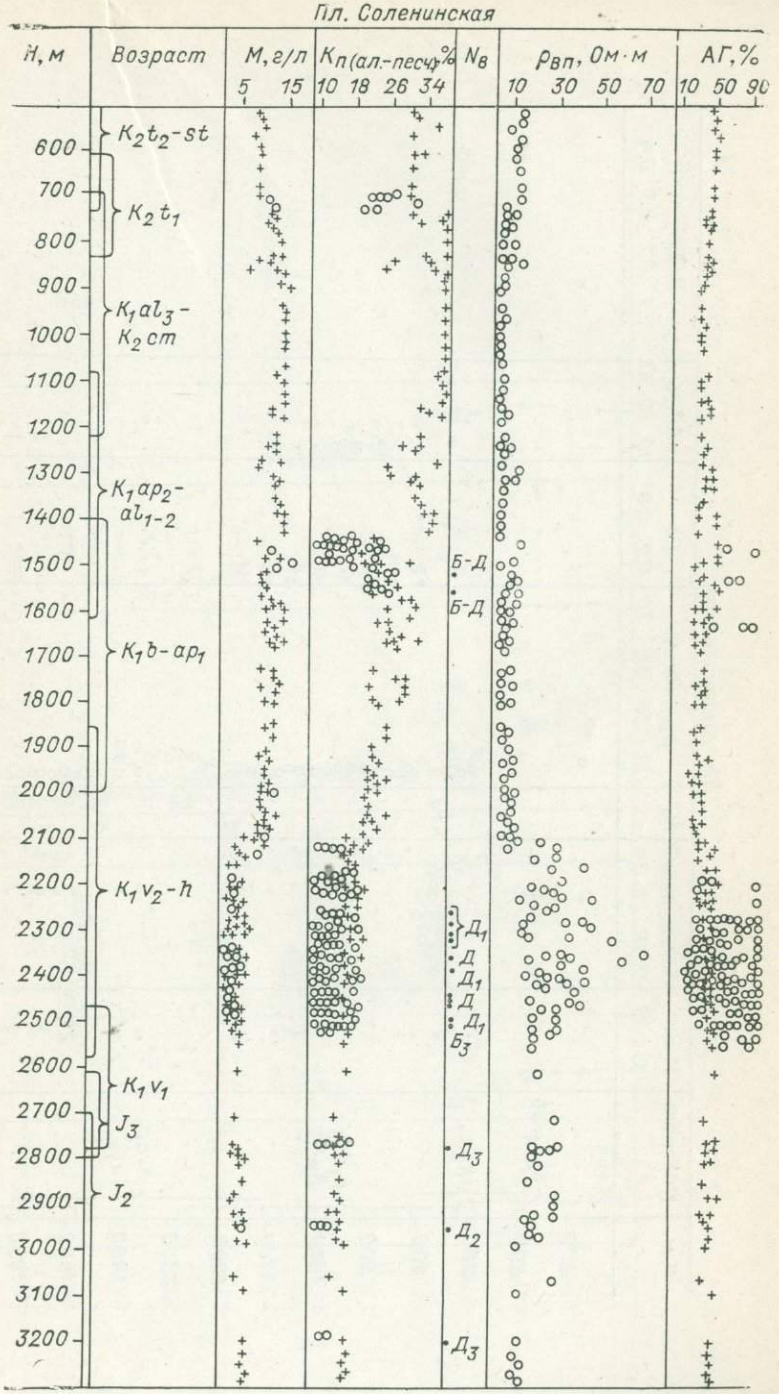
Пл. Джангодская

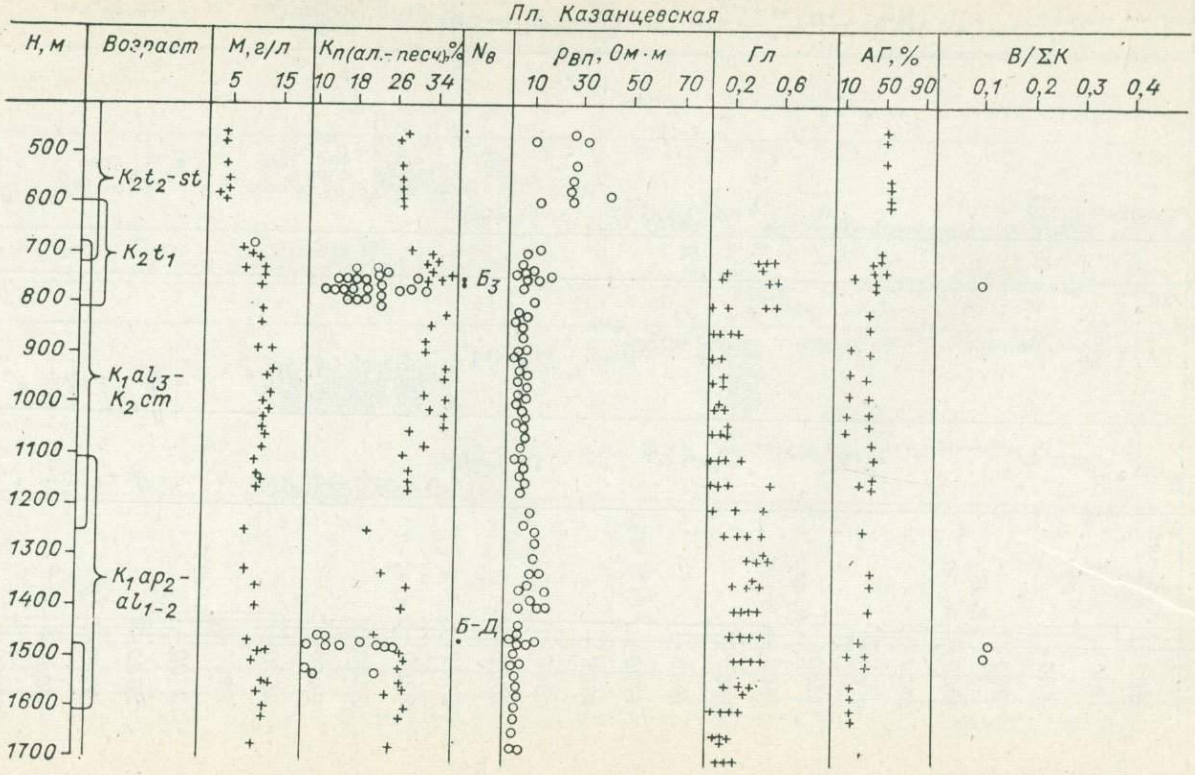


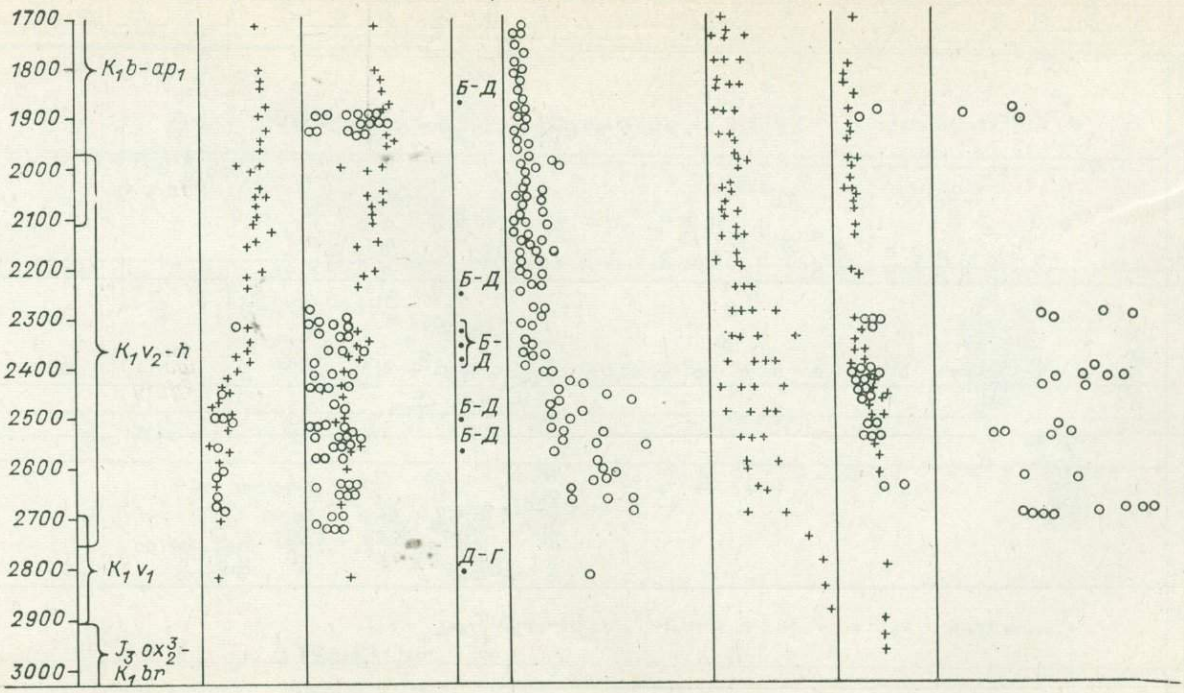
Пл. Озерная

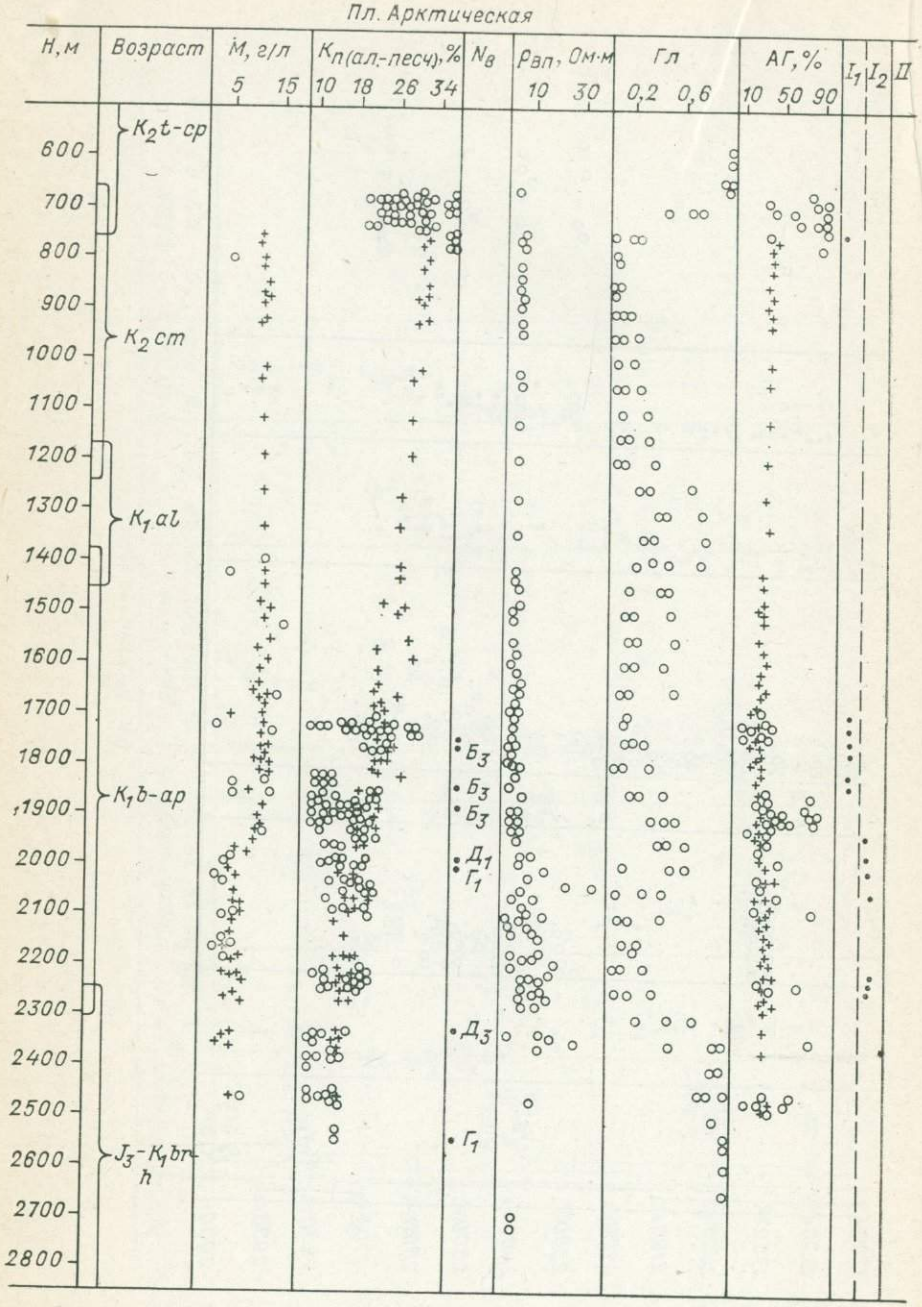


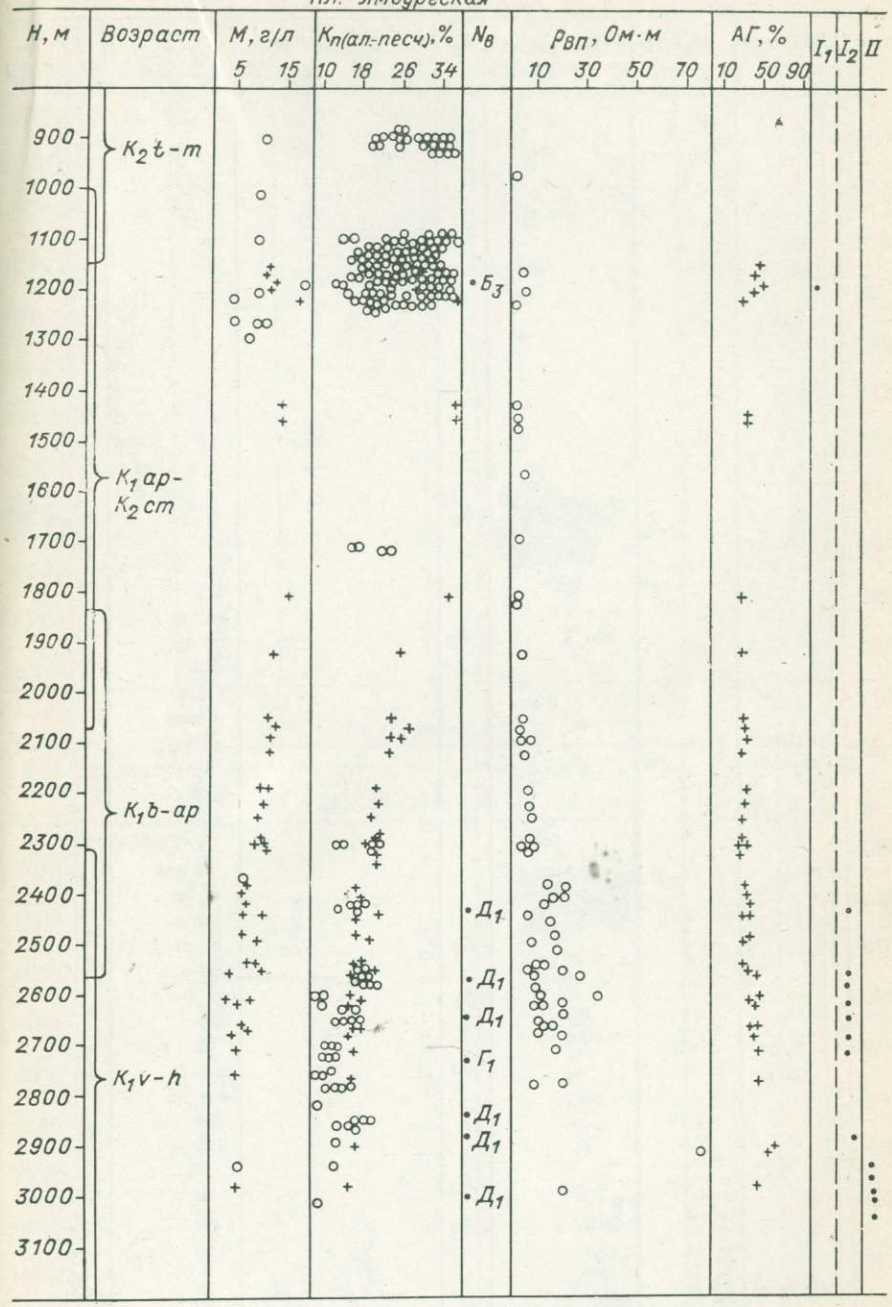

Пл. Зимняя
H, м
Возраст
M, г/л
5 15
Kп(ал.-песч), %
10 18 26 34
Nв
ρвп, Ом·м
10 30 50
Гл
0,2 0,6
I1 I2 II
АГ, %
50 90
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600
1700
1800
1900
2000
2100
2200
2300
2400
