

УДК 553.981(268.45)

КАТАГЕНЕТИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА БАРЕНЦЕВОМОРСКОГО ШЕЛЬФА В СВЯЗИ С НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬЮ

И.С. Грамберг, Н.К. Евдокимова, О.И. Супруненко

ВНИИОкеангеология, 190121, Санкт-Петербург, Английский просп., 1, Россия

Представлены результаты исследований катагенетических преобразований органического вещества по данным измерения отражательной способности витринита (R^0) и моделирования этого показателя в объеме осадочного чехла. Впервые для региона на выверенной функциональной зависимости связи величины отражательной способности витринита (R^0) и глубины погружения пород (H , км) построены модельные кривые эволюции катагенеза органического вещества в поисковых и параметрических скважинах, позволяющие оценивать величину R^0 до глубины 10-12 км. По трем обогащенным органикой толщам - каменноугольно-пермской терригенно-карбонатной, верхнетриасовой и верхнеюрской терригенным - составлены карты катагенеза органического вещества. Выполненными исследованиями установлено, что уровень преобразования ОВ изменяется от протокатагенеза (ПКз) в меловых и верхнеюрских отложениях до апокатагенеза (АК) в пермских. В пределах впадин характерна конформность структурных и катагенетических уровней, а на поднятиях, особенно западного борта Баренцевоморского мегапрогиба, в меньшей степени Адмиралтейского мегавала, отмечаются несовпадения структурных и катагенетических поверхностей по терригенно-карбонатному комплексу и отложениям нижнего-среднего триаса.

Структура катагенетической модели свидетельствует о том, что масштабная генерация углеводородов была свойственна осадочным комплексам глубоко погруженного Баренцевоморского мегапрогиба в диапазоне от раннего палеозоя до позднего мезозоя. В то же время крупнейшая нефтегазосборная площадь на протяжении последних 250 млн лет располагалась в зоне поднятий западного борта Баренцевоморского мегапрогиба. Масштаб продуктивности этой зоны вполне сопоставим со структурами Штокмановско-Лунинской мегаседловины, промышленная продуктивность которой доказана поисково-разведочным бурением.

Катагенетическая зональность, моделирование, прогнозная оценка, витринит, отражательная способность, Баренцевоморский мегапрогиб, нефтегазоносность.

CATAGENETIC ZONING AND PETROLEUM POTENTIAL OF THE SEDIMENTARY COVER OF THE BARENTS SEA SHELF

I. S. Gramberg, N. K. Evdokimova, and O. I. Suprunenko

The maturity of organic matter (OM) has been investigated according to vitrinite reflectance (R^0). This index has been modeled within the sedimentary cover. The depth dependence of R^0 has been studied for the first time in the region. Model curves of OM maturation have been constructed for prospecting and test boreholes. This allows prediction of R^0 at depths of to 10-12 km. Maps of OM maturity have been compiled for three OM-rich sequences: Carboniferous-Permian terrigenous-carbonate, Upper Triassic and Upper Jurassic terrigenous. The degree of OM conversion varies from protocatagenesis (PC) in the Cretaceous and Upper Jurassic deposits to apocatagenesis (AC) in the Permian ones. Structural and catagenetic levels are conformable in depressions, whereas mismatches of structural and catagenetic surfaces are observed in the terrigenous-carbonate complex and Lower-Middle Triassic deposits on uplifts, particularly, on the western flank of the Barents Sea megatrough and, to a lesser extent, on the Admiralteiskii megaarch.

The catagenetic model suggests a large-scale hydrocarbon generation in the sedimentary deposits of the deep-seated Barents Sea megatrough from Early Paleozoic to Late Mesozoic. During the last 250 Ma, the greatest petroleum catchment area has occurred in the zone of uplifts on the western flank of the Barents Sea megatrough. The potential of this area is comparable with that of the structures of the Shtokman-Lunin megasaddle, proven by exploration drilling.

Catagenetic zoning, modeling, prediction, vitrinite, reflectance, Barents Sea megatrough, petroleum potential

ВВЕДЕНИЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В прогнозно-оценочных и поисковых исследованиях на углеводороды (УВ) большое значение имеет оценка уровня катагенетической преобразованности захороненного в осадочных породах органического вещества (ОВ). Это связано с тем, что катагенез является главным показателем, отражающим способность или неспособность ОВ к генерации УВ. Кроме того, по современным представлениям [Амосов и др., 1987; Моделирование процессов..., 1984; Неручев и Рогозина, 1992; Парнарова и др., 1981; Tissot & Welte, 1984], уровень катагенетической преобразованности в сочетании с генетическим типом ОВ определяют фазовое разнообразие

