

УДК 552.578.061.333

Белецкая С.Н.

ДИАГНОСТИКА ПЕРВИЧНОМИГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Работа посвящена диагностике первичномиграционных процессов на природных объектах. Предложена новая методика определения качественного состава и количества эмигрировавшей микронефти из материнских отложений.

Ключевые слова: *рассеянное органическое вещество, первичная миграция битумоидов, диагностика первичномиграционных процессов, определение количества эмигрировавшего битумоида.*

Теоретические разработки и результаты моделирования свидетельствуют о неизбежности эмиграции части битумоидов из нефтематеринских отложений. Совместное действие процессов генерации, эмиграции и иммиграции создает сложную смесь битумоидов различного генезиса, характеристика которых весьма затруднительна. Для того, чтобы рассчитать количественную результирующую всех процессов, определяющих состав микронефти (МН), необходимо знание механизмов миграции и закономерностей дифференциации МН в этом процессе.

Многочисленные теоретические разработки с привлечением новейших методов анализа позволили предложить различные критерии сингенетичности битумоидов, следов миграции и оценки масштаба эмиграции МН [Баженова, 2004; Вассоевич, Абрамсон, 1964; Неручев, 1964; Сахибгареев, 1976; Успенский, Радченко, 1952 и др.].

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СОСТАВА МИКРОНЕФТИ В ПРОЦЕССЕ МИГРАЦИИ

Углеводородные продукты катагенетического преобразования ОВ можно подразделить на три фракции: 1) метан и его гомологи, 2) летучие углеводороды (ЛУВ, C_{7-14}), 3) битумоиды [Успенский, 1981]. Закономерности миграции и дифференциации МН изучались многими авторами как путем лабораторного моделирования [Белецкая, 1990; Жузе, Сафронова, 1967; Капелюшников, 1954; Милешина, Калинин, 1983; Чахмахчев, 1983 и др.], так и на природных объектах, как результаты «природного эксперимента» [Беликова А.Р., Филатов, 1978; Ботнева, 1975; Максимов, Чахмахчев, 1976; Неручев, 1964 и др.]. Установлено, что дифференциация МН в процессе миграции происходит под влиянием термобарического и адсорбционно-хроматографического факторов. В данной работе изложены результаты многолетних исследований дифференциации МН под воздействием термобарического фактора. Непосредственной целью экспериментальных исследований

было: проследить изменения состава битумоида в газовых (ГЭ) и водных (ВЭ) экстрактах из материнских пород при различных P и T^0 извлечения и последующей дробной сепарации этих экстрактов.

Методика получения ГЭ и ВЭ описана в ряде работ [Белецкая, 1990; 2007]. В кратком изложении суть её в следующем: в реактор, ёмкостью 3 л, загружалась порода, дробленая до 0,15 мм. Через породу по достижении необходимых P и T пропускалась сжатая углекислота, при этом отбирались 4 основные фракции: $P - 10,1$ МПа и $T - 40^0\text{C}$; $P - 20,3$ МПа, $T - 40^0\text{C}$; $P - 40,5$ МПа и $T - 40^0\text{C}$; $P - 40,5$ МПа и $T - 90^0\text{C}$. Перешедшие в ГЭ компоненты извлекались из раствора в сепараторах: первый при $P - 7,09$ МПа и $T - 40^0\text{C}$ ($\text{ГЭ}_1^{\text{сеп}}$), второй – при $P - 4,04$ МПа и $T - 20^0\text{C}$ ($\text{ГЭ}_2^{\text{сеп}}$). Самые подвижные компоненты улавливались в фильтре с силикагелем и активированным углем. Фильтр открывался по окончании опыта (ГЭ^Φ). Из параллельной пробы породы извлекался хлороформный битумоид – ХБА («до опыта»). После опыта с газом извлекался оставшийся в породе битумоид – ХБ_{по} («после опыта»).

Для получения ВЭ сосуд с породой заполнялся водой, далее нагнетался углекислый газ, необходимые P и T поддерживались в течение опыта (1-2 месяца), затем вода с растворенными компонентами (ВОВ) вытеснялась во второй сосуд, в котором поддерживались P и T опыта, после чего P и T снижались до атмосферных, при этом основная масса растворившихся компонентов выделялась из раствора, оседала на стенках сосуда и после слива воды смывалась бензолом («смывы»), а из воды хлороформом и изобутиловым спиртом извлекались ВОВ, сохранившиеся в растворе.

Типичная картина изменения группового и углеводородного состава ГЭ и ВЭ при различных термобарических условиях извлечения и сепарации представлена на примере экспериментов с мергелем кумской свиты P_2 Предкавказья (р. Аргун, $C_{\text{орг}} - 2,9$; $\text{НО} - 20\%$; табл. 1). Изменение элементного состава в процессе миграции в газовом растворе при изменении условий даны в табл. 2. Сравнение отношения пристан/фитан в исходном битумоиде и в ГЭ представлены в табл. 3.

По результатам более 200 опытов установлены следующие закономерности.

1. При снижении P и T из растворов в сепараторах выделяются наименее растворимые компоненты, которые в природных условиях оседают по путям миграции при изменении термобарических условий; фракции УВ в ГЭ и в ВЭ близки по гамме – C_{11-30} , с максимумом на C_{14-18} , но доля УВ в ГЭ примерно в 1,5 раза выше ($\bar{x} \sim 78\%$), чем во фракциях ВЭ (42-68%, $\bar{x} \sim 50\%$).

Таблица 1

**Изменение состава газовых и водных экстрактов, полученных из мергеля кумской свиты P₂ (р. Аргун)
при различных условиях извлечения и сепарации**

№ фракции	Характер фракции	Характер экстракта				Выход экстракта, % на породу	Состав экстрактов, % на фракцию								Молекулярная масса	
		условия извлечения		Условия сепарации			МНУВ				АРУВ			смолы+ асфальтены		МНУВ АРУВ
		P,МПа	T ⁰ C	P,МПа	T ⁰ C		n _d ²⁰ < 1,47	n _d ²⁰ от 1,47 до 1,48	n _d ²⁰ > 1,48	ΣМНУВ	моноцикл.	бицикл.	ΣАРУВ			
I	ГЭ ₂ ^{сеп}	10,1	40	4,05	20	0,0150	76,7	-	-	76,7	13,0	3,0	16,0	7,3	4,8	244
	ГЭ ₁ ^{сеп}	10,1	40	7,09	40	0,0216	52,4	27,8	-	80,2	11,6	3,2	14,8	5,0	5,4	272
II	ГЭ ₁₊₂ ^{сеп}	20,3	40	4,05- 7,09	20-40	0,0250	48,0	17,7	4,0	69,6	10,0	9,2	19,2	11,2	3,6	293
III	ГЭ ₂ ^{сеп}	40,5	40	4,05	20	0,0060	45,0	15,0	-	60,0	8,3	10,0	18,3	21,7	3,3	233
	ГЭ ₁ ^{сеп}	40,5	40	7,09	40	0,0113	8,0	31,0	18,4	57,4	14,2	14,2	28,4	14,2	2,2	288
IV	ГЭ ₁₊₂ ^{сеп}	40,5	90	4,05- 7,09	20-40	0,0132	-	20,5	28,8	49,3	6,8	24,2	31,0	19,7	1,6	330
	ГЭ _ф	10,1- 40,5	20-90	4,05	20	0,0079	63,3	12,7	-	76,0	5,0	5,0	10,0	14,0	7,6	231- 240
	ΣГЭ					0,1000	43,4	18,5	6,9	68,8	9,6	10,0	19,6	11,6	3,5	
	ХБПО					0,1950	-	0,5	4,5	5,0	1,0	7,9	8,9	86,2	0,6	623
	ХБА					0,3000	8,3	6,7	7,7	22,7	3,7	10,6	14,3	63,0	1,6	382
	ВЭ	10,1	40	атм.	20	0,0099	фракция «смывы»			43,6			33,5	22,9	1,3	
	ВЭ	40,5	90	атм.	20	0,1868	фракция «смывы»			24,2			10,8	65,0	2,2	
	ВЭ	40,5	90	атм.	20	0,0276	ХЭ + ИБСЭ из ВЭ			7,5			2,9	89,6	2,6	