2500
2600
2700
2800
2900
K2t
K1-2al3-cm
K1ap2-al1-2
K1b-ap1
K1v2-h
K1v1
J3-K1br
J2bt
J2bj
J2al2
J2al1
J1p2 2-tr
J1p2 1
J1h-p1
Б3
Б3
Б-Д
Д
Д
Д
Г
Г


Пл. Соленинская
H, м
Возраст
M, г/л
5 15
Kп(ал.-песч), %
10 18 26 34
Nв
ρвп, Ом·м
10 30 50 70
АГ, %
10 50 90
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600
1700
1800
1900
2000
2100
2200
2300
2400
2500
2600
2700
2800
2900
3000
3100
3200
K2t2-st
K2t1
K1al3-K2cm
K1ap2-al1-2
K1b-ap1
K1v2-h
K1v1
J3
J2
Б-Д
Б-Д
Д1
Д
Д1
Д
Д1
Б3
Д3
Д2
Д3

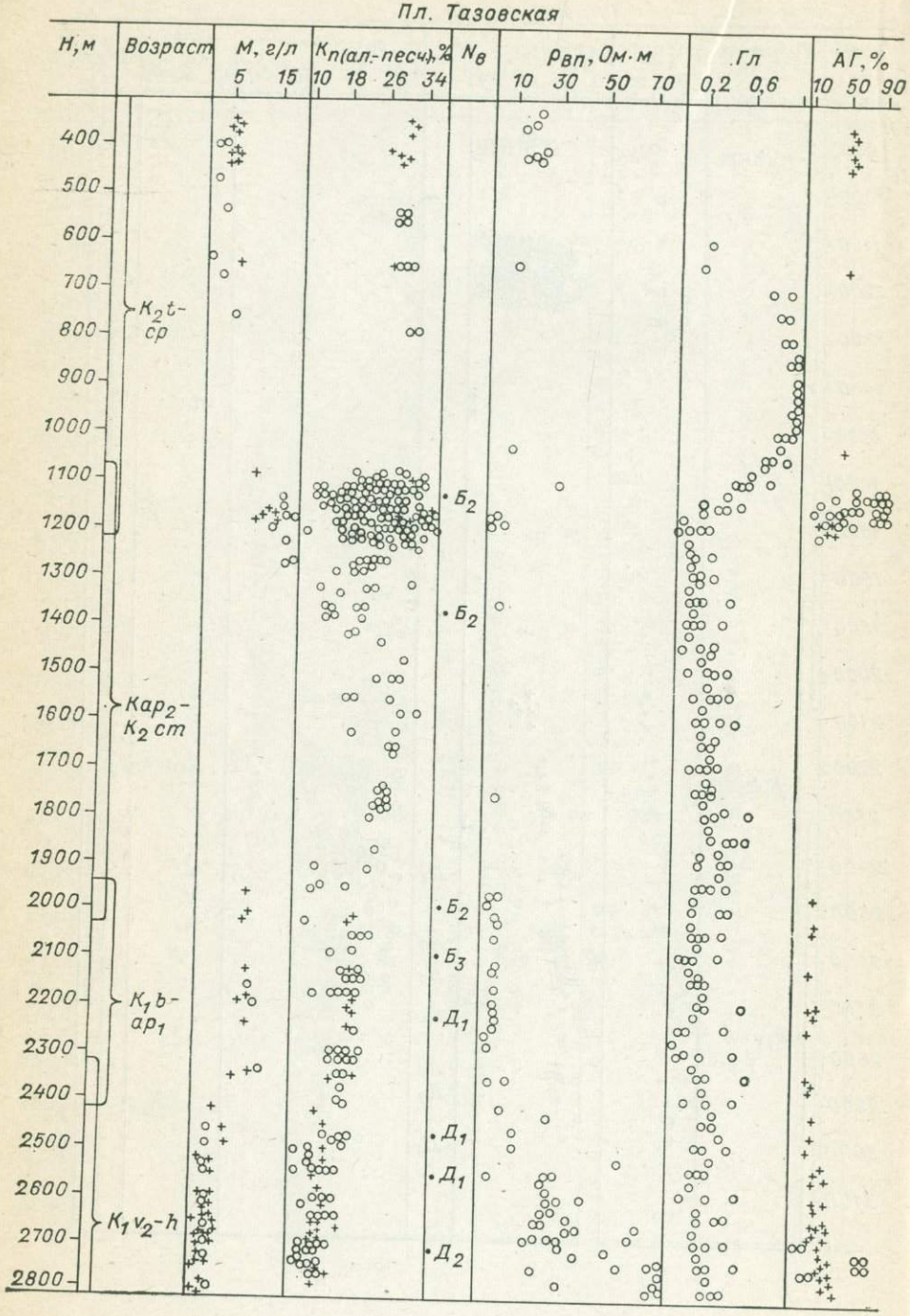

Пл. Казанцевская
H, м
Возраст
M, г/л
5 15
Кп(ал.-песч.)%
10 18 26 34
Nв
ρвп, Ом·м
10 30 50 70
Гл
0,2 0,6
АГ, %
10 50 90
В/ΣК
0,1 0,2 0,3 0,4
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600
1700
K2t2-st
K2t1
K1al3-K2cm
K1ap2-al1-2
Б3
Б-Д


1700
1800
1900
2000
2100
2200
2300
2400
2500
2600
2700
2800
2900
3000
K1b-ap1
K1v2-h
K1v1
J3ox2 3-K1br
Б-Д
Б-Д
Б-Д
Б-Д
Б-Д
Д-Г