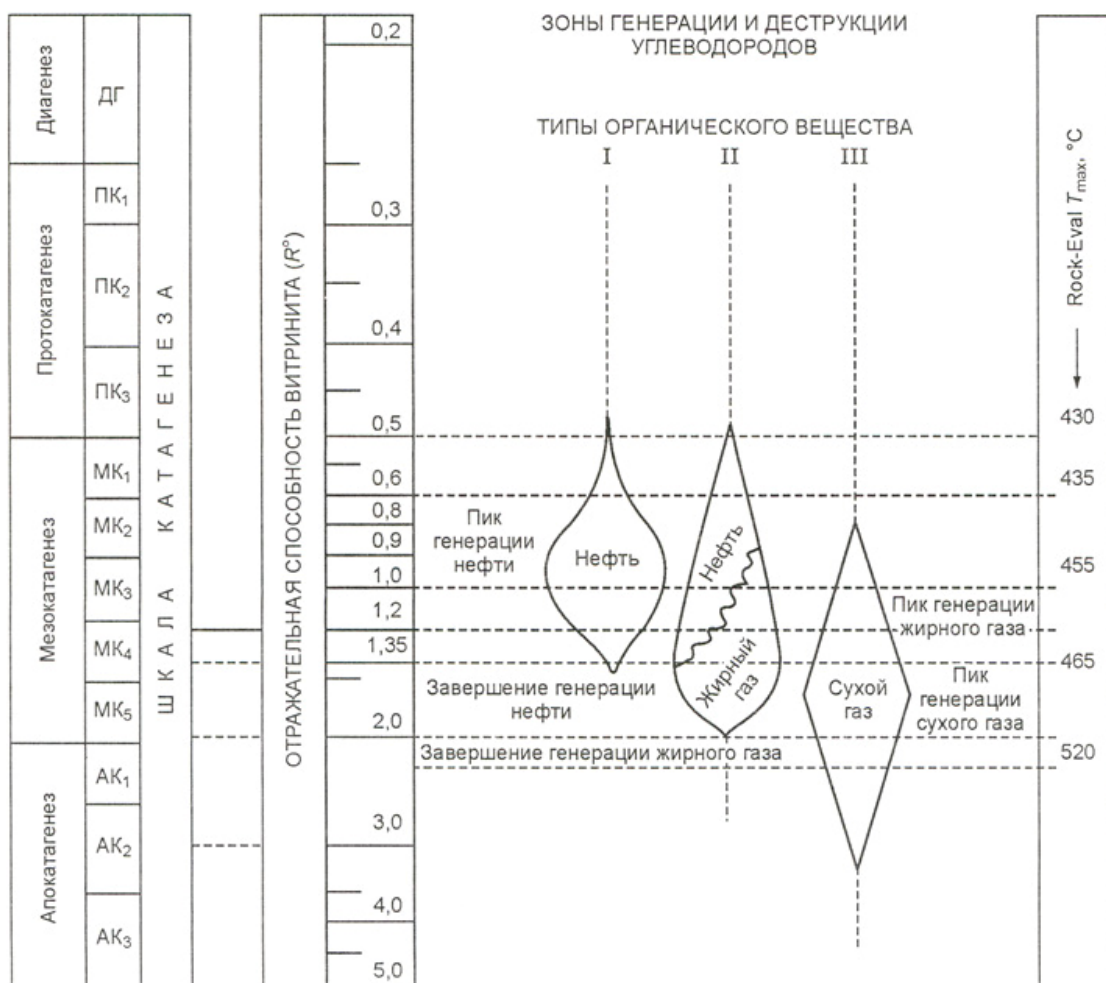


Рис. 1. Сопоставление генерации УВ с показателями зрелости и генетического типа органического вещества.

генерирующихся УВ. На рис. 1, составленном авторами по литературным данным, показана общая схема зависимости генерации УВ разного фазового состава от уровня преобразования и типа исходного ОВ. В прогнозе зон генерации УВ и фазового состава генерирующихся УВ состоит прикладной аспект и значение исследований процесса катагенеза.

Закономерности изменения степени катагенеза осадочных образований по площади и разрезу осадочного бассейна являются надежной базой также и для решения геологических задач регионального плана, основанных на известных взаимосвязях между геотермическими условиями, глубинами максимального погружения отложений и катагенезом ОВ. В первую очередь к таким задачам относятся палеотектонические и палеотемпературные реконструкции, выявление скрытых несогласий, восстановление эродированной мощности отложений, определение в разрезе участков с локальными теплоносителями (обычно скрытыми), установление продуктов размыва и другие.

Опираясь на тесную взаимосвязь между отражательной способностью витринита (R^0 -численного выражения степени катагенеза) и глубинами максимального погружения на доинверсионном этапе, от профилей и карт катагенеза можно перейти к построению карт и профилей палеопогружений и палеотемператур. Так, в ряде работ [Амосов и др., 1987; Жемчужников, 1952; Погребицкий, 1933; Скок, 1963; Степанов, 1983] стадийность метаморфизма углей используется в качестве одного из основных критериев в анализе истории геологического развития Южно-Уэльского, Кузнецкого, Печорского бассейнов. В работах У.Б. Харланда по архипелагу Шпицберген [Harland, 1975] и Н. Тейса с соавторами [Theis et al., 1993] по западному сектору шельфа Баренцева моря на основании аномально высоких для мезозоя и кайнозоя значений R^0 витринитов из рассеянного органического вещества и углей оценены масштаб эрозии осадочного чехла и рассчитана модель третичного аплифта, достигающего по оценкам величин R^0 на некоторых краевых и внутренних поднятиях 2,5-3,0 км. В последние годы в исследованиях, посвященных проблемам нефтегазообразования, большое внимание уделяется роли магматизма, особенно траппового [Гордеева и др., 1999; Иванов и Мясникова, 2000; Конторович и др., 1995],

который в совокупности с геотермией погружающегося бассейна принципиально усложняет температурные условия генерации УВ и при этом сопровождается многократным увеличением скорости генерации с преобладанием в составе УВ газовой фазы. Данные по катагенезу являются хорошим инструментом прогноза магматической деятельности в тех районах, где прямые свидетельства его (интрузии, дайки, апофизы, гидротермы и т.д.) не установлены другими методами. Определяющими чертами интервалов разрезов, к которым могут быть приурочены магматические комплексы, является специфическая особенность катагенетической зональности. В них наблюдаются инверсии стадий катагенеза, когда зрелость ОВ с глубиной начинает снижаться, катагенетические несогласия, конденсированная мощность зон катагенеза и рельефно выраженная изогнутость кривой R^0 [Верба и Евдокимова, 1999; Сунруненко и др., 1998; Gentzis & Goodarzi, 1993; Theis et al., 1993].

Таким образом, исследования по катагенезу расширяют представления о геологической эволюции бассейнов и создают более надежную базу для палеотектонических построений и интерпретаций.

Мерой степени преобразования ОВ принята отражательная способность концентрированного или детритного витринита (R^0). Интенсивность отражения пропорциональна интенсивности катагенетического процесса, идущего в ОВ по угольному циклу [Амосов и др., 1987]. Являясь необратимой величиной, R^0 увеличивается только при возрастании температуры как функции погружения или возросшего теплового потока, а при их снижении сохраняет максимально достигнутый уровень. При любых последующих инверсиях величина R^0 остается неизменной, что было впервые показано работами И.И. Аммосова и др. [1987]. Образно выражаясь, можно сказать, что в величине R^0 заключена «память» об интегральном прогреве недр как суммарном индексе тепла. Способ разделения интегрального эффекта прогрева осадочной толщи на составляющие кондуктивной и конвективной природы был разработан ранее [Верба и Евдокимова, 1999; Theis et al., 1993] и кратко будет изложен ниже.

На шельфе Баренцева моря и сопредельных территориях в качестве крупнейших тектонических структур выделяются: Свальбардская плита, Баренцевоморский мегапрогиб, Печорская плита, Балтийский щит, Новоземельская и Пайхойская складчатые области.

В пределах российского сектора моря определяющей структурой является Баренцевоморский мегапрогиб, окаймляющий с запада Новоземельскую складчатую систему и простирающийся на расстояние более 1600 км при ширине до 600 км. В его границах находятся две наиболее крупные впадины - Южно- и Северо-Баренцевская с мощностью осадочного чехла до 18-20 км, разделяющая их Штокмановско-Лунинская мегаседловина (порог), а также Альбановско-Горбовская мегаседловина и прогиб Святой Анны [Борисов и др., 1995]. В крайней северной части шельфа расположено поднятие Земли Франца-Иосифа. Осадочный чехол Баренцевоморского мегапрогиба разделяется на ряд структурных ярусов: доверхнедевонский, верхнедевонско-нижнепермский, пермско-триасовый и юрско-меловой. Отложения нижних структурных ярусов на большей части мегапрогиба погружены на глубины более 7 км и имеют суммарную мощность менее 5 км. Пермско-триасовый структурный ярус характеризуется резким нарастанием мощности отложений от 6 км на бортах мегапрогиба до 12 км к его оси. Формирование мегапрогиба сопровождалось проявлениями мезозойского магматизма.