**Изменение элементного состава газовых и хлороформных экстрактов из мергеля доманиковой свиты D₃ (р. Ухта)
при изменении условий извлечения и сепарации**

№ фракции ГЭ	Характер газового экстракта				Количество битумоида, %	Элементный состав			
	Условия извлечения		Условия сепарации			% на фракцию			$\frac{C+H}{S+N+O}$
	P, МПа	T ⁰ С	P, МПа	T ⁰ С		C	H	S+N+O	
I	10,1	40	4,05	20	0,266	84,6	13,0	2,4	40,7
II	20,3	40	4,05	20	0,063	82,1	12,1	5,8	16,2
III	40,5	40	4,05	20	0,030	80,4	11,4	8,2	11,2
IV	40,5	90	7,1-4,05	40-20	0,188	79,8	9,6	10,6	8,4
Σ ГЭ					0,547	82,3	12,1	5,6	16,8
ХБ _{по}					0,620	75,4	8,8	15,8	7,6
ХБА					1,240	80,9	10,8	8,3	11,0

Таблица 3

Отношения пристан/фитан в исходном битумоиде ХБА и в газовых экстрактах

Место отбора образца		Возраст	Характер экстракта	пристан/фитан
Русская плита	Кашпирское м-ние горючих сланцев	J _{3v}	ХБА	1,0
			ГЭ ^ф	3,0
			ГЭ ^{сеп}	2,1
Западно-Сибирская плита	Салымская пл.	J _{3bj}	ГЭ ^ф	3,8
			ГЭ ^{сеп}	1,6
	Коллективная пл.	J _{3bj}	ХБА	1,3
			ГЭ ^ф	2,2
			ГЭ ^{сеп}	1,0
	Поточная пл.	J _{3bj}	ХБА	1,0
	Поточная пл. (эпибитумоид на границе с баженовской свитой)	J _{3v}	ХБА	3,5

2. Наиболее миграционноспособные компоненты, сохранившиеся в растворах, в природных условиях находящиеся во фронтальной части мигрирующего флюида, также близки по гамме – C₈₋₂₀, с максимумом на C₈₋₁₁, однако соотношение УВ и углеводородных компонентов различаются еще контрастней – в ГЭ УВ составляют до 98%, а в водных – $\bar{x} \sim 12\%$ (min – 2%).

Таким образом, количество углеводородных компонентов уменьшается от 98 до 2% в ряду: фракция МН, сохранившаяся в ГЭ при снижении термобарических условий > фракции МН, выделившейся из ГЭ > фракции МН, выделившейся из водного раствора > фракции, сохранившейся в водном растворе.

3. Адсорбционно-хроматографическое фракционирование, как и изменение термобарических условий, приводят к перераспределению компонентов между сорбируемыми и мигрирующими частями МН. Наиболее информативными показателями являются следующие отношения: МНУВ/АРУВ, пристан/фитан, (С+Н)/(S+N+O), которые увеличиваются во фронтальной части мигрирующего флюида. Так, отношение МНУВ/АРУВ в исходном хлороформном битумоиде из мергеля кумской свиты р. Аргун (см. табл. 1) равно 1,6; в ГЭ^ф достигает 7,6; в суммарном ГЭ ~ 3,5. В ВЭ это отношение значительно ниже (не выше 2,6), а во фракции, выделившейся из ВЭ при падении Р и Т, даже ниже, чем в исходном битумоиде, и равно 1,3. Обусловлено это тем, что при образовании истинных растворов УВ в воде происходит селективное удаление моноциклических аренов и легких метановых УВ. В

эмигрирующей части может наблюдаться снижение отношения МНУВ/АРУВ. Однако при образовании коллоидно-эмульсионных растворов, когда в качестве ПАВ выступают асфальтеново-смолистые компоненты, мигрирующий битумоид будет мало отличаться от недифференцированного битумоида. В послеопытном хлороформном экстракте отношение МНУВ/АРУВ снижается до 0,6 (см. табл. 1).

Изменение элементного состава в процессе миграции в газовой фазе можно проследить на примере ГЭ из мергеля доманиковой свиты D₃ (р. Ухта, см. табл. 2). Доля гетероэлементов в исходном битумоиде достаточно велика и отношение (С+Н)/(S+N+O) равно 11, в составе наиболее миграционноспособной части МН в ГЭ это отношение достигает 40,7, а в суммарном ГЭ ~ 17. Доля гетероэлементов увеличивается по мере удаления от фронта миграции от 2,4 до 15,8 (в послеопытном битумоиде).

Иная закономерность наблюдается при миграции в водном растворе: доля гетероэлементов изменяется от 4,8% (\bar{x} по 29 опытам) во фракции, выделившейся из раствора при снижении Р и Т, до \bar{x} – 42,7% во фракции, сохранившейся в водном растворе. Учитывая эти различия при изучении природных объектов, можно сделать предположительные выводы о преобладающем механизме миграции на данном участке породы.

В результате термобарической дифференциации состава газовых экстрактов отношения C₁₇/C₁₈ и, соответственно, пристан/фитан (Pr/Ph) значительно увеличиваются. Так, если в исходном битумоиде Pr/Pf близко к 1 (см. табл. 3), то во фронтальной части мигрирующего флюида (ГЭ^ф) это отношение достигает 3,8.

ДИАГНОСТИКА ПЕРВИЧНОМИГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВАНИИ ИЗУЧЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИТУМОИДОВ В ПОРОВОЙ СИСТЕМЕ ПОРОД

Обоснование метода

Общепринятой в органической геохимии является методика извлечения битумоидов из дробленной породы. При таком подходе необратимо нарушается естественное распределение битумоидов в поровой системе, смешиваются битумоиды открытых (П_о) и закрытых (П_з) пор, в разной степени подвергавшихся воздействию природных процессов, в результате теряется ценная информация, необходимая для характеристики битумоидов и оценки состояния первичномиграционных процессов (ПМП).

С целью сравнительного изучения битумоида из P_0 и P_3 нами была разработана оптимальная схема анализа, заключающаяся в последовательном извлечении сначала газового и хлороформного экстрактов из недробленной породы ($ГЭ_0$, $ХБ_0$), а затем газового и хлороформного экстрактов после дробления того же образца породы ($ГЭ_3$, $ХБ_3$).

В основе метода лежат следующие положения и допущения.

1. Исходное ОВ и битумоидные компоненты равномерно распределены в породе, при уплотнении пород часть битумоида оказывается изолированной в закрытых порах, состав его ближе к синбитумоиду, так как не осложнен процессами иммиграции, а в случае образцов из обнажений в меньшей степени подвержен гипергенным изменениям. Исходя из сохранности в подобных порах седиментогенных вод [Богомолов, 1968] и сингенетичных газов [Рогозина, 1968], естественно предположить сохранность менее подвижных компонентов – битумоидов.

2. Различия в составе битумоидов открытых и закрытых пор являются, в основном, результатом наложения миграционных процессов. Это положение требует уточнения и проверки, так как согласно теоретическим разработкам [Whittaker, Dayson, 1980] и результатам моделирования [Глебовская, 1974] установлено, что в случае затрудненного оттока продуктов генерации и возникновения АВПД процесс катагенетического преобразования ОВ тормозится, приобретает взрывной, пульсационный характер, при этом генерация битумоидов и УВ снижается, а доля CO_2 в газовой фазе увеличивается. Возможность влияния АВПД учитывалась при интерпретации полученных результатов.