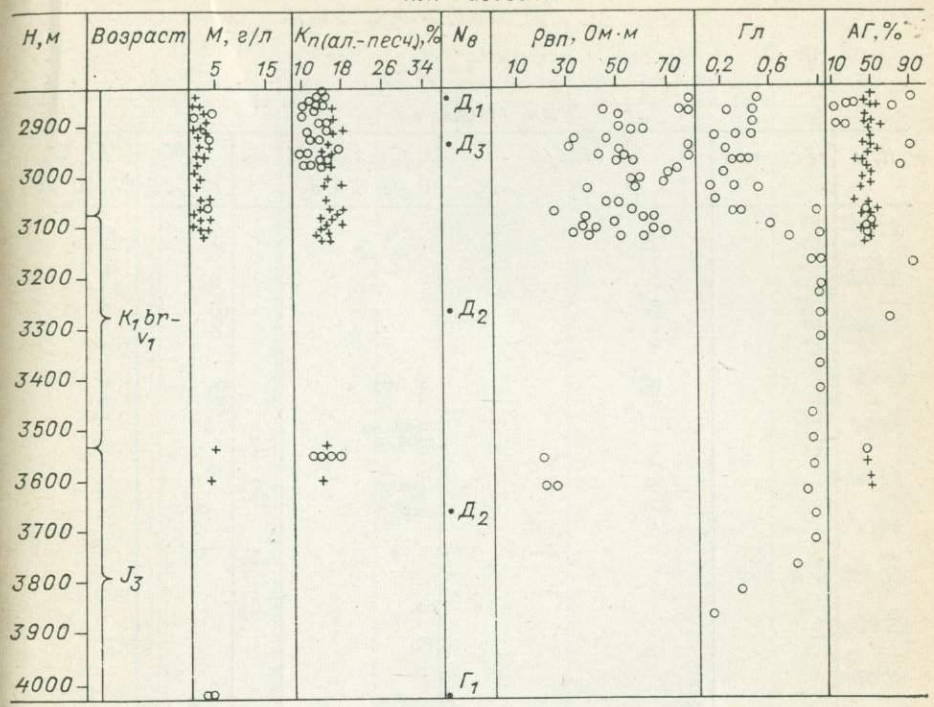

Пл. Арктическая
Н, м
Возраст
М, г/л
5 15
Кп(ал.-песч),%
10 18 26 34
Nв
ρвп, Ом·м
10 30
Гл
0,2 0,6
АГ,%
10 50 90
I1 I2 II
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600
1700
1800
1900
2000
2100
2200
2300
2400
2500
2600
2700
2800
K2t-cp
K2cm
K1al
K1b-ap
J3-K1br-h
Б3
Б3
Б3
Д1
Г1
Д3
Г1


Пл. Ямбургская
Н, м
Возраст
М, г/л
5 15
Кп(ал.-песч),%
10 18 26 34
Nв
ρвп, Ом·м
10 30 50 70
АГ,%
10 50 90
I1 I2 II
900
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600
1700
1800
1900
2000
2100
2200
2300
2400
2500
2600
2700
2800
2900
3000
3100
K2t-m
K1ap-K2cm
K1b-ap
K1v-h
Б3
Д1
Д1
Д1
Г1
Д1
Д1
Д1