В крайней восточной части Свальбардской плиты, в зоне ее сочленения с Баренцевоморским мегапрогибом, развита система крупных поднятий (и разделяющих их седловин), называемая в дальнейшем зоной Центрально-Баренцевских поднятий, западнее которой расположен глубокий Нордкапский прогиб. Как крайний западный элемент Новоземельской складчатой системы в пределах Предновоземельской структурной зоны выделяется крупная положительная структура - Адмиралтейский мегавал.

Имеются многочисленные свидетельства присутствия в осадочном чехле Баренцевоморского шельфа магматических образований [Verba & Evdokimova, 1995; Сунруненко и др., 1998; Комарницкий и др., 1993; Безруков, 1997], преимущественно субпластовых интрузий, которые, как известно, характерны для таких нефтегазоносных бассейнов, как Сибирская платформа [Гордеева и др., 1999; Иванов и Мясникова, 2000; Конторович и др., 1995] и Свердруп в Арктической Канаде [Gentzis & Goodarzi, 1993]. Авторами этих работ было установлено, что внедрение магматических тел в разные горизонты осадочного чехла в ряде случаев оказало ощутимое влияние на катагенез и, следовательно, генерацию УВ в локальных зонах, а сгущение интрузивных образований и траппов на отдельных площадях привело в целом и к повышению регионального геотермического градиента (до $7^\circ/\text{м}$). Анализ особенностей распределения величин R^0 витринитов из ОВ [Верба и

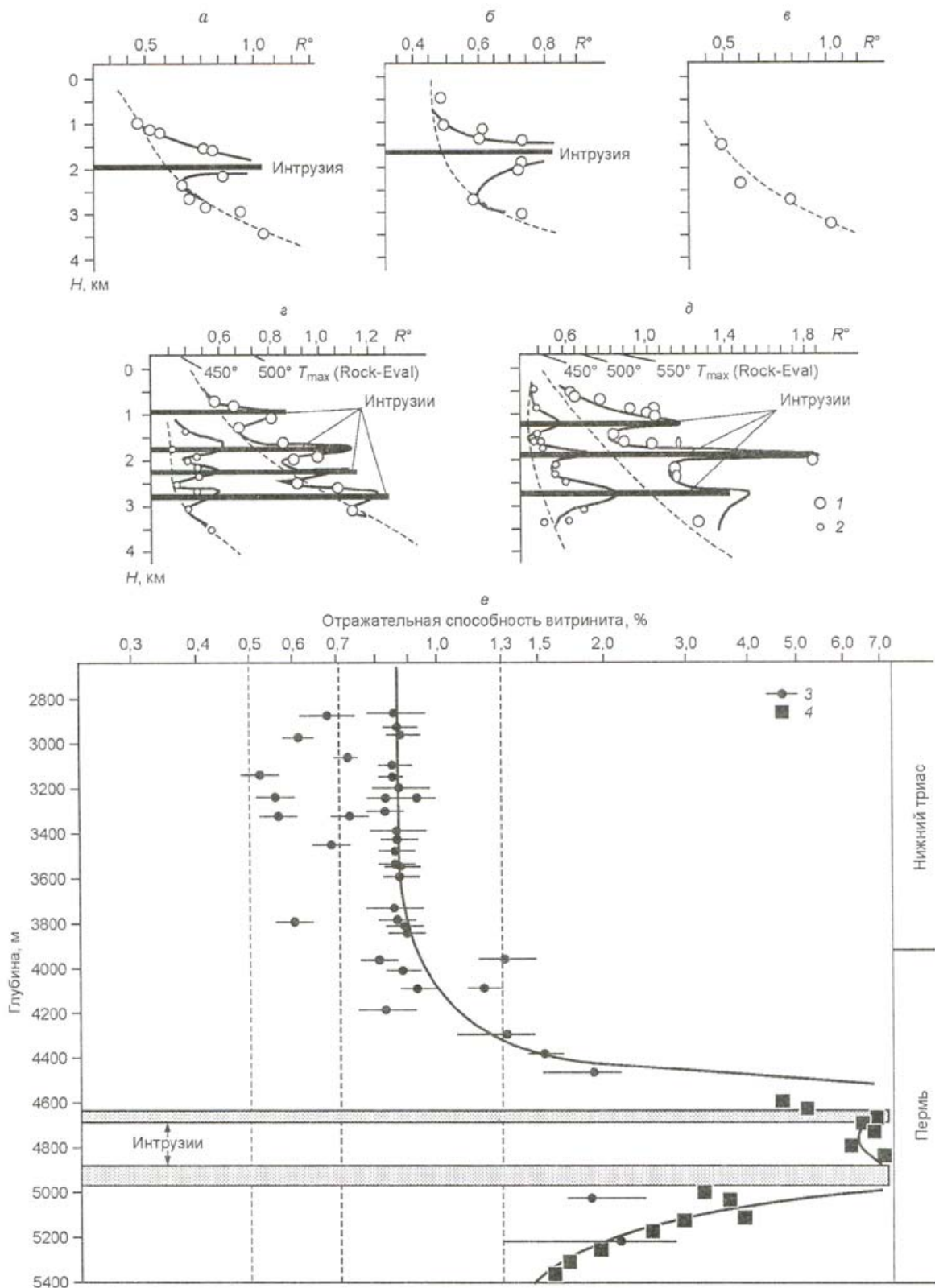


Рис. 2. Кривые катагенеза мезозойских отложений по скважинам, отражающие влияние интрузий в осадочном чехле Баренцевоморского мегапрогиба и бассейне Свердруп (Арктическая Канада). *a* — скв. Северо-Кильдинская, *b* — скв. Северо-Мурманская, *в* — скв. Куренцовская (без интрузий), *г* — скв. о. Хейса (ЗФИ), *д* — скв. о. Грезм-Белл (ЗФИ), *е* — скв. Дрейк Поинт-68, о. Мелвилл, бассейн Свердруп (по Gentzis and Goodarzi, 1993). 1 — отражательная способность витринита (R°); 2 — T_{max} , °C по Rock-Eval; 3 — витринит; 4 — битум с высокой отражательной способностью.

Евдокимова, 1999; Супруненко и др., 1998; Theis et al., 1993] и отражательной способности твердых битумов [Gentzis & Goodarzi, 1993] в разрезах поисковых скважин на шельфе Баренцева моря и бассейне Свердруп в участках проявления интрузий показал сходную картину (рис. 2, а, б, г-е). В обоих случаях отмечаются: рельефно выраженная изогнутость кривой R^0 , что отражает непосредственное пересечение разреза интрузией (интрузиями), увеличение катагенеза на 2-4 стадии по сравнению с базовым, сжатая по вертикали мощность катагенетических зон, катагенетические несогласия.