3. В наших экспериментах при извлечении газовых и хлороформных экстрактов из недробленных пород извлекаются битумоиды, приуроченные к открытым порам, а после дробления – битумоиды закрытых пор. Подтверждением этого положения служит следующее наблюдение: дробление породы после исчерпывающей экстракции газом и хлороформом приводит к резкому увеличению выхода экстракта, в том числе миграционноспособных компонентов, часто содержащих УВ более широкой гаммы, чем в экстракте из недробленной породы. Это наблюдение позволяет предположить, что как в эксперименте, так и в пластовых условиях не весь подвижный битумоид способен участвовать в миграционных процессах при сохранении существующей поровой структуры. Одновременно, повышенное содержание УВ в $ГЭ_3$ (из закрытых пор) свидетельствует о том, что негативное влияние АВПД на генерацию битумоидов слабее, чем влияние процессов эмиграции из P_0 .

Диагностика состояния ПМП проводилась на основании изучения распределения пор в породе и битумоидов в поровой системе и сравнения состава битумоидов из открытых и закрытых пор с учетом установленных закономерностей дифференциации состава микронепти в процессе миграции.

Можно логически вывести ряд природных процессов, приводящих к осложнению картины распределения битумоидов в поровой системе:

- в породах может развиваться значительная вторичная пористость, что нарушит исходное распределение пор в породе и битумоидов в поровой системе;

- часть подвижных битумоидов могла эмигрировать или иммигрировать ранее, чем произошла изоляция основной массы закрытых в настоящее время пор;

- в P_0 могут скопиться подвижные УВ с других участков породы, а сингенетичные легкие компоненты – эмигрировать (компенсированное перераспределение).

Учитывая возможные осложнения, параллельно с химико-битуминологическим исследованием проводилось детальное петрографическое и люминесцентно-микроскопическое изучение пород до и после удаления битумоидов из P_0 . Особое внимание уделялось различным признакам ПМП: специфике распределения РОВ, ореолов рассеяния, преобразования карбонатов, появлению вторичной пористости; выявлению изменений, происходящих после удаления битумоидов из P_0 и наличию флюидоразрывов (ФР), образующихся при пульсационном выбросе новообразованных подвижных компонентов РОВ из замкнутого пространства по мере достижения давления прорыва. ФР – наглядные свидетельства межпорового перераспределения битумоидов. Кроме вышеуказанной причины, к межпоровому перераспределению могут привести различные процессы, связанные с уплотнением и (или) сопровождающиеся перестройкой структуры породы: перекристаллизация, доломитизация, гидрослюдизация, выщелачивание карбонатов, нарушение монолитности пород с образованием макро- и микротрещиноватости под воздействием тектонических движений и других факторов.

Раздельное изучение битумоидов открытых и закрытых пор позволяет в ряде случаев диагностировать масштаб межпорового перераспределения и определять количество паравтохтонного битумоида.

Методика извлечения битумоидов из открытых и закрытых пор пород

Основная часть коллекции исследовалась путем последовательного извлечения газовых и хлороформных экстрактов сначала из недробленных, затем из дробленных пород.

Методика извлечения ГЭ описана выше, отличие заключалось лишь в том, что порода погружалась в реактор в виде кусков, размером 1,5-2,5 x 3-5 см. После извлечения ГЭ₀^{сеп} и ГЭ₀^ф из этой недробленной породы извлекался хлороформный битумоид (ХБ₀). Длительность исчерпывающей экстракции из малобитуминозных недробленных пород 20-60 дней, из битуминозных – до 180 дней, а из пород типа баженовской свиты – до 300 дней. Затем порода дробилась до 0,15 мм и из нее последовательно извлекались газовый (ГЭ₃) и хлороформный экстракты (ХЭ₃) из закрытых пор.

Анализ пород с равномерным распределением битумоида показал, что суммарный экстракт из П₀ и П₃ сопоставим с ХБА, полученным из сразу раздробленной породы.

Величина открытой пористости (П₀) определялась по методу Преображенского, общая пористость (П_{общ}) – по методу Мельчера, закрытая пористость по разности П_{общ}-П₀ = П₃. Абсолютная ошибка определения П_{общ}, по данным Б.Ф. Ременева [Котяхов, 1956], не превышает 2-4% при расхождении в определении П₀ не более 0,87%. Ошибка определения растет с уменьшением определяемой величины и для низких значений показатели пористости являются ориентировочными. По методу Преображенского в случае битуминозных пород производится предварительная кратковременная отмывка зерна хлороформом. Из коллекторских пород, заполненных нефтью, экстракция происходит быстро, но в случае битуминозных материнских пород, типа аргиллитов баженовской свиты, кратковременная экстракция удаляет неопределенную часть битумоидов, что приводит к заниженным и нестабильным значениям открытой пористости. Кроме того, битуминозные породы с ОВ, достигшим градации ПК₃-МК₂, после удаления битумоида из недробленной породы, сильно расслаиваются, при этом происходят необратимые изменения в макроструктуре породы. Расхождения между показателями пористости и экстракции в подобных случаях неизбежны. Для определения коллекторских свойств пород типа аргиллитов баженовской свиты и реальной величины «свободной» П₀ предлагается предварительную экстракцию производить сжатым углекислым газом в «пластовых» термобарических условиях.

Результаты определения П₀ на примере 90 образцов аргиллитов баженовской свиты с различной предварительной обработкой показали, что П₀^{исх} (без обработки) в среднем 1,05%, после газовой экстракции (СО₂, Р=30 МПа, Т- 90₀С, 25 часов) «свободная» П₀ $\bar{x} \approx 2,3\%$, после кратковременной обработки хлороформом (по Преображенскому) $\approx 5,23\%$, после исчерпывающей экстракции – «полная» П₀ $\bar{x} - 8,52\%$. Для «малобитуминозных» пород (120

образцов, $\bar{x} C_{\text{орг}} \approx 1\%$) различия в значениях Π_0 до и после экстракции составили около 0,8%, что соизмеримо с величиной ошибки определения.

Особенности и неизбежные методические погрешности при определении открытой пористости в обогащенных разностях необходимо учитывать при сопоставлении показателей пористости и показателей экстракции, а также при определении порового объема.

Последовательное извлечение битумоидов из недробленых пород различными растворителями – сжатым углекислым газом, а затем хлороформом – показало, что в открытых порах, кроме свободных миграционноспособных углеводородов, присутствуют потенциально миграционноспособные углеводороды, но заблокированные высокомолекулярными асфальтеново-смолистыми (Асф-См) компонентами, миграция которых и в пластовых условиях будет затруднена. Особенно велика доля заблокированных УВ ($УВ_{36}$) в углеводородной фракции обогащенных разностей на грациях ПК₃-МК₁ (до 87%).

В 120 исследованных породах определялись три категории битумоидов: миграционноспособные – ГЭ₀, заблокированные – ХБ₃₆, включающие блокирующие асфальтеново-смолистые компоненты и УВ₃₆, и битумоид закрытых пор ХБ₃.

Для 140 пород определялись только ХБ₀ и ХБ₃ [Белецкая, Сырова, 1972].

Расчет **материального баланса экспериментов** по извлечению битумоидов сжатыми газами проведен для пород, раздробленных до опытов, и при извлечении сначала из недробленых, а затем из дробленых пород. Расчет производился отдельно для УВ, смол и асфальтенов. Установлено, что расхождения в балансе – несоответствие между количеством данного компонента в ХБА до опыта и суммой ХБ после опыта и ГЭ – для УВ весьма малы, среднее значение $\bar{x} \sim -0,9\%$ от ХБА (пределы колебаний 0-2,7%). Важно отметить, что в ряде опытов, ГЭ которых представляли сумму 7-12 фракций, расхождения в балансе по УВ практически отсутствовали, что свидетельствует о высокой точности экспериментов и используемых методов анализа. Расхождения в балансе по высокомолекулярным компонентам составляет $\bar{x} \sim -8\%$ (до -16%), дефицит Асф+См в ХБ после опыта обусловлен полимеризацией и потерей растворимости асфальтеново-смолистых соединений после удаления УВ с газом.