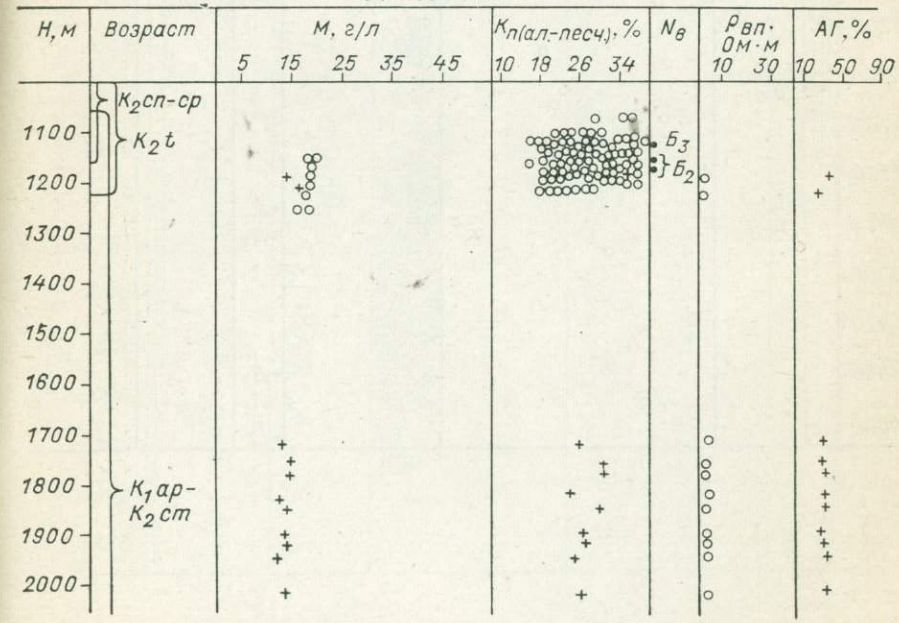
Пл. Тазовская



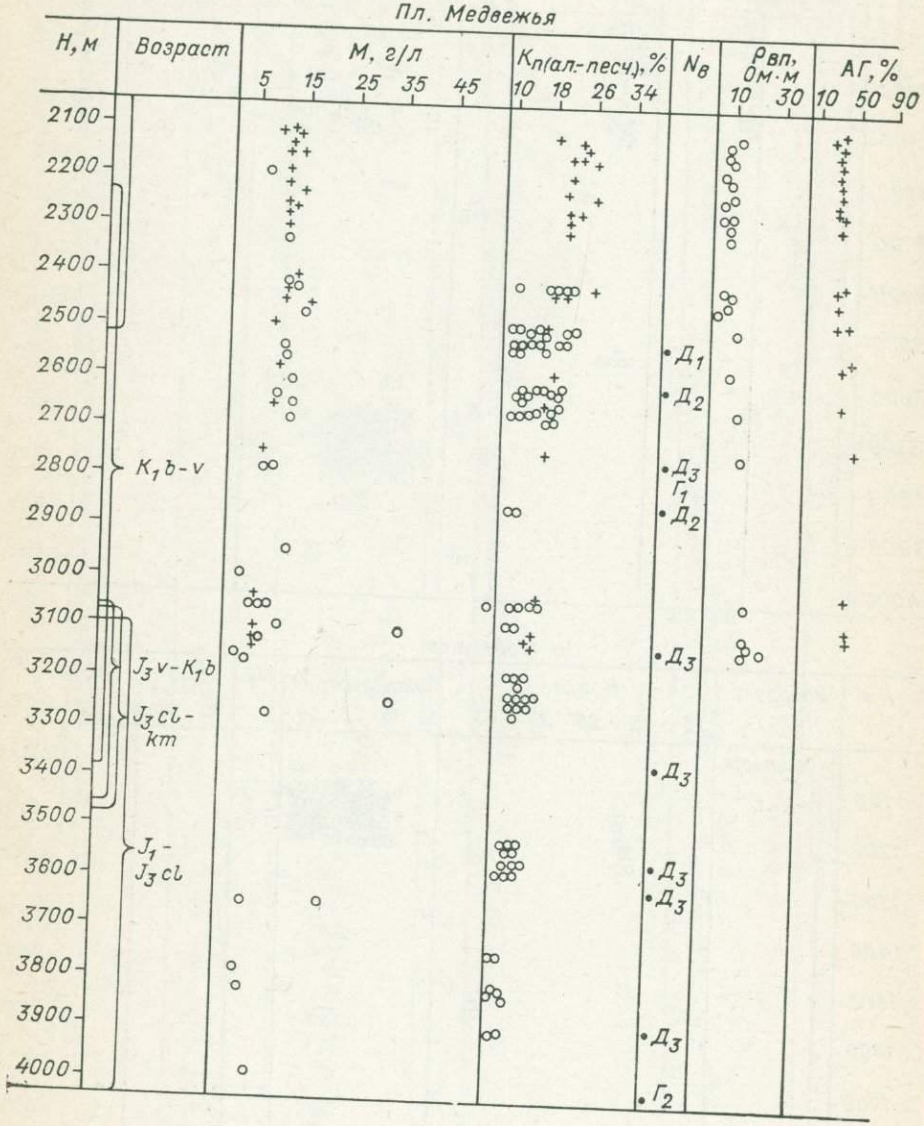
Пл. Тазовская



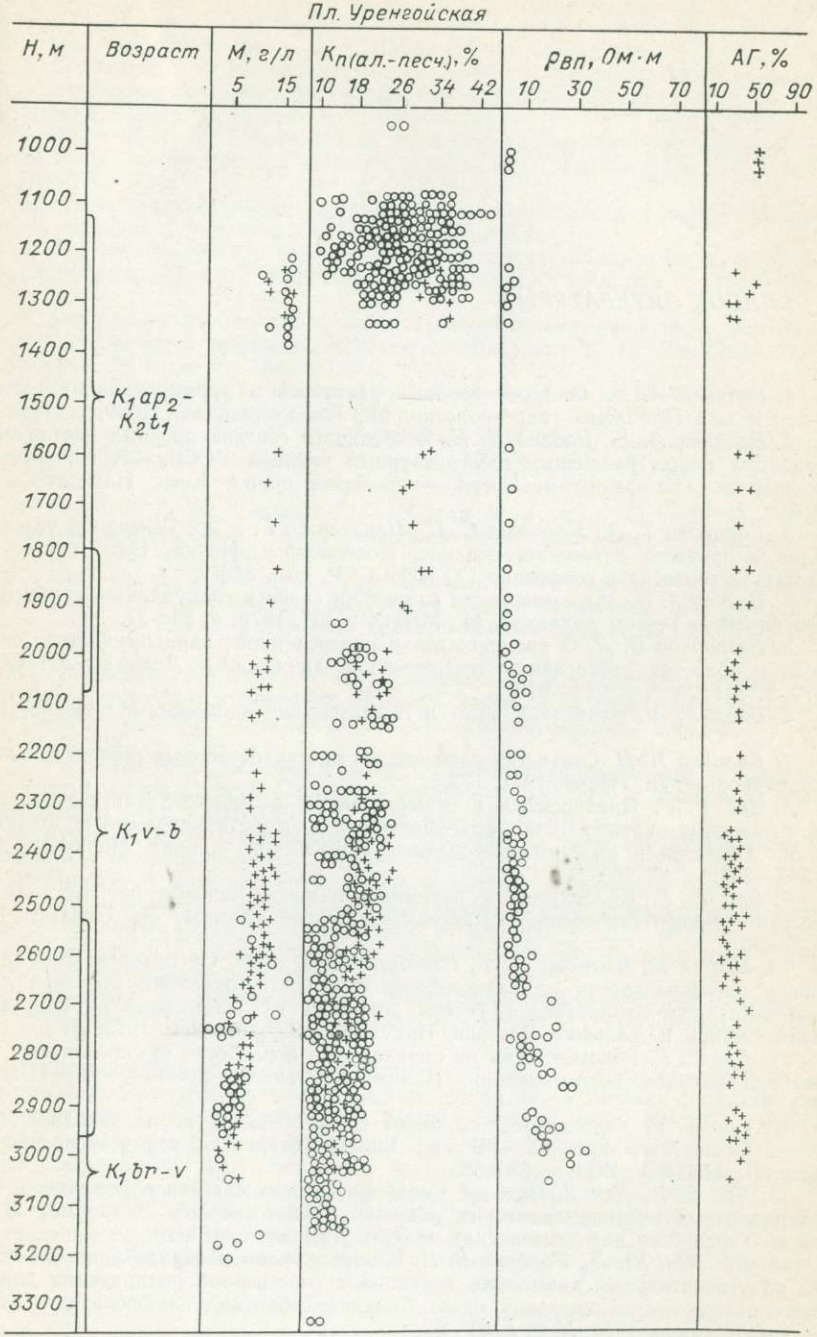
Пл. Медвежья



Пл. Медвежья



Пл. Уренгойская



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабинец А. Е.* О роли поровых растворов в формировании подземных вод. — В кн.: Проблемы гидрогеологии. М., Госгеолтехиздат, 1960, с. 144—150.

2. *Бабинец А. Е., Радько Н. И.* Особенности состава поровых растворов из осадочных пород различных геоструктурных районов УССР. — В кн.: Влияние поровых вод на физико-механические свойства пород. Киев, Наукова думка, 1974, с. 7—16.

3. *Баранова Т. Э., Белецкая С. Н., Неручев С. Г.* и др. Генерация углеводородов в процессе литогенеза осадков. Новосибирск, Наука, 1976. 197 с. (Тр. Института геологии и геофизики СО АН СССР, вып. 330).

4. *Бедчер А. З.* Закономерности изменения свойств гранулярных коллекторов с глубиной. — Тезисы докладов. М., МИНХ и ГП, 1975, с. 36—37.

5. *Безроднов В. Д.* О происхождении инверсионной гидрохимической зональности в областях интенсивных тектонических движений. — Доклады АН СССР, 1970, т. 194, № 4, с. 915—918.

6. *Блох А. М.* Структура воды и геологические процессы. М., Недра, 1969. 216 с.

7. *Боровко Н. Н.* Статистический анализ пространственных геологических закономерностей. Л., Недра, 1971. 172 с.

8. *Бро Е. Г.* Предпосылки к существованию в Енисей-Хатангском прогибе промышленных залежей газа, экранированных многолетнемерзлыми породами. — В кн.: Геология и полезные ископаемые Норильского района. Норильск, 1971, с. 267—268.

9. *Бро Е. Г.* Коллекторы и покрышки в юрско-меловом разрезе. — В кн.: Геология и нефтегазоносность Енисей-Хатангского прогиба. Л., НИИГА, 1971, с. 40—53.

10. *Бро Е. Г., Иванова Г. А., Гинсбург Г. Д.* и др. Об инверсионной гидрохимической зональности на газоконденсатных месторождениях западной части Енисей-Хатангского прогиба. — Тезисы докладов VII совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Иркутск — Новороссийск, 1973. 36 с.

11. *Бро Е. Г.* Рекомендации по определению пористости юрско-меловых коллекторов методом сопротивления (Енисей-Хатангский прогиб). Л., НИИГА, 1974. 38 с.

12. *Бро Е. Г.* Уплотнение с глубиной юрско-меловых пород западной части Енисей-Хатангского прогиба. — В кн.: Енисей-Хатангская нефтегазоносная область. Л., НИИГА, 1974, с. 63—66.

13. *Бро Е. Г., Деч В. Н.* и др. Связь физических свойств пород-коллекторов при различных термодинамических условиях с вещественным составом. — В кн.: Енисей-Хатангская нефтегазоносная область. Там же, с. 15—20.

14. *Брылкин Ю. Л., Роменко В. Н.* К определению минерализации пластовых вод по относительным аномалиям потенциала собственной поляризации для меловых отложений центральной части Западно-Сибирской низменности. — Геология нефти и газа, 1966, № 2, с. 61—62.

15. *Вистелиус А. Б., Иванов Д. Н., Романова М. А.* Региональный тренд состава мезозойских гранитоидов и локализация оловоносных областей Северо-Восточной Азии. Л., Наука, 1974. 33 с.