Интенсивность преобразований в ОВ под влиянием магматизма зависит от ряда факторов: исходного уровня преобразования ОВ до первой фазы магматизма, состава интрузий, их мощности и т.д. В слабо преобразованных породах с незрелым ОВ локальные тепломассоносители в области развития теплового ореола создают благоприятные условия для локальной генерации УВ и формирования нефтяных оторочек, минизалежей и нефтяных окон. Видимо, такой генезис имеют нефтепроявления на о. Вильчека антиклинали Ганза. Здесь характерной особенностью является резкая разница между обычно низкой стадией катагенеза вмещающих верхнеюрских пород ($R^0 = 0,25-0,47$) и аномально высокой до 1,0 зрелостью ОВ вблизи интрузии, на экзоконтакте которой проявлена капельно-жидкая нефть. Наши исследования показали, что мощность приинтрузивного ореола, в котором возможна дополнительная генерация УВ, составляет в среднем до 6-7 мощностей интрузии, из них 1,5-2 мощностей интрузии составляет зона ее нижнего влияния, а 4-5 мощностей - зона верхнего влияния.

В данной работе представлены первые результаты картирования катагенеза ОВ осадочного чехла в восточном секторе шельфа Баренцева моря по величине R^0 . Такие карты составлены по трем наиболее богатым ОВ и структурно привязанным интервалам разреза - верхней юре (отражающий горизонт В), верхнему триасу (отражающий горизонт Б) и верхам терригенно-карбонатного комплекса - C_1-P_1 (отражающий горизонт Ia). Уровень достоверности этих карт несколько различен. Если первые две (верхняя юра и триас) базируются преимущественно на прямых определениях R^0 по керну поисковых скважин, то катагенез палеозойского комплекса почти полностью (за исключением Адмиралтейского мегавала) опирается на данные модельных оценок. В основе модельных построений заложены выявленные закономерности увеличения катагенеза с глубиной погружения осадочных толщ и градиента прироста R^0 , определенные отдельно в каждой структурной зоне на базе обучающих выборок параметрических скважин. Градиент прироста R^0 вычислялся по формуле:

$$g = H/\lg (R_1^0 - R_2^0), \quad (1)$$

где H - разница в расстоянии между точками замеров R_1^0 и R_2^0 .

В обучающую выборку включались базовые признаки модели - геотермические данные, известные значения отражательной способности витринитов по изученной бурением части разреза, глубина залегания слоя и его стратиграфический возраст. Составленная по таким материалам карта зональности катагенеза терригенно-карбонатного комплекса верхнего палеозоя может рассматриваться на данном уровне исследований в качестве модели, дающей самое общее представление о катагенетической структуре бассейна. Здесь и далее под моделью мы понимаем совокупность данных, которые с удовлетворительной точностью описывают поведение изучаемых параметров и позволяют их прогнозировать. Статистические исследования модельных и измеренных значений R^0 по мезозойской части разреза свидетельствуют об их достаточно высокой достоверности (табл. 1).

Эмпирически было установлено, что величина R^0 витринитов триасово-нижнемеловой части разреза осадочного чехла в Баренцевоморском мегапрогибе связана линейной зависимостью с глубиной погружения и геотермической интенсивностью - $R^0 = f(H)$ (рис. 3). Угол наклона кривой R^0 определяется глубиной палеопогружения и связанной с ней интенсивностью кондуктивного тепломассопереноса. Проявления конвективных тепломассоносителей существенно усложняют форму этой кривой (см. рис. 2). Строго прямолинейная зависимость R^0 и H (км) для природных систем в принципе не характерна, и такой графический вид эта зависимость может приобретать за счет сглаживающего эффекта после осреднения и аппроксимации фактических данных. Поэтому прогнозирование уровня катагенеза глубоких горизонтов после осреднения и аппроксимации можно применять для самых общих региональных построений и прогнозов. Несколько усложненная форма катагенетической кривой и слабоградиентные изменения ее, совпадающие с границами стадий катагенеза, интерпретируются как результат экзотермических процессов в ОВ,

которые сопровождаются качественными (и, возможно, количественными) превращениями в ОВ при катагенезе [Неручев и Рогозина, 1992; Tissot & Welte, 1984]. Контрастные и резкие рельефные перегибы на катагенетической кривой являются прямым следствием влияния (прямого или косвенного) на толщину и содержащееся в ней ОВ интрузий и сопровождающих их гидротерм. Однако даже резкоградиентные изменения R^0 в сочетании с крутыми углами наклона кривой R^0 к глубинной шкале не видоизменяют в целом эволюционную схему катагенеза ОВ в осадочном разрезе, растущего с глубиной, а лишь «регулируют его геотермическую приуроченность» [Неручев и Рогозина, 1992]. Аппроксимирующая кривая по существу, сохраняет известную связь между R^0 и H . При определении региональной кривой катагенеза, как это показано на рис. 3, «аномальные» значения локальной природы из массива данных не изымались, что позволяет полагать, что в результирующей кривой катагенеза ассимилирован максимальный тепловой эффект, независимый от природы теплоносителя.

Таблица 1. Прогнозные значения отражательной способности витринита

Глубина, км	Прогнозные значения R^0 в локальных структурах и скважинах								
	Арктическая	Штокмановская	Мурманская	С-Мурманская	Ледовая	С-Кильдинская	Ферсмановская	Лудловская	Крестовая
1,0	$\frac{0,25}{0,30}$	$\frac{0,32}{0,35}$	0,32	$\frac{0,37}{0,40}$	$\frac{0,38}{0,40}$	$\frac{0,40}{0,53}$	$\frac{0,43}{0,50}$	$\frac{0,35}{0,40}$	$\frac{0,50}{0,58}$
2,0	0,45	$\frac{0,52}{0,52}$	$\frac{0,52}{0,62}$	0,55	$\frac{0,58}{0,62}$	$\frac{0,65}{0,78}$	$\frac{0,58}{0,70}$	$\frac{0,53}{0,58}$	$\frac{0,68}{0,75}$
3,0	$\frac{0,60}{0,64}$	$\frac{0,70}{0,72}$	$\frac{0,70}{0,70}$	0,70	0,78	0,83	0,74	$\frac{0,72}{0,75}$	0,83
4,0	$\frac{0,80}{0,80}$	0,82	0,92	0,85	0,97	1,18	0,88	0,88	0,98
5,0	0,92	1,03	1,10	1,03	1,15	1,45	1,03	1,05	1,15
6,0	1,15	1,21	1,30	1,18	1,35	1,73	1,18	1,23	1,32
7,0	1,32	1,40	1,50	1,35	1,53	1,95	1,32	1,42	1,43
8,0	1,50	1,57	1,70	1,50	1,73	2,24	1,45	1,58	1,64
9,0	1,62	1,74	1,93	1,65	1,92	—	1,62	1,75	1,80
10,0	1,80	1,92	—	1,82	2,10	—	1,77	1,93	—
11,0	2,03	2,10	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. В числителе — прогнозные R^0 , в знаменателе — фактические R^0 .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате выполненных нами исследований по оценке уровня катагенетических преобразований, включая и статистические, на выверенной функциональной зависимости связи R^0 и H построены модельные кривые эволюции катагенеза ОВ осадочного чехла по каждой разбуренной структуре на глубину 12-14 км. Наличие таких кривых на стадии региональных поисков обеспечило оценку уровня катагенеза ОВ в любой части разреза осадочного чехла путем проекции глубины залегания оцениваемого комплекса на шкалу R^0 . Примеры прогнозной оценки R^0 приведены в табл. 2. Межскважинные пространства заполнялись в соответствии с градиентом прироста и намечающейся тенденцией по вышеуказанной формуле (1). Картирование катагенетических зон ОВ выполнено на структурных схемах в границах стадий катагенеза, поэтому картируемой единицей принята не величина, а стадия катагенеза углефикационного ряда в единицах R^0 : ПКз - $<0,55R^0$, МК₁ - $0,55-0,64R^0$, МК₂ - $0,65-0,89R^0$, МК₃ - $0,90-1,14R^0$, МК₄ - $1,15-1,39R^0$, МК₅ - $1,40-1,99R^0$, АК $>2,00R^0$.