Качественная характеристика ПМП

Производится она на основании изучения распределения битумоидов и различных их компонентов в поровой системе. С этой целью сравниваются отношения, характеризующие

распределение пор в породе (P_0/P_3) и битумоидов или битумоидных компонентов, выраженных в % на породу, в поровой системе ($УВ_0/УВ_3$, $ГЭ_0/ГЭ_3$, $ХБ_0/ХБ_3$, $См_0/См_3$, $Асф_0/Асф_3$ и другие).

В связи с тем, что методы определения пористости недостаточны для более объективных выводов о состоянии ПМП, рассчитывались «показатели сохранности» (ПС) наиболее миграционноспособных компонентов:

$$ПС_{\text{МНУВ}} = \frac{(МНУВ / АРУВ)_0}{(МНУВ / АРУВ)_3}; \quad ПС_{\text{ЛУВ}} = \frac{(ЛУВ / ТУВ)_0}{(ЛУВ / ТУВ)_3} \quad (1),$$

где ЛУВ – C_7 - C_{14} ; ТУВ – C_{15} и выше.

Многочисленные примеры различных вариантов возможных сочетаний рассматриваемых отношений и их интерпретация приведены в ряде работ [Белецкая, 1990; Белецкая, Сырова, 1972; Белецкая, Сахибгареев, 1986].

Несколько примеров.

1. P_0/P_3 выше отношений, характеризующих распределение битумоидов в порах (в % на породу) – свидетельство недонасыщенности P_0 , что возможно при наличии остаточного битумоида или при образовании значительной вторичной пористости. Окончательный вывод о состоянии ПМП необходимо скорректировать с петрографическим изучением пород в шлифах.

2. $ПС_{\text{МНУВ}}$ в ХБ больше 1, а в ГЭ меньше 1 – такое соотношение свидетельствует об эмиграции свободных МНУВ из P_0 , но сохранности их в заблокированном состоянии. Подобные логические построения применимы при интерпретации других соотношений.

Количественная характеристика состояния ПМП

На основании состава битумоидов закрытых пор выявляется дефицит или избыток миграционноспособных компонентов в P_0 .

1. Расчет дефицита или избытка УВ в P_0 , исходя из количественного соотношения УВ и асфальтеново-смолистых компонентов в P_3 , которое принималось за исходное, а точнее – наиболее близкое к исходному, производился по формуле

$$\Delta УВ_0 = \frac{(Асф + См)_0 \cdot УВ_3}{(Асф + См)_3} - УВ_0, \quad \% \text{ на породу} \quad (2).$$

2. В случае дефицита ЛУВ, УВ и смол суммарная величина отдачи этих компонентов из открытых пор определялась по формуле

$$\Delta(\text{ЛУВ} + \text{УВ} + \text{См})_0 = \frac{\text{Асф}_0 \cdot (\text{ЛУВ} + \text{УВ} + \text{См})_3}{\text{Асф}_3} - (\text{ЛУВ} + \text{УВ} + \text{См})_0, \quad \% \text{ на породу} \quad (3),$$

где УВ, Асф, См – количество этих компонентов, % на породу (или г/кг породы), извлеченных из недробленых (индекс «о») или дробленых (индекс «з») пород.

Коэффициент отдачи из Π_0 ($K_{\text{отд}}^o$) определялся по формуле

$$\sum K_{\text{отд}}^o = \frac{\Delta(\text{ЛУВ} + \text{УВ} + \text{См})_0 \cdot 100}{\sum \text{ХБ} + \Delta(\text{ЛУВ} + \text{УВ} + \text{См})_0}, \quad \% \text{ на битумоид} \quad (4).$$

3. Если прошло межпоровое перераспределение и битумоид закрытых пор имеет остаточный характер, а также в случае перехода асфальтенов открытых пор в нерастворимое состояние, расчет по формулам 3 и 4 дает заниженные значения.

Было предложено несколько приемов для выявления более точной величины отдачи микроневфти.

Исходя из экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что при повышенном давлении и наличии влаги практически полностью исчезает хроматографическая дифференциация смеси, было сделано предположение, что межпоровое перераспределение, происходящее по механизму флюидоразрыва, вызываемого АВПД, осуществляется как пульсационный выброс слабо дифференцированной газожидкостной смеси. В результате такие отношения, как, например, МНУВ/АРУВ, ЛУВ/ТУВ в эмигрирующем из Π_3 и в оставшемся битумоидах будут близки между собой. Эмиграция из Π_0 идет иначе – практически постоянно, с большей или меньшей интенсивностью, а состав эмигрирующей смеси зависит от механизма миграции, термобарических условий и сопровождается значительной ее дифференциацией. Исходя из соотношения МНУВ/АРУВ в Π_3 можно оценить дефицит МНУВ в Π_0 и рассчитать $K_{\text{отд}}^{\text{МН}}$ ($K_{\text{отд}}^{\text{МН}}$):

$$\Delta\text{МНУВ}_0 = \frac{\text{МНУВ}_3 \cdot \text{АРУВ}_0}{\text{АРУВ}_3} - \text{МНУВ}_0, \quad \% \text{ на породу} \quad (5).$$

Исходный реконструированный битумоид $\text{ХБ}_{\text{ИР}}$ равен $\Delta\text{МНУВ} + \sum \text{ХБ}$.

$$K_{\text{отд}}^{\text{МН}} = \frac{\Delta\text{МНУВ}_0 \cdot 100}{\text{ХБ}_{\text{ИР}}}, \quad \% \text{ на битумоид} \quad (6).$$

При таком расчете отдачи не учтена эмиграция АРУВ и смол.

4. Как показала многолетняя практика изучения распределения битумоидов в поровой системе, для разновозрастных однопородных пород наблюдаются весьма близкие величины битумоидных коэффициентов как для $\text{ХБ}_{3\text{б}}$, так и для ХБ_3 , а различаются породы, в

основном, количеством миграционноспособных компонентов в Π_0 (β_0), что обусловлено состоянием эмиграционных процессов. Исходя из этого наблюдения, в коллекции однотипных пород выбирался эталонный образец, сингенетичный битумоид которого был в наименьшей степени затронут процессами эмиграции и перераспределения. По формулам 3 и 4 рассчитывался исходный реконструированный битумоид и определялся битумоидный коэффициент эталонного образца ($\beta_{ИР}^{ХБ}$). Коэффициент отдачи ($K_{отд}^{э}$) рассчитывался по формуле:

$$K_{отд}^{э} = \frac{(\beta_{ИР}^{ХБ} - \beta^{ХБ}) \cdot 100}{\beta_{ИР}^{ХБ}}, \% \text{ на битумоид} \quad (7).$$

5. Избыток УВ в Π_0 , обусловленный межпоровым перераспределением, сопровождается дефицитом УВ в Π_3 , для расчета которого предложена формула:

$$\Delta УВ_3 = \frac{(Асф + СМ)_3 \cdot УВ_0 - (Асф + СМ)_0 \cdot УВ_3}{(Асф + СМ)_0 + (Асф + СМ)_3}, \% \text{ на породу} \quad (8)$$

$$\text{или } \frac{\Delta УВ_3 \cdot 100}{\sum ХБ}, \% \text{ на битумоид.}$$

Если $\frac{ХБ_0 - \Delta УВ_3}{ХБ_3 + \Delta УВ_3}$ в реконструированном битумоиде будет близким к отношению