16. *Войцеховская А. Г.* О составе рассеянного органического вещества в юрских и меловых отложениях Енисей-Хатангского прогиба. — В кн.: Енисей-Хатангская нефтегазоносная область. Л., НИИГА, 1974, с. 67—71.

17. *Воронин Ю. А., Ионина Н. А.* и др. Геология и математика. Задачи диагноза и распознавания в геологии, геохимии и геофизике / Под ред. Э. Э. Фотиади. Новосибирск, Наука, 1970. 224 с.

18. *Воронов П. С.* Стратиграфия, литология и перспективы нефтеносности юго-восточного побережья Хатангского залива. Л., Гостоптехиздат, 1961. 195 с. (Тр. НИИГА, т. 116).

19. *Геологическое* строение фундамента Западно-Сибирской плиты / Под ред. Э. Э. Фотиади, В. С. Суркова. Л., Недра, 1971. 208 с.

20. *Геология* и прогноз нефтегазоносности северо-западной окраины Сибирской платформы / Под ред. Сорокова Д. С. Л., Недра, 1969. 264 с. (Тр. НИИГА, т. 160).

21. *Геология* и разведка нефтяных и газовых месторождений. Материалы VII Международного нефтяного конгресса / Васильев В. Г., Вассоевич Н. Б., Трофимук А. А. и др. М., Недра, 1970. 208 с.

22. *Геология СССР.* Т. 44. Западно-Сибирская низменность. Ч. 1 / Под ред. Н. Н. Ростовцева. М., Недра, 1964. 825 с.

23. *Гидрогеология СССР.* Т. XVI. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / Под ред. В. А. Нуднера. М., Недра, 1970. 367 с.

24. *Гинсбург Г. Д., Иванова Г. А., Сапир М. Х.* и др. О подземных водах Усть-Енисейской впадины. — В кн.: Гидрогеология Енисейского Севера, вып. 1. Л., НИИГА, 1969, с. 6—23.

25. *Гинсбург Г. Д., Иванова Г. А.* Основные черты геохимии подземных вод в юрско-меловой толще юго-западной части Енисей-Хатангской нефтегазоносной области. — В кн.: Енисей-Хатангская нефтегазоносная область. Л., НИИГА, 1974, с. 71—85.

26. *Грамберг И. С., Спиро Н. С., Аплонова Э. Н.* Стратиграфия и литология пермских и триасовых отложений северной части Приверхоянского прогиба и сопредельных складчатых сооружений. Л., Гостоптехиздат, 1961. 234 с. (Тр. НИИГА, т. 118).

27. *Грамберг И. С., Преображенская Э. Н.* Верхнепалеозойские и триасовые осадочные формации севера Сибирской платформы (в связи с проблемой нефтегазоносности). — Тр. СНИИГГИМС, 1969, вып. 98, с. 107—110.

28. *Грамберг И. С.* Палеогидрохимия терригенных толщ (на примере верхнепалеозойских отложений севера Средней Сибири). Л., Недра, 1973. 172 с.

29. *Гуревич А. Б., Топорец С. А.* Об изменении вмещающих углей пород на контакте с сибирскими траппами. — В кн.: Вопросы метаморфизма углей и эпигенеза вмещающих пород. Л., Наука, 1968, с. 306—328.

30. *Гуревич А. Е., Капченко Л. Н., Кругликов Н. М.* Теоретические основы нефтяной гидрогеологии. Л., Недра, 1972. 271 с.

31. *Гурова Т. И., Казаринов В. П.* Литология и палеогеография Западно-Сибирской низменности в связи с нефтегазоносностью. М., Гостоптехиздат, 1962. 296 с.

32. *Данюшевская А. И., Войцеховская А. Г.* и др. Геохимия органического вещества пермских отложений Оленекского поднятия. — Сборник статей по геохимии осадочных пород. Вып. 4. Л., Недра, 1969, с. 157—182. (Тр. НИИГА, т. 161).

33. *Данюшевская А. И.* Геохимия органического вещества мезозойских отложений севера Средней Сибири. Автореферат диссертации. Л., 1975. 57 с.

34. *Дебранд Р.* Теория и интерпретация результатов геофизических методов исследования скважин. М., Недра, 1972. 288 с.

35. *Девис Дж.* Статистика и анализ геологических данных. М., Мир, 1977. 572 с.

36. *Дегенс Э. Т., Чилингар Дж. В.* Диагенез подземных вод. — В кн.: Диагенез и катагенез осадочных образований. М., Мир, 1971, с. 426—442.

37. *Депплес Э. К.* Диагенез песчаников. — В кн.: Диагенез и катагенез осадочных образований. М., Мир, 1971, с. 92—122.

38. *Деч В. Н., Кноринг Л. Д.* Нетрадиционные методы комплексной обработки и интерпретации геолого-геофизических наблюдений в разрезах скважин. Л., Недра, 1978. 192 с.

39. *Дизъюнктивная* тектоника Западно-Сибирской плиты / Ф. Г. Гурари, К. И. Микуленко, В. С. Старосельцев и др. Новосибирск, 1970. 193 с. (Тр. СНИИГГИМС, вып. 97).

40. *Емельянцев Т. М., Кравцова А. И., Пук П. С.* Геология и перспективы нефтегазоносности низовьев р. Лены. Л., 1960. 145 с. (Тр. НИИГА, т. 108).

41. *Запорожцева А. С.* Туфогенно-аргиллитовая толща Усть-Енисейского района и ее происхождение. — Тр. НИИГА, 1958, т. 67, с. 104—142.

42. *Иванова Г. А.* Особенности геохимии подземных вод юго-западной части Енисей-Хатангской нефтегазоносной области. Автореферат диссертации. Томск, 1973. 37 с.

43. *Ирбэ Н. А.* Особенности интерпретации промыслово-геофизических материалов в низкотемпературном разрезе Западной Сибири на этапе поисково-разведочных работ. — Тр. ЗапСибНИГНИ, 1974, вып. 65, с. 98—120.

44. *Казаринов В. П.* Мезозойские и кайнозойские отложения Западной Сибири. М., Гостоптехиздат, 1958. 324 с.

45. *Калинко М. К.* Результаты поисков и разведки нефти и газа в районе Анабаро-Хатангского междуречья (Нордвикский район). — В кн.: Нефтегазоносность севера Сибири. Л., Гостоптехиздат, 1958, с. 134—170. (Тр. НИИГА, т. 92).

46. *Калинко М. К.* История геологического развития и перспективы нефтегазоносности Хатангской впадины. Л., Гостоптехиздат, 1959. 360 с. (Тр. НИИГА, т. 104).

47. *Каплан М. Е., Кноринг Л. Д.* Некоторые факторы, контролирующие пористость мезозойских терригенных отложений севера Восточной Сибири. — Тр. ВНИГРИ, 1974, вып. 331, с. 83—90.

48. *Каплан М. Е.* Литология морских мезозойских отложений севера Восточной Сибири. Л., Недра, 1976. 231 с. (Тр. ВНИГРИ, вып. 357).

49. *Капченко Л. Н.* Преобразование ионно-солевого состава подземных вод нефтегазоносных бассейнов при дегидратации монтмориллонита. — Геология нефти и газа, 1978, № 7, с. 57—60.

50. *Карпов П. А.* Количественная оценка температуры и времени как факторов глубинного изменения пористости песчаников. — В кн.: Коллекторы нефти и газа на больших глубинах. Тезисы докладов. М., МИНХ и ГП, 1975, с. 123—125.

51. *Карцев А. А., Вагин С. Б.* О роли «межслоевых» вод глинистых минералов в формировании подземных вод. — Изв. вузов. Геология и разведка, 1973, № 3, с. 64—67.