Терригенно-карбонатный комплекс - рис. 4 (отражающий горизонт Ia - C₁-P₁). Кровля данного комплекса располагается на глубинах от 1-2 км на Кольско-Канинской моноклинали до 12-14 км в депоцентровых участках Южно-Баренцевской впадины. Только на Адмиралтейском поднятии отложения комплекса частично вскрыты поисковыми скважинами, вся остальная площадь Восточно-Баренцевского шельфа закартирована по результатам моделирования R^0 .

В области развития терригенно-карбонатного комплекса установлены пять последовательно сменяющихся стадий эволюции катагенеза ОВ, снизу вверх это: АК₁, МК₅, МК₄, МК₃, МК₂.

Зона апокатагенеза развита на обширной площади, она занимает всю область современных структур Южно-Баренцевской впадины, Штокмановско-Лунинской мегаседловины и южное замыкание Северо-Баренцевской впадины. Верхняя граница зоны АК₁ по изореспленде 2,0

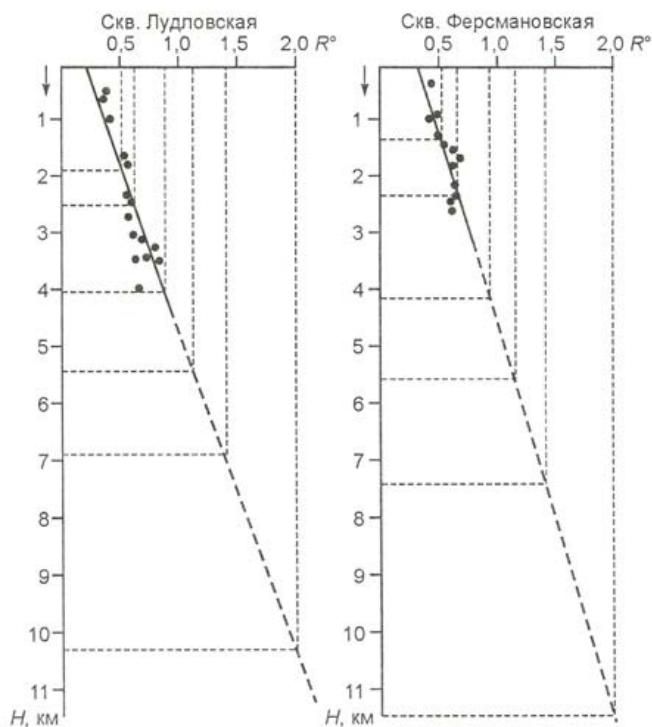


Рис. 3. Примеры построения прогнозных кривых катагенеза в осадочном чехле Баренцевского мегапрогиба.

Южно-Баренцевской впадине (Арктическая, Северо-Мурманская площади) и поднимается выше кровли терригенно-карбонатного комплекса. Мощность зоны МК₅ составляет 2,2-4,0 км. В этой зоне в равной степени вероятны процессы генерации как сухого, так и жирного газа.

Зона стадии МК₄ распространена на Адмиралтейском поднятии, на юге Южно-Баренцевской впадины и слагает до 90 % площади Центрально-Баренцевских поднятий и западного борта Баренцевоморского мегапрогиба, исключая непосредственно их сводовые участки. Верхняя граница МК₄ пересекает горизонты, залегающие на глубинах от 3,8 до почти 6,0 км и сверху ограничена изоресплендой 1,15 R⁰. Прогнозная мощность составляет 1,0-1,75 км. Основная фаза нефтегенерационных процессов на площади распространения зоны МК₄ завершена, однако в ее верхних горизонтах в ОВ I/II (сапропелевого) типа может еще происходить остаточная генерация нефтяных УВ. В нижних горизонтах зоны МК₄ начинается крекинг нефтяных УВ, следы которого в форме легких УВ соединений C₅-C₈ отмечаются по всей мезозойско-кайнозойской части осадочного чехла. Уровень преобразования ОВ с R⁰ > 1,35 в литературе называют «последним рубежом» (dead line for oil) для нефтегенерации, но это весьма благоприятная стадия для генерации конденсата, жирного и сухого газа в полигенетичных типах ОВ.

Зона стадии МК₃ имеет более ограниченное распространение по сравнению с зоной МК₄, прогнозируется в узкой субширотной полосе на Кольско-Канинской моноклинали шириной не более первых километров и вдоль западного борта мегапрогиба, выполняя депрессионные участки между куполовидными поднятиями. Верхняя граница зоны МК₃ пересекает глубины 3,7-4,4 км и сверху ограничена изоресплендой 0,9 R⁰. Мощность зоны МК₃ изменяется от 1,0 до 1,5 км. В ОВ I и II типов с ней связана основная фаза нефтегенерации, а в полигенетичном ОВ на этой стадии преобладает генерация жирного газа.

Зона стадии МК₂ в терригенно-карбонатном комплексе на юге Кольско-Канинской моноклинали полосой около 20 км вплотную примыкает к зоне распространения стадии МК₃ и к Кольско-Канинской зоне разломов. Распространение зоны МК₂ возможно также на куполах Центрально-Баренцевских поднятий. Ограниченная сверху изоресплендой 0,65 R⁰ мощность зоны МК₂ не превышает 0,8-1,6 км. По всей ее мощности в участках разреза осадочного чехла, обогащенных ОВ I и II типов, вероятна генерация нефтяных УВ, а в преимущественно гумусовом ОВ - превалирует генерация метана.

пересекает глубины от 7,5 км на западе мегапрогиба до 11,5 км в осевой части Южно-Баренцевской впадины. Нижняя часть зоны апокатагенеза, видимо, распространена к основанию осадочного чехла до границы с породами кристаллического фундамента.

Нефтегенерационные процессы в ОВ всех типов на этой стадии давно завершены, однако процессы генерации сухого газа (метана) в ОВ III (гумусового) типа достаточно вероятны и до 54% метана образуется именно на этом, завершающем эволюцию ОВ, этапе [Неручев и Rogozina, 1992].