Π_0/Π_3 , можно предположить только межпоровое перераспределение, а в случае превышения – возможно присутствие паравтохтонного, эмиаллохтонного или эпигенетичного битумоида.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПЕРВИЧНОМИГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ КАТАГЕНЕЗЕ ОВ

Распределение битумоидов в поровой системе пород и закономерности развития ПМП

Диагностика состояния ПМП на основании изучения распределения битумоидов в поровой системе осуществлена для 260 образцов пород различного геологического возраста – от рифея до кайнозоя, представляющих различные геотектонические области – древние и молодые платформы, авлакогены, краевые прогибы и альпийские складчатые области, из разных регионов (Прибалтики, Волго-Уральской и Тимано-Печорской областей, Восточной и Западной Сибири, Средней Азии, Предкарпатья, Северного Кавказа и др.). Литологический состав исследованных пород глинистый, карбонатный и смешанный, содержание $C_{орг}$ в них колеблется от 0,5 до 10%, тип ОВ – сапропелиты, гумиты и смешанные разности, градации катагенеза от $ПК_1$ до АК. Поровые характеристики колебались в широком интервале

значений. Изменение Π_0 и Π_3 с глубиной представлено на рис. 1. Открытая пористость изменялась от 30 до 0,33%. С глубиной наблюдается сближение значений Π_0 и Π_3 , а для некоторых групп пород Π_3 превышает величину Π_0 .

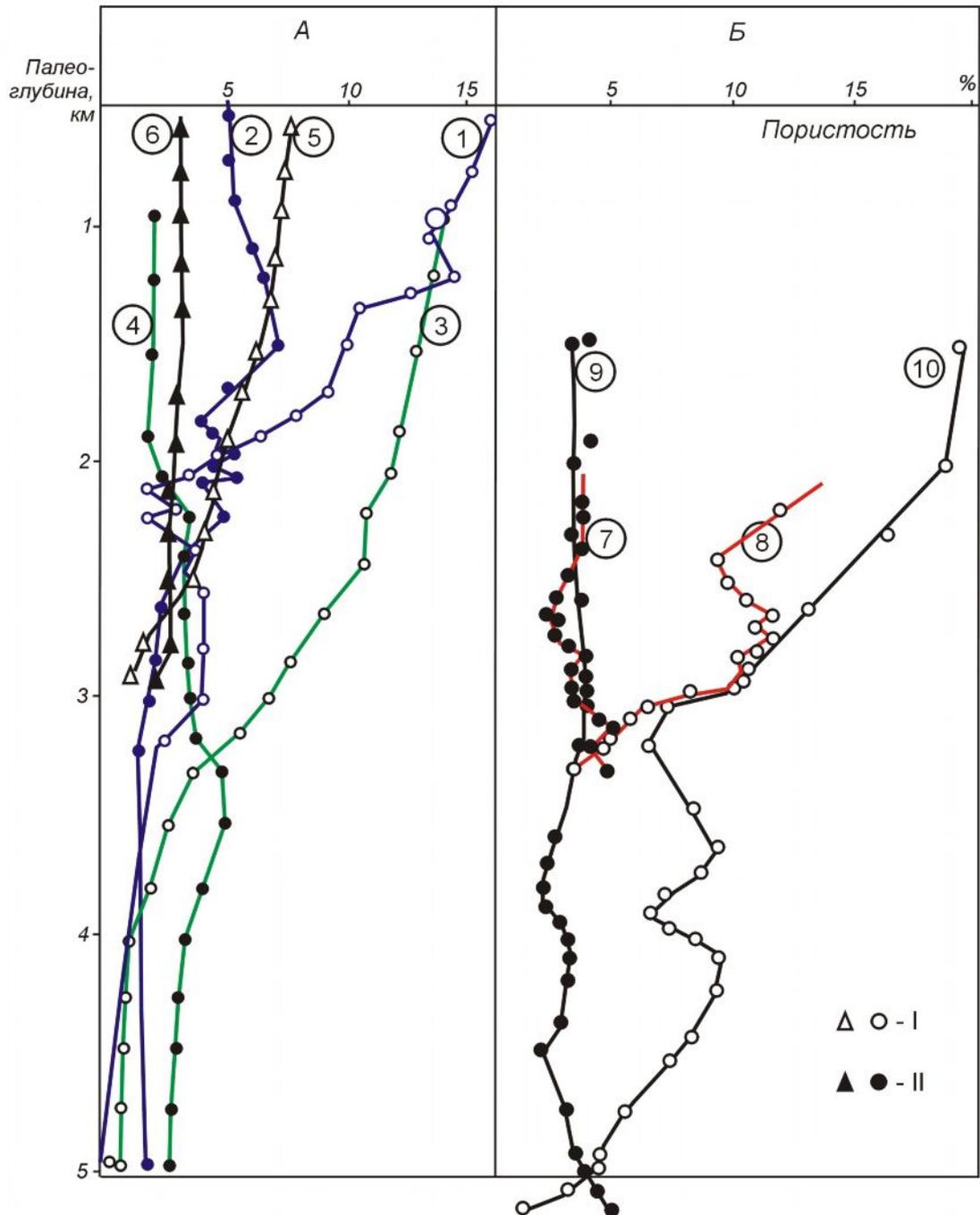


Рис. 1. Изменение открытой (I) и закрытой (II) пористости с глубиной в породах древних платформ (А), эпигерцинских платформ и альпийских краевых прогибов (Б)

Кривые для подгрупп пород: 1, 2, 7, 8 – битуминозных терригенных; 3,4,9,10 – палеобитуминозных терригенных; 5,6 – малобитуминозных карбонатных.

На рис. 2 представлены кривые, отражающие изменение с глубиной доли открытых пор в общей пористости и доли битумоида из недробленых пород в суммарном битумоиде. Первое, что обращает на себя внимание, – это удивительно синхронное изменение двух независимо определяемых параметров, а также близость этих параметров на значительном интервале глубин и сохранение специфических особенностей для каждой из рассматриваемых выборок, что свидетельствует, во-первых, о соответствии битумоидов, извлекаемых из недробленых пород, битумоидам из открытых пор и, во вторых, о параллелизме, а, возможно, и о взаимосвязи двух процессов – преобразования поровой структуры при уплотнении пород и эмиграции части битумоидов.