52. *Кноринг Л. Д., Деч В. Н.* К вопросу об определении пористости карбонатных пород по данным каротажа. — Доклады АН СССР, т. 202. Сер. мат. физика, 1972, № 4, с. 819—822.

53. *Коблов Э. Г., Иваньшина Л. П., Буценко Р. Л.* Изменение с глубиной коллекторских свойств осадочных образований о. Сахалина и прогнозирование зон распространения коллекторов порового типа. Тезисы докладов. М., МИНХ и ГП, 1975, с. 20—21.

54. *Конторович А. Э., Зимин Ю. Г.* Об условиях формирования химического состава подземных вод Западно-Сибирской низменности. — В кн.: Материалы по литологии и геохимии нефтегазоносных бассейнов Сибири. Новосибирск, 1968, с. 83—95 (Тр. СНИИГГИМС, вып. 78).

55. *Конторович А. Э., Полякова И. Д., Трушков П. А.* и др. Геохимия мезозойских отложений нефтегазоносных бассейнов Сибири. Новосибирск, 1971. 76 с. (Тр. СНИИГГИМС, вып. 118).

56. *Конторович А. Э., Нестеров И. И., Салманов Ф. К.* и др. Геология нефти и газа Западной Сибири. М., Недра, 1975. 680 с.

57. *Копелиович А. В.* Эпигенез древних толщ юго-запада Русской платформы. М., Наука, 1965. 312 с. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 121).

58. *Копылова Т. Н.* Геохимия и условия залегания битумов Оленекского поднятия Сибирской платформы (в связи с оценкой перспектив нефтегазоносности). Автореферат диссертации. Л., 1967. 19 с.

59. *Коссовская А. Г.* Факторы, определяющие формирование минерального состава глин в условиях платформы и геосинклинали. — Доклады АН СССР, т. 129, 1959, № 6, с. 1397—1400.

60. *Коссовская А. Г.* Минералогия терригенного мезозойского комплекса Вилюйской впадины и Западного Верхоянья. М., Изд-во АН СССР, 1962. 206 с. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 63).

61. *Котова И. С., Павлов А. Н.* О выщелачивании водоупоров при увеличении геостатического давления. — В кн.: Поровые растворы и методы их изучения. Минск, Наука и техника, 1968, с. 55—63.

62. *Крамбейн У., Грейбилл Ф.* Статистические модели в геологии. М., Мир, 1969. 397 с.

63. *Кругликов Н. М.* Гидрогеология северо-западного борта Западно-Сибирского артезианского бассейна. Л., Недра, 1964. 166 с.

64. *Крюков П. А., Жучкова А. А., Ренгартен Е. В.* Изменение состава растворов, отжимаемых из глин и ионообменных смол. — Доклады АН СССР, 1962, т. 144, № 6, с. 1363—1365.

65. *Крюков П. А.* Горные, почвенные и иловые растворы. Новосибирск, Наука, 1971. 220 с.

66. *Кузнецов Л. Л.* Индексация и корреляция юрских и меловых продуктивных горизонтов в западной части Енисей-Хатангского прогиба. — В кн.: Енисей-Хатангская нефтегазоносная область. Л., НИИГА, 1974, с. 29—33.

67. *Лапина Н. Н.* Методика изучения вещественного состава донных отложений (на примере Северного Ледовитого океана). Л., НИИГА, 1977. 55 с.

68. *Лебедев Б. А., Аристова Г. Б., Бро Е. Г.* и др. Влияние эпигенетических процессов на параметры коллекторов и покрышек в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности. Л., Недра, 1976. 132 с.

69. *Леонтьев Е. И., Дорогиницкая Л. М.* и др. Изучение коллекторов нефти и газа месторождений Западной Сибири геофизическими методами. М., Недра, 1974. 240 с.

70. *Логвиненко Н. В.* Постдиагенетические изменения осадочных пород. Л., Наука, 1968. 92 с.

71. *Ломтадзе В. Д.* О роли процессов уплотнения глинистых осадков в формировании подземных вод. — Доклады АН СССР, 1954, т. XCVIII, № 3, с. 451—454.

72. *Лопатин Н. В.* О главной фазе нефтеобразования. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1969, № 5, с. 69—76.

73. *Лопатин Н. В.* Температура и геологическое время как факторы углефикации. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1971, № 3, с. 95—106.

74. *Лоули Д., Максвелл Л.* Факторный анализ как статистический метод. М., Мир, 1967. 133 с.

75. *Марморштейн Л. М., Меклер Ю. Б., Рафаевич Ф. З.* Комплексное изучение физических свойств песчаных пород в пластовых условиях. — В кн.: Физические свойства горных пород при высоких параметрах. Киев, 1971, с. 237—240.

76. *Милло Ж.* Геология глин. Л., Недра, 1968. 358 с.

77. *Мюллер Г.* Диагенез глинистых осадков. — В кн.: Диагенез и катагенез осадочных образований. М., Мир, 1971, с. 122—165.

78. *Окунь Я.* Факторный анализ. М., Статистика, 1974. 200 с.

79. *Парпарова Г. М.* Характеристика рассеянного органического вещества пород по данным углепетрографических исследований. — В кн.: Генезис нефти и газа (доклады, представленные на Всесоюзное совещание по генезису нефти и газа, Москва, февраль 1967 г.). М., Недра, 1967, с. 78—82.

80. *Перозио Г. Н.* Об эпигенетических изменениях в терригенных породах мезозоя центральной части Западно-Сибирской низменности. — Тр. СНИИГГИМС, 1961, вып. 17, с. 166—184.

81. *Перозио Г. Н., Лизалек Н. А., Ван А. В.* Закономерности вторичных преобразований пород в осадочных сериях. — Сов. геология, 1966, № 6, с. 75—89.

82. *Перозио Г. Н.* Эпигенез терригенных осадочных пород юры и мела центральной и юго-восточной частей Западно-Сибирской низменности. М., Недра, 1971. 160 с.

83. *Программы* для ЭЦВМ БЭСМ-4. Выпуски 13—24 / Под ред. А. Н. Олейникова, С. И. Романовского. Л., 1976. 161 с.

84. *Прозорович Г. Э., Зарипов О. Г., Валюженич З. Л.* Вопросы литологии нефтегазоносных отложений центральных и северных районов Западно-Сибирской низменности. Тюмень, 1970. 185 с. (Тр. ЗапСибНИГНИ, вып. 26).

85. *Прошляков Б. К., Котельников Д. Д.* Роль аутигенных глинистых минералов в изменении коллекторских свойств песчано-алевритовых пород на больших глубинах. — Тезисы докладов. М., МИНХ и ГП, 1975, с. 125—127.

86. *Пушкина З. В.* Поровые воды глинистых пород и их изменение по разрезу. — Тр. ГИН АН СССР, 1965, вып. 115, с. 160—203.

87. *Равдоникас О. В.* Основные итоги гидрогеологических исследований нефтеносных районов севера Западной Сибири. М., Госгеолтехиздат, 1962. 194 с.

88. *Розанова И. М.* Методика изучения поровых растворов. — В кн.: Поровые растворы и методы их изучения. Минск, Наука и техника, 1968, с. 158—166.

89. *Ронкина З. З.* Вещественный состав и условия формирования юрских и меловых отложений севера Центральной Сибири. Л., Недра, 1965. 163 с. (Тр. НИИГА, т. 146).

90. *Ронкина З. З., Колокольцева Е. П., Войцеховская А. Г.* Вещественный состав юрских и меловых отложений. — В кн.: Геология и нефтегазоносность Енисей-Хатангского прогиба. Л., НИИГА, 1971, с. 19—39.