Зона стадии МК₅ в терригенно-карбонатном комплексе примыкает с востока, юга и запада к зоне апокатагенеза полосой шириной в 25-50 км, а на погруженных участках Адмиралтейского мегавала ее ширина увеличивается до 75-80 км. Второй участок зоны МК₅ прогнозируется на восточном замыкании Нордкапского прогиба. Верхняя граница зоны МК₅ по изореспленде 1,4 R⁰ пересекает глубины от 4,5-5,5 км на Северо-Кильдинской структуре до 6,5-7,5 км в

Таблица 2.

Статистические параметры модели катагенеза

Статистический параметр	Локальные структуры и скважины													
	Арктическая		Штокманская		Мурманская (объедин.)	Северомурманская (объедин.)	Ледовая	Северокильдинская		Фермановская	Лудловская	Лунинская	Крестовая	Северогуляевская
K кор. R^0 и H (км)	0,84 11		0,68 15		0,57 11	0,76 7	0,92 18		0,71 13	0,93 20	0,82 4	0,97 12	0,91 13	0,95 9
Кол-во точек наблюд.	6		8		11	7	6		13	20	4	12	13	9
Критерий Стьюдента	0,0012		0,0051		0,065	0,043	0,0088		0,0063	0,00	0,176	0,00	0,00	0,0001
Уравнение регрессии $R^0 =$	0,18H+0,1		0,21H+0,1		0,15H+0,25	0,2H+0,2	0,25H+0,15		0,15H+0,3	0,18H+0,13	—	0,17H+0,3	—	—
K достоверности R^0 —	0,12		0,51		0,65	4,3	0,0 0,88		0,63	0,0	17,6	0,0	0,0	0,01

Нижний терригенный комплекс сверху ограничен верхнетриасовыми отложениями. Картирование стадий катагенеза выполнено на структурной основе по отражающему горизонту Б в кровле верхнего триаса. Отложения верхнего триаса залегают на глубинах от первых сотен метров до 4,5 км (см. рис. 5,б, 6). С точки зрения оценки уровня преобразованности органическое вещество этого комплекса по сравнению с предыдущим изучено лабораторными исследованиями (R^0 и Rock-Eval) в керне и шлеме скважин: Куренцовской, Арктической, Северо-Мурманских 1, 2, Мурманских 23-28, Штокмановских 1, 2, 6; Северо-Кильдинских, Лудловских 1, 2, Фермановской, Адмиралтейской, Крестовой, Песчаноозерских, Ижика-Таркских, Земли Франца-Иосифа.

Диапазон R^0 витринита в породах комплекса варьирует от менее 0,5 (о. Колгуев) до 0,95-1,14 (депоцентры Южно- и Северо-Баренцевских впадин, поднятие Земли Франца-Иосифа), что соответствует последовательному катагенетическому ряду от ПК₃ до МК₃ соответственно.

Зона стадии ПК₃ с незрелым ОВ и $R^0 < 0,55$ обрамляет на юго-востоке широкой полосой Южно-Баренцевскую впадину и узким клином примыкает к линии эрозионного среза на юго-западном участке Адмиралтейского поднятия (район скв. Крестовая). Нижняя граница зоны ПК₃ пересекает глубины от 0 до 1,3 км. ОВ отложений зоны ПК₃ характеризуется очень слабыми газогенерационными способностями, однако при этом резервуары зоны ПК₃ обладают, как правило, хорошими коллекторскими свойствами и при наличии надежных флюидоупоров могут содержать значительные залежи эпигенетических миграционных УВ.

Зона стадии МК₁ в отложениях нижнего терригенного комплекса развита широкой полосой от 30 до 100 км практически по всему периметру Южно-Баренцевской впадины. Она располагается на относительно небольших глубинах - от 1,3 до 2,7 км. В вертикальных разрезах имеет сжатую мощность, не превышающую 1,0-1,5 км, и не всегда простую форму. Так, детальными исследованиями витринита по разрезам скважин Мурманской и Северо-Мурманской структур, выполненными нами, установлено, что по вертикали зона МК₁ расщепляется клиньями, в которых содержится более преобразованное ОВ, достигшее стадии МК₂ и даже более (см. рис. 6,а). В результате катагенетический разрез приобретает расслоенную структуру. Такой «аномальный» катагенетический разрез, как было сказано выше, может образоваться в результате действия каких-то дополнительных источников тепломассопереноса (удаленных интрузий, гидротерм).

По нефтегазогенерационным свойствам потенциал этой зоны невысок, и лишь в ее основании термобарические условия допускают слабую генерацию нефтяных УВ в нижнесреднетриасовых толщах с ОВ I и II типов, но ее масштабы и продуктивность вряд ли достаточны для образования промышленных нефтяных залежей.

В Северо-Баренцевской впадине в отложениях нижнего терригенного комплекса зона МК₁ отсутствует.

Зона стадии МК₂ в нижнем терригенном комплексе изучена по керну скв. Арктической, Лудловской, Ледовой, Фермановской, Мурманской и Северо-Мурманской структур.