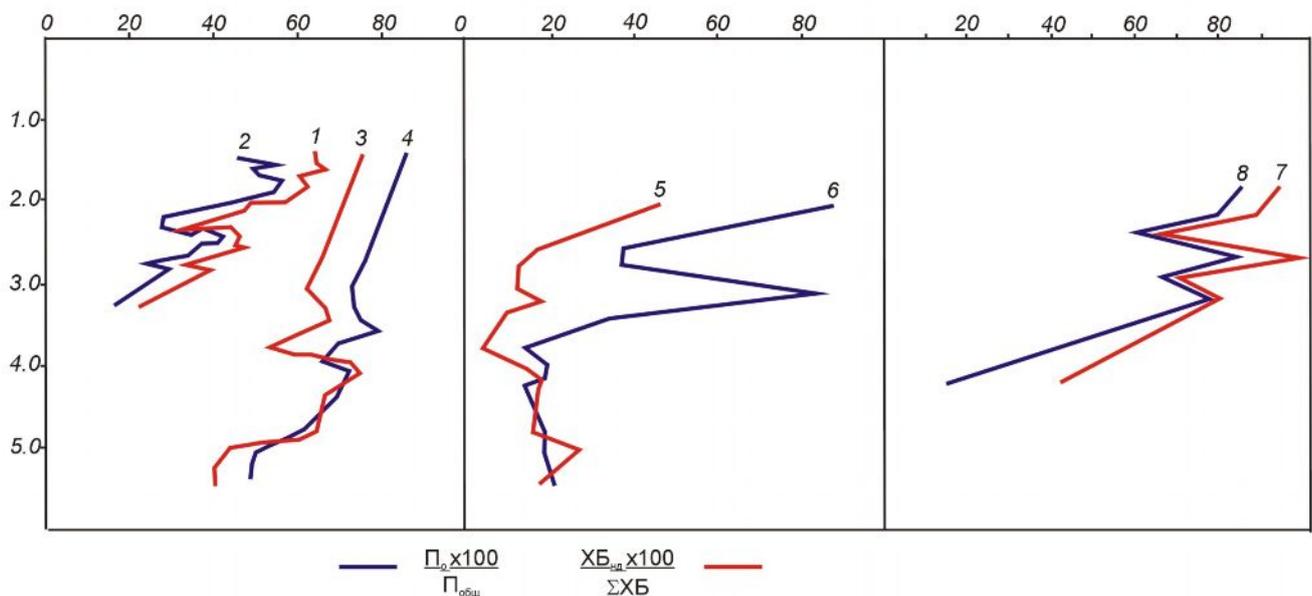


Рис. 2. Изменение доли битумоидов из недроблённых пород в суммарном битумоиде (1, 3, 5, 7) и доли открытых пор в общей пористости (2, 4, 6, 8) с погружением отложений

Условные обозначения: 1, 2 – древние платформы (40 образцов, $\bar{x} C_{орг} \sim 0,45\%$, \bar{x} карбонатность $\sim 90,3\%$); 3, 4 – Кавказ, альпийские краевые прогибы (18 образцов, $\bar{x} C_{орг} \sim 1,3\%$); 5, 6 – Донбасс C_2 (13 образцов, $\bar{x} C_{орг} \sim 0,93\%$); 7, 8 – эпигерцинские платформы (8 образцов, $\bar{x} C_{орг} \sim 1,7\%$, \bar{x} карбонатность $\sim 32\%$).

Суммируя результаты изучения закономерностей распределения битумоидов в поровой системе пород, а также сведения о выявленных в исследуемых породах петрографических особенностях (Сахибгареев Р.С.), можно охарактеризовать состояние ПМП на различных этапах катагенеза.

На грациях ПК основная масса битумоидов приурочена к открытым порам, фиксируется дефицит УВ, ЛУВ и МНУВ в P_0 , $K_{отд}^{МН}$ до 20%, отношение МНУВ/АРУВ в P_3 до 6, а в P_0 меньше 1, гамма УВ в P_3 (C_8-C_{30}) (см. рис. 2). **К концу ПК и на МК₁** снижение доли P_0 и доли $XБ_0$ происходит на фоне резкого увеличения количества битумоидов – $\beta_{\SigmaХБ}$ увеличивается до 14% для слабообогатенных разностей и до 35% – для обогатенных разностей. Важно подчеркнуть, что фиксируется это увеличение для слабообогатенных ОВ пород, в основном, за счет роста и сохранности битумоидов закрытых пор (рис. 3-Б), а для обогатенных – за счет заблокированных битумоидов, эмиграция которых на этом этапе затруднена. Миграционноспособные компоненты из P_0 удаляются по мере генерации, что приводит к снижению доли $XБ_0$. Фиксируется дефицит МНУВ до 32%, но из-за активизации межпорового перераспределения и степени остаточности битумоида $XБ_3$, расчет коэффициентов отдачи МНУВ и, особенно, $УВ_0$ для этого этапа (и далее) дают резко заниженные значения и не отражают реального состояния ПМП. Наблюдается обилие следов флюидоразрывов, выполненных коричневым битумоидом. В ряде пород выявляется паравтохтонный битумоид, заполняющий полости выщелачивания карбонатного материала.

На грации МК₂¹ снижается доля паравтохтонного битумоида в результате ухода $УВ_0$ и самокальматации оставшихся высокомолекулярных соединений (при сохранении их общего количества, основная масса приурочена к битумоиду, извлекаемому после дробления), доля $XБ_3$ резко возрастает (рис. 3-А). Исключение на грациях МК₁ и МК₂ представляют породы майкопской свиты краевых прогибов, в которых сохранились миграционноспособные компоненты ($МНУВ_0$ в P_0).

Грация МК₂² – завершающий этап ГФН, характеризующийся снижением $\beta_{\SigmaХБ}$, что обуславливается, как выяснилось, преобразованием блокирующих асфальтеново-смолистых компонентов, эмиграцией высвободившихся $УВ_{36}$ и новообразованных ЛУВ, а также переходом части полимеризовавшихся высокомолекулярных соединений в нерастворимое состояние, $Асф_0/Асф_3$ снижается от 30 (ПК) до 0,5. Наблюдается сплошная сеть ФР, выполненных черным битумоидом. $K_{отд}^{ЭТ} = 60-70\%$.

Грации МК₃₋₅ характеризуются присутствием остаточного битумоида, $K_{отд}^{ЭТ}$ увеличивается до 70-95%, однако истинная отдача на 1-3% ниже, так как в состав «эмигрировавшего» битумоида включена часть асфальтеново-смолистых компонентов, перешедших в нерастворимое состояние.

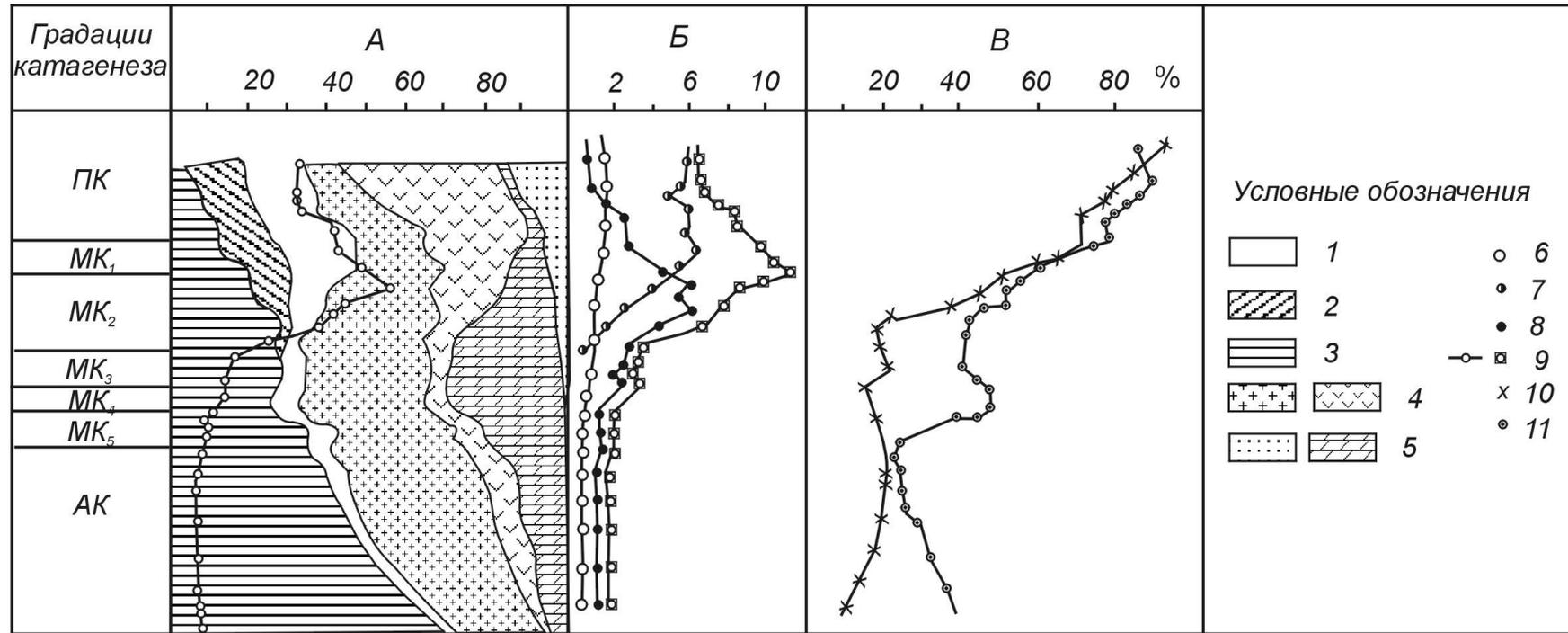


Рис. 3. Изменение различных параметров в процессе катагенетического преобразования ОВ малобитуминозных терригенных пород древних платформ ($\bar{x} C_{орг} - 1,0\%$, НО – 75%, 34 образца)