91. *Ронкина З. З.* Зависимость минералого-петрографических особенностей терригенных осадочных пород от гранулометрического состава. — В кн.: Проблемы геологии полярных областей Земли. Л., НИИГА, 1974, с. 59—64.

92. *Ронкина З. З., Вишневская Т. Н., Войцеховская А. Г.* и др. Два типа цеолитообразования в терригенных толщах мезозойских прогибов севера Сибири. — Геология и геофизика, 1976, № 5, с. 110—114.

93. *Ронкина З. З., Бро Е. Г., Войцеховская А. Г.* и др. Эпигенез пермско-мезозойских терригенных толщ севера Сибирской платформы. — В кн.: Геология и нефтегазоносность мезозойских прогибов севера Сибирской платформы. Л., НИИГА, 1977, с. 16—29.

94. *Рудкевич М. Я.* Тектоника Западно-Сибирской плиты и ее районирование по перспективам нефтегазоносности. М., Недра, 1969. 278 с. (Тр. ЗапСибНИГНИ, вып. 14).

95. *Садиков М. А.* Опыт определения минерализации пластовых вод северо-востока Западно-Сибирской низменности по данным электрокаротажа. — Тр. СНИИГГИМС, 1961, вып. 17, с. 185—191.

96. *Сороков Д. С.* Органическое вещество юрско-меловых пород. — В кн.: Геология и нефтегазоносность Енисей-Хатангского прогиба. Л., НИИГА, 1971, с. 83—91.

97. *Софиев И. С., Горленко И. А.* и др. Некоторые факты о влиянии среды осадка на свойства органических компонентов угля. — Доклады АН СССР, 1963, т. 152, № 2, с. 438—440.

98. *Ставицкий Б. П.* Гидрогеология Западно-Сибирского артезианского бассейна в связи с его нефтегазоносностью. Автореферат диссертации. Томск, 1968. 26 с.

99. *Страхов Н. М.* Основы теории литогенеза. М., Изд-во АН СССР, 1962. 212 с.

100. *Тальвирский Д. Б.* Тектоника Енисей-Хатангской нефтегазоносной области и сопредельных территорий по геофизическим данным / Под ред. М. К. Полшкова. М., Недра, 1976. 168 с.

101. *Тимофеев П. П., Боголюбова Л. И.* Особенности углефикации витрена в породах и углях Ангренского буроугольного месторождения. — Доклады АН СССР, 1963, т. 151, № 4, с. 938—941.

102. *Трушков П. А.* Метаморфизм органического вещества в мезозойских отложениях центральной части Западно-Сибирской низменности. — В кн.: Геология нефтегазоносных районов Западно-Сибирской низменности. Новосибирск, 1966, с. 156—164. (Тр. СНИИГГИМС, вып. 47).

103. *Учителева Л. Г.* Минеральные воды Западно-Сибирского артезианского бассейна. М., Недра, 1974. 168 с.

104. *Ушатинский И. Н., Бабицин П. К., Бачурин А. К.* и др. Методика и результаты изучения минералогии глин продуктивных отложений Западно-Сибирской низменности в связи с их нефтегазоносностью. Тюмень, 1970. 313 с. (Тр. ЗапСибНИГНИ, вып. 35).

105. *Фербридж Р. У.* Фазы диагенеза и аутигенное минералообразование. — В кн.: Диагенез и катагенез осадочных образований. М., Мир, 1971, с. 27—92.

106. *Флерова Л. И.* О содержании иода и брома в поровых растворах мезозойских отложений Западной Сибири. — Геология и разведка, 1966, № 6, с. 96—100.

107. *Ханин А. А.* Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. М., Недра, 1969. 366 с.

108. *Харман Х. Х.* Современный факторный анализ. М., Статистика, 1972. 485 с.

109. *Чепиков К. Р., Ермолова Е. П., Орлова Н. А.* К вопросу об изменении пористости песчаных пород с глубиной. — Доклады АН СССР, 1962, т. 144, № 2, с. 435—437.

110. *Чичуа Б. К.* К вопросу изучения начального метаморфизма осадочных пород в связи с их нефтегазоносностью. — Азерб. нар. хоз-во, 1964, № 7, с. 3—5.

111. *Шишигин С. И.* О факторах, влияющих на коллекторские свойства нефтегазоносных пластов. — Геология и геофизика, 1972, № 11, с. 104—108.

112. *Шишигин С. И.* Оценочные классификационные шкалы пород-коллекторов мезозоя Западно-Сибирской низменности. — В кн.: Проблемы нефти и газа, вып. 17. Тюмень, 1973, с. 8—9.

113. *Шутов В. Д.* О некоторых специфических чертах прогрессивного эпигенеза в условиях платформенной области. — Ученые записки ЛГУ, 1962, № 310. Сер. геол. наук, вып. 12, с. 147—160.

114. *Элланский М. М., Холин А. И., Зверев Г. Н., Петров А. П.* Математические методы в газонефтяной геологии и геофизике. М., Недра, 1972. 208 с.

115. *Энгельгардт В.* Поровые водные растворы и катагенез пород. — В кн.: Диагенез и катагенез осадочных образований. М., Мир, 1971, с. 443—458.

116. *Юдина В. В.* Некоторые явления метаморфизма и метасоматоза, связанные с Талнахской дифференцированной интрузией габбро-долеритов. — В кн.: Соотношение магматизма и метаморфизма в генезисе ультрабазитов. М., Наука, 1965, с. 112—117.

117. *Powers M. C.* Fluid-Release Mechanism in compacting Marine mudrocks and their importance in oil exploration. — «Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 1967, v. 51, N 7, p. 1240—1254.

118. *Teichmuller M., Teichmuller R.* Geological causes of coalification. — In: Coal Science, 1966, p. 133—155.

119. *Weaver Ch. E.* Possible uses of clay minerals in search for oil. — Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 1960, v. 44, N 9, p. 1505—1518.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава 1. **Исследование роли катагенеза в формировании физических свойств пород и минерализации подземных вод** 6

§ 1. Мера интенсивности катагенетического преобразования пород по разрезу . . . . . —
§ 2. Основные направления катагенеза 12
§ 3. Влияние катагенетического преобразования пород на их физические свойства 17
§ 4. Влияние катагенетического преобразования пород на электрокаротажные характеристики 52
§ 5. Влияние катагенетического преобразования пород на минерализацию подземных вод 56

Глава 2. **Разработка комплекса методов количественной интерпретации геолого-геофизических данных** 69

§ 1. Методы определения минерализации подземных вод . . —
§ 2. Методы выделения водоносных пластов 78
§ 3. Методы определения пористости водонасыщенных коллекторов и содержания в них алеврито-глинистого материала 83

Глава 3. **Закономерности изменения физических свойств пород и минерализации подземных вод по разрезу под действием катагенеза** . . . 94

§ 1. Основные закономерности изменения содержания алеврито-глинистого материала в водоносных коллекторах . . 95
§ 2. Основные черты гидрохимической зональности 97
§ 3. Катагенетическая зональность коллекторских свойств алеврито-песчаных пород 104
§ 4. Основные закономерности изменения промыслово-геофизических данных по разрезу 106

Глава 4. **Прогнозирование коллекторских свойств пород и минерализации подземных вод с учетом влияния катагенеза** 109

§ 1. Методы прогнозирования коллекторских свойств пород и минерализации подземных вод . . . . . —
§ 2. Распространение и качество экранированных коллекторов в терригенных верхнепалеозойских и мезозойских отложениях мезозойских прогибов арктической части Сибирской платформы 116

Заключение 127

Приложение 131

Список литературы 146

1 р. 70 к.

3249

НЕДРА