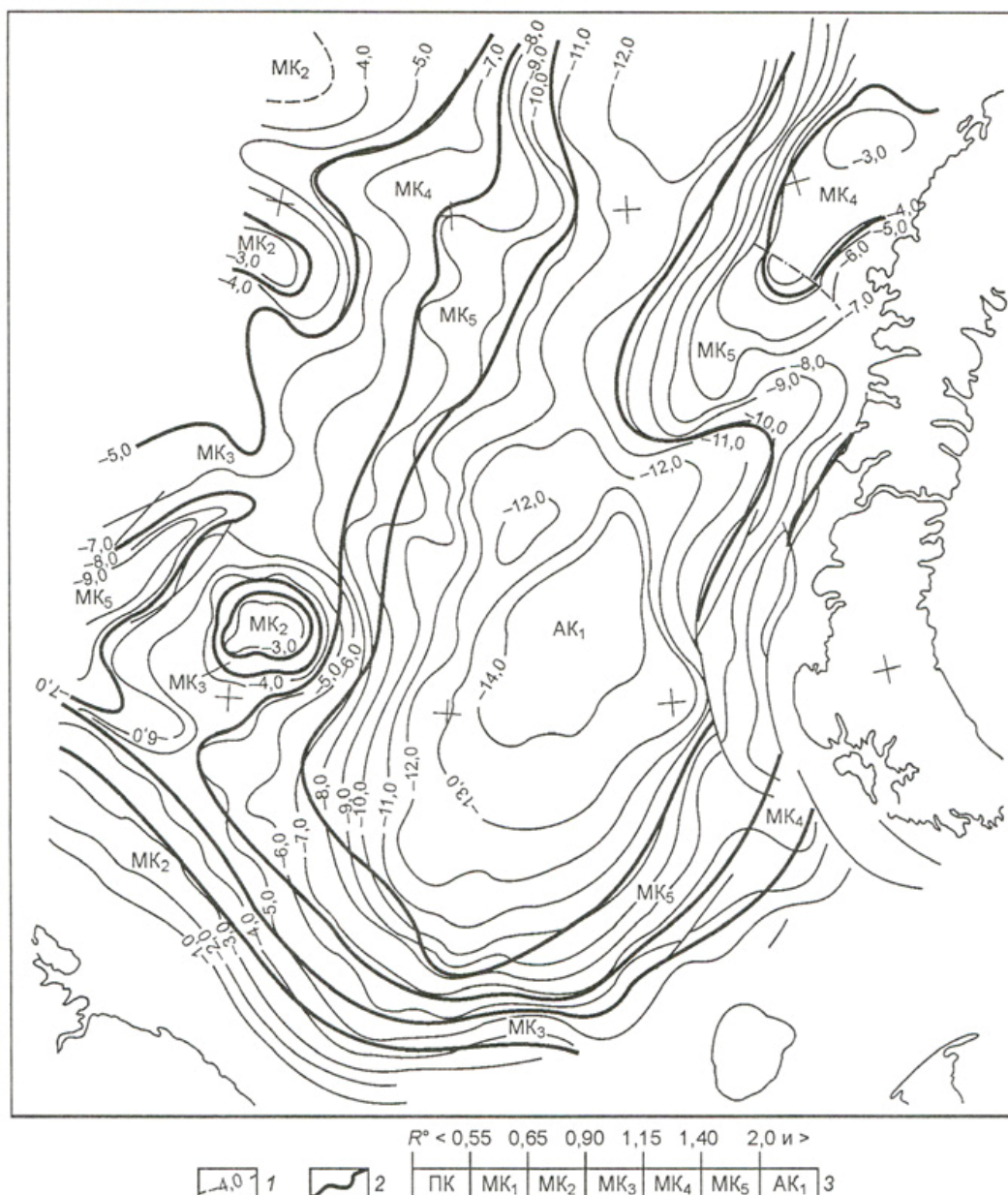


Рис. 4. Зональность катагенеза органического вещества в кровле терригенно-карбонатного комплекса (С₁—Р₁).

1 — изогипсы кровли комплекса Р₁ (км); 2 — границы катагенетических зон; 3 — шкала катагенетических зон.

Занимает основную площадь Баренцевоморского мегапрогиба, за исключением отдельных «пятен» (см. рис. 5,6). На бортовых участках Южно-Баренцевской впадины зона МК₂ располагается на глубине 2,5-2,7 км, к оси впадины погружается до 4,2 км. В Северо-Баренцевской впадине верхняя граница зоны МК₂ относительно Южно-Баренцевской впадины приподнята на 0,7-0,8 км и нигде не опускается ниже 3,5 км. Соответственно так же изменяется и мощность зоны МК₂ - в Южно-Баренцевской впадине она достигает 1,5 км, а в Северо-Баренцевской несколько сужена и не превышает 1 км.

По направлению к поднятию Земля Франца-Иосифа происходит интенсивное увеличение уровня катагенеза, сопровождаемое подъемом зоны МК₂ и почти пятикратным сокращением мощности до 0,35 км. Как следует из материалов бурения, зона МК₂ здесь располагается на глубинах не более 0,85-1,2 км. Многочисленные интрузии основного состава в осадочном разрезе сформировали особый тип катагенетического разреза с характерными для областей развития магматизма катагенетическими ореолами, инверсиями (см. рис. 2,г, 3).

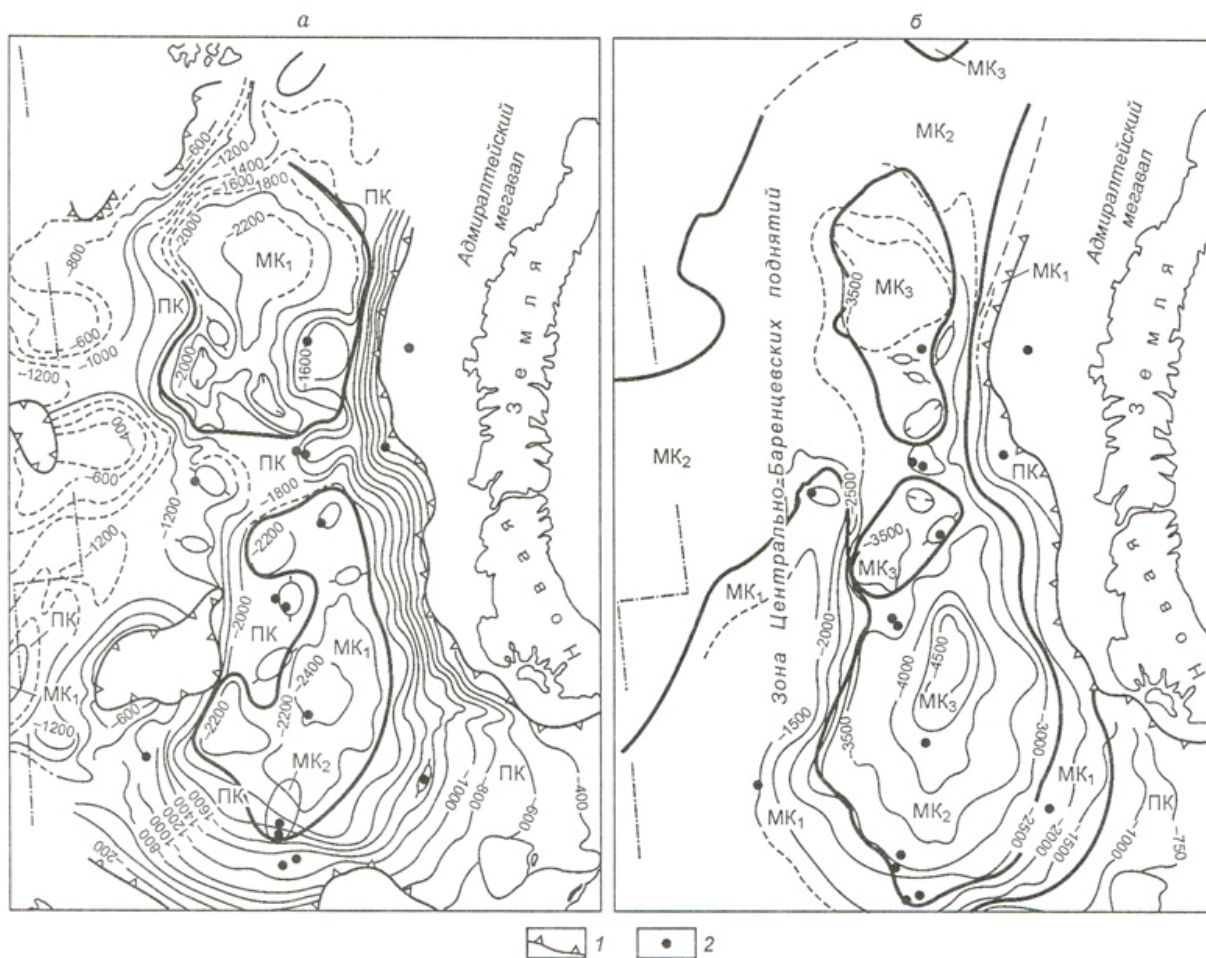


Рис. 5. Зональность катагенеза органического вещества: а — в кровле верхнеюрских черных глин (J_3v-cl); б — в кровле верхнего триаса.