Условные обозначения:

А – изменение состава битумоидов, в % на битумоид: 1 – углеводороды из открытых пор, 2 – заблокированные углеводороды, 3 – углеводороды закрытых пор, 4 – смолистые компоненты из открытых и закрытых пор. Б – изменение битумоидных коэффициентов, в % на $C_{орг}$: 6 – миграционноспособных компонентов из открытых пор, 7 – заблокированных углеводородов и блокирующих компонентов, 8 – битумоида закрытых пор, 9 – суммарного битумоида. В – изменение доли битумоида из недроблённой породы в суммарном битумоиде – 10 и изменение доли открытых пор в общей пористости – 11.

Специфическая особенность – ФР выполнены черным битумоидом с характерным керитоподобным блеском в отраженном свете. **На грациях АК** основная масса битумоидов приурочена к P_3 . Из-за малого количества битумоидов новые ФР не образуются и межпоровое перераспределение затухает, в результате чего в P_3 наблюдается остаточное накопление реликтовых и новообразованных УВ. Фиксируется дефицит УВ в P_0 , по сравнению с составом $XБ_3$, аналогично подстадии ПК, но он характеризует масштаб только последнего этапа эмиграции; $\sum K_{отд}^{э}$ – до 99%.

На примере малобитуминозных терригенных пород (см. рис. 3) представлено изменение состава и распределения битумоидов в поровой системе в процессе катагенеза РОВ. Доля $УВ_0$ снижается от 31 до 2%, а доля $УВ_3$ растет от 3 до 70% на фоне резкого снижения $\beta_{\Sigma ХБ}$, обусловленного отдачей микроневфти и преобразованием высокомолекулярных компонентов.

Закономерности развития ПМП летучих углеводородов в процессе катагенеза ОВ

Учитывая значительное содержание низкокипящих УВ в составе нефтей и битумоидов, а также большую способность их к миграции, особое внимание было уделено изучению распределения летучих УВ (ЛУВ) фракции C_{7-14} , теряемых при анализе по традиционной схеме.

На примере 72 образцов пород изучено распределение ЛУВ в поровой системе и развитие ПМП при катагенезе РОВ [Белецкая, 1990; Белецкая, Сергеенок, 1979].

На грациях ПК, МК₂, МК₄₋₅, АК – $ПС_{ЛУВ}$ меньше 1, гамма ЛУВ в P_3 значительно шире, а максимум сдвинут в область низкокипящих УВ, что наглядно свидетельствует о дефиците ЛУВ в P_0 (рис. 4). Фиксируется два максимума генерации ЛУВ: на ПК₃-МК₁ (максимальная установленная величина $\beta^{ЛУВ}$ достигает 3%) и на МК₃ ($\beta^{ЛУВ}$ до 1,8%), в результате процессов генерации и межпорового перераспределения в P_0 наблюдается избыток ЛУВ. Начиная с грации МК₄ во всех породах преобладают процессы эмиграции, сохраняются только ЛУВ в P_3 , их доля в суммарном битумоиде растет, достигая в отдельных случаях ~ 56% (р. Брус, известняк, ϵ_{1-2} , АК).

Таким образом, в процессе катагенеза ОВ образуется значительное количество ЛУВ, но подавляющая масса их эмигрирует из P_0 по мере генерации, фиксируемые ЛУВ – в основном остатки продуктов последнего для данной породы этапа генерации, сохранившиеся в закрытых порах.

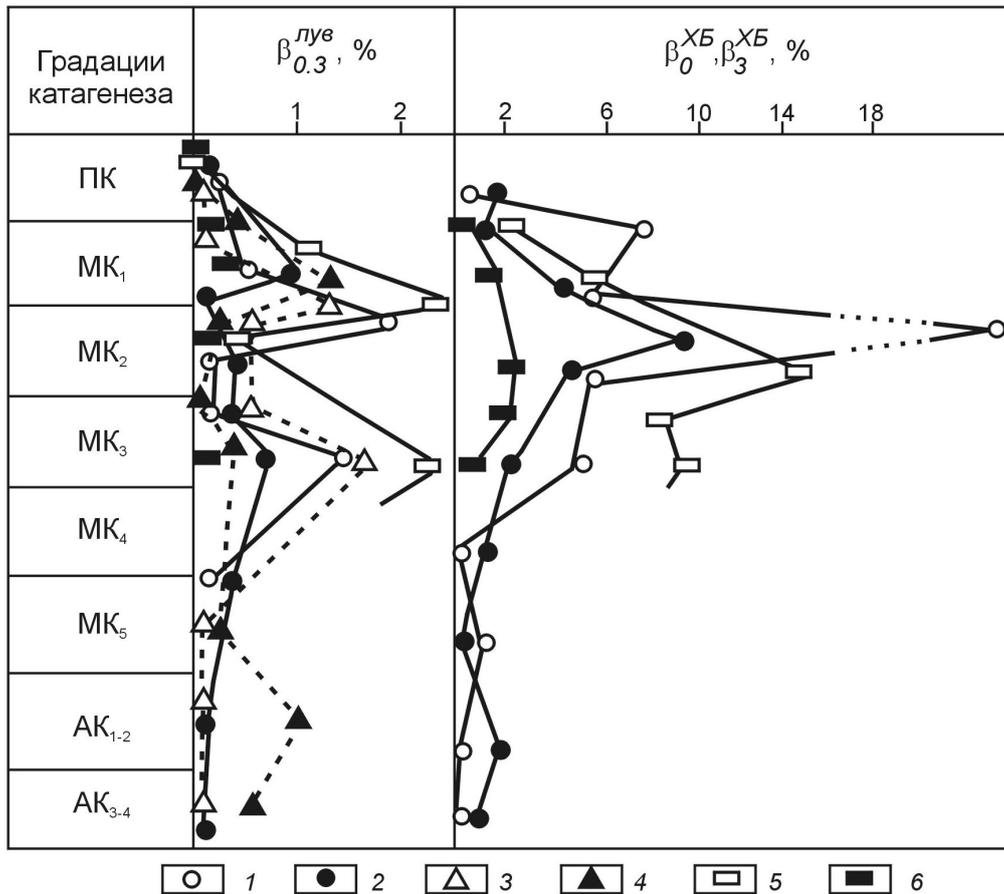


Рис. 4. Изменение битумоидных коэффициентов летучих углеводородов фракции C_{7-14} и хлороформных битумоидов из открытых и закрытых пор пород в процессе катагенеза ОБ

Условные обозначения:

Типы битумоидных коэффициентов: 1, 3, 5 – в открытых порах; 2, 4, 6 – в закрытых порах; 1, 2 – для битуминозных терригенных пород древних платформ; 3, 4 – для малобитуминозных карбонатных пород древних платформ; 5, 6 – для баженовской свиты J_3 Западной Сибири.

Раздельное извлечение ЛУВ из открытых и закрытых пор, с применением CO_2 , имеет ряд существенных преимуществ: во-первых, анализ $ГЭ^{\Phi}$ (конденсирующихся в фильтрах) позволяет выявить состав ЛУВ при низкой их концентрации в породе, так как в этой фракции происходит избирательное накопление ЛУВ; во-вторых, появляется возможность анализа ЛУВ из закрытых пор, в меньшей степени затронутых ПМП, что позволяет оценить исходный состав и масштаб эмиграции ЛУВ. Состав нефтей лучше сравнивать с соответствующими фракциями битумоидов в $П_3$.

Возможные механизмы первичной миграции микронефти на различных этапах катагенеза ОБ

Суммируя результаты моделирования и диагностики ПМП, а также литературные материалы, можно предположить вероятные механизмы миграции микронефти. **На этапе**

ПК основные механизмы перемещения микроневфти: заполнение легким битумоидом вакуума в полостях синерезиса и трещин, диффузия, возможно, в сочетании с «изотермической перегонкой», растворение в воде с образованием коллоидно-эмульсионных растворов (фиксируемый нами дефицит МНУВ в большинстве пород на ПК не согласуется с закономерностями истинного растворения). Вероятно, преобладающий механизм – растворение в воде, насыщенной углекислотой, которая активно генерируется на этом этапе. **К концу ПК** и далее проявляется действие ретроградного растворения и возможна эмиграция в газовом растворе, сначала низкокипящих, а затем более высокомолекулярных компонентов, естественно при наличии свободной газовой фазы (обогащенные разности, преобладание гумусовой составляющей в ОВ, поступление газов из нижележащих горизонтов). Активно способствуют эмиграции такие процессы и явления, как гидрослюдизация и каолинизация глин, растворение и перекристаллизация карбонатов. Отдача из малобитуминозных пород достаточно высока (возможно из-за меньшей заблокированности УВ) и осуществляется при содержании битумоидов в P_0 менее 10%, из чего можно заключить, что активная форма миграции – не единственный механизм на этом этапе. На грациях $МК_1$ - $МК_2^1$ возможна миграция в виде «микropоровых растворов» (по модели Блоха-Симоненко), а также в результате действия капиллярных сил и по механизму «фитиля».

На грации $МК_2^2$, в связи с преобразованием блокирующих асфальтеново-смолистых компонентов и других дифильных соединений, игравших роль ПАВ и эмульгаторов, возможность миграции в виде коллоидов резко уменьшается. Температурный предел существования ПАВ можно считать интервалом существования коллоидных растворов в пласте. На грациях $МК_3$ -АК с увеличением температуры снижается активность поверхностных явлений и действие капиллярных сил, соответственно уменьшается возможность миграции с образованием «микropоровых растворов», но параллельно снижаются сорбция и вязкость, увеличиваются акватермальный эффект и фазовая проницаемость водных и углеводородных растворов, насыщенных газами, чему способствует рост количества газов (ГФГ) и облегчение состава битумоидов. Увеличивается растворимость УВ в воде и газе, облегчается активная форма миграции, однако, основная масса генерированной микроневфти эмигрирует к началу этого этапа.

Литература

Баженова Т.К. Баланс трансформации ОВ в катагенезе и нефтеобразование // Новые идеи, теоретические обобщения, методические решения в нефтяной геологии. СПб.: Недра, 2004. С. 48-58.

Белецкая С.Н. Первичная миграция нефти. М.: Недра, 1990. 288 с.

Белецкая С.Н. Механизмы и факторы первичной миграции нефти. Моделирование первичномиграционных процессов // Нефтегазовая геология. Теория и практика: электр. науч. журн. / ВНИГРИ - [Электронный ресурс]. – СПб.: ВНИГРИ, 2007 (2). <http://www.ngtp.ru/rub/1/028.pdf>

Белецкая С.Н., Сергеенок Л.И. Изучение распределения легких УВ в поровой системе пород для диагностики миграционных процессов // Накопление и преобразование седиментитов. М.: Наука, 1979. С. 153-168.

Белецкая С.Н., Сырова Г.М. Изучение распределения битумоидов в поровой системе пород в связи с вопросами оценки состояния миграционных процессов // Геология нефти и газа, 1972. № 3. С. 44-52.

Белецкая С.Н., Сахибгареев Р.С., Сергеенок Л.И. и др. Особенности развития первичномиграционных процессов в отложениях баженовской свиты Западной Сибири // Современные геохимические методы диагностики нефтематеринских отложений. М.: Наука, 1986. С. 121-130.

Беликова А.Р., Филатов С.С. Диагностика основных фаз нефтегазообразования по данным люминесцентной микроскопии // РОВ на разных этапах литогенеза осадков и процессы нефтегазообразования. Л.: Труды ВНИГРИ, 1978. С. 130-141.

Богомолов Г.В. Состав подземных вод и водных вытяжек пород Русской платформы // Поровые растворы и методы их изучения. Минск: Наука и техника, 1968. С. 40-44.

Ботнева Т.А. Изменение изотопного состава углерода нефти при миграции. Л.: Труды ВНИГРИ, вып. 178, 1975. С. 271-275.

Вассоевич Н.Б., Абрамсон Б.Я. Критерии для опознания аллохтонных битумоидов в осадочных горных породах // Научно-аналитические и тематические обзоры. Геологические исследования на нефть и газ. М.: изд. ЦНИИТ, 1964. С. 22-31.

Глебовская Е.А. Опыты по термодеструкции ОВ в плане изучения процессов катагенетических превращений РОВ в природе // Исследование катагенетических превращений ОВ. Л.: Труды ВНИГРИ, вып. 353, 1974. С. 8-25.

Жузе Т.П., Сафронова Т.П. Экспериментальное исследование закономерностей переноса УВ через осадочные породы сжатыми газами // Генезис нефти и газа. М.: Недра, 1967. С. 404-412.

Капелюшников М.А. К вопросу о миграции и аккумуляции рассеянной нефти в осадочных породах // ДАН СССР, 1954. Т. 99, № 6. С. 1077-1078.

Котяхов Ф.И. Основы физики нефтяного пласта. М.: Гостоптехиздат, 1956. 360 с.

Милешина А.Г., Калинин М.К., Сафонова Г.И. Изменение нефтей при фильтрации через породы. М.: Недра, 1983. 175 с.

Максимов С.П., Чахмахчев В.А., Большаков Ю.Я. Геохимические аспекты принципа дифференциального улавливания нефти и газа и газоконденсатных месторождений // Геология нефти и газа, 1976. № 3. С. 37-47.

Неручев С.Г. Об изменении состава автохтонных битумоидов ОВ глинистых пород под воздействием факторов метаморфизма и нефтеотдачи // ДАН СССР, 1964. Т. 157, № 4. С. 901-903.

Рогозина Е.А. Изменение пористости аргиллитов в зоне катагенеза // Геология нефти и газа, 1968. № 11. С. 33-35.

Сахибгареев Р.С. К вопросу литификации битуминозных карбонатных отложений // ДАН СССР, 1976. Т. 227, № 2. С. 451-454.

Успенский В.А. Вопросы расчленения сингенетичных и эпигенетичных категорий битумоидов в смешанных разностях // Генетическая классификация нефтей, газов и РОВ пород. Л.: Труды ВНИГРИ, 1981. С. 37-54.

Успенский В.А., Радченко О.А. К вопросу о схеме генетической классификации вещества, именуемой битумом // Изв. АН СССР, сер. геол., 1952. № 6. С. 121-127.

Чахмахчев В.А. Геохимические процессы миграции углеводородных систем. М.: Недра, 1983. 230 с.

Whittaker A.N., Dayson P. Clay rocks in oil-forming // Oil and gas J. 1980. V. 78, № 37, part 1. P. 260-270; № 38, part 2; № 39, part 3.

Рецензент: Рогозина Елена Александровна, доктор геолого-минералогических наук.