1 — линия эрозионного среза, 2 — поисковые скважины. Ост. усл. обозн. см. на рис. 4.

Зона стадии MK_3 прогнозируется в отдельных территориально разобщенных наиболее погруженных участках Южно- и Северо-Баренцевской впадин и разделяющей их Штокмановско-Лунинской мегаседловины (см. рис. 5,а, б). По эмпирическим и прогнозным оценкам зона MK_3 в Южно-Баренцевской впадине располагается на глубине 4,2-4,4 км, к северу (Северо-Баренцевская впадина и поднятие Земли Франца Иосифа) достигает глубин от 3,5 до 1,2 км соответственно. Сочетание полигенетичного типа ОВ в верхнетриасовых отложениях с термобарическими условиями зоны MK_3 благоприятно для генерации нефтяных и конденсатных залежей вблизи очагов генерации.

Верхний терригенный комплекс с точки зрения катагенеза ОВ наиболее изучен в верхнеюрских черных глинах, являющихся региональной нефтегазоматеринской толщей, в том числе в крупнейшей нефтяной Западно-Сибирской провинции. Однако результаты исследования R^0 витринита и Rock-Eval пиролиза свидетельствуют о слабом уровне преобразованности ОВ, недостаточном для активного нефтегазообразования. Значения R^0 варьируют от 0,49 до 0,62, что соответствует стадиям PK_3 - MK_1 (см. рис. 5,б, 6). Самые низкие значения R^0 витринита из верхнеюрских отложений относятся к северо-западу Печорской плиты и бортовым зонам Южно- и Северо-Баренцевской впадин и соответствуют глубинам от первых метров до 2 км (см. рис. 5,б, 6). В интервалах глубин 2,2-2,4 км в Южно-Баренцевской и 1,8-2,0 км в Северо-Баренцевской впадинах проходит граница стадий PK_3 и MK_1 и ОВ здесь находится только в самых начальных верхних интервалах зоны MK_1 . В структурном плане таким глубинам соответствуют депоцентры обеих впадин.

Локальное отклонение катагенеза ОВ установлено на Северо-Мурманской структуре (см. рис. 2,б, 5,а). Оно выражено увеличением уровня преобразования ОВ до стадии MK_2 (R^0 до 0,67) внутри зоны MK_1 (R^0 - 0,55-0,58). Анализ геологических условий, способствующих появлению

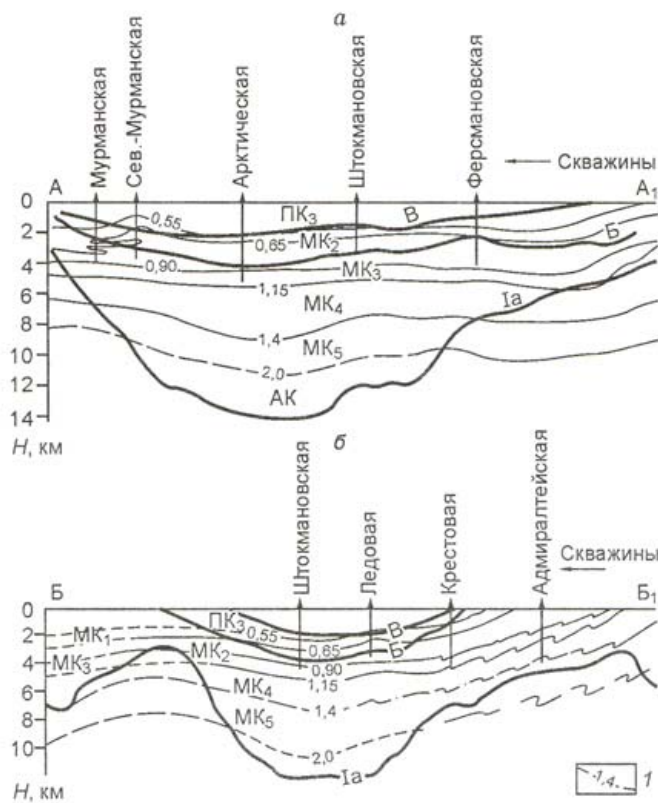


Рис. 6. Структурно-катагенетический профиль Баренцевского мегапрогиба: а — меридиональный; б — широтный.

Отражающие горизонты: Ia — в кровле терригенно-карбонатного комплекса, Б — в кровле верхнего триаса, В — в кровле верхней юры. I — изореспленды, в единицах измерения R^0 .

структурах перечисленных акваторий также установлено, что зоны катагенеза располагаются на более высоком гипсометрическом уровне, чем должно следовать, исходя из современной геотермии и глубин погружения [Theis et al., 1993]. Сравнение величин R^0 показало, что разность в глубинах залегания изометаморфных зон достигает от 0,3-0,5 до 1,5-2,0 км. Введение в катагенетическую модель поправки на более высокий геотермический градиент отчасти снимает контрастность расхождения величин R^0 , однако реальная кривая R^0 всегда оказывается гипсометрически выше, чем можно предполагать на основании геологических данных (рис. 7). Расхождение во всех скважинах было явлением постоянным, но разной величины, т.е. более высокое залегание катагенетических зон является следствием не только более напряженной термической истории в Баренцевоморском бассейне. Поскольку Западно-Арктический шельф с середины позднего мела являлся областью интенсивных поднятий [Muscato, 1997], то наиболее вероятной причиной в расхождении глубин положения зон катагенеза является амплитуда неотектонических поднятий, которые некомпенсированы последующими погружениями (аплифтом).

Таким образом, интенсивность и мощность зон катагенеза зависят от температурных условий, а их гипсометрическое положение при прочих равных условиях определяется величиной аплифта. С помощью намеченной зависимости величины аплифта и глубины залегания зон катагенеза, можно оценить его амплитуду по катагенетическим кривым. Амплитуда аплифта представляет собой расстояние между измеренными и расчетными значениями R^0 (в которые введены поправки на палеотемпературы), спроектированное на глубинную шкалу (см. рис. 7). Метод оценки величины аплифта по катагенетической модели удобен быстротой получения информации при погрешности не более $\pm 0,2$ км. Вычисленные этим способом величины амплитуды аплифта не противоречат тем значениям, которые получены при палеогеографических реконструкциях [Атлас палеогеографических..., 1990].

такого рода катагенетической аномалии, выявил ее пространственную приуроченность к интервалу, в котором получены литологические подтверждения проявления трапповых тел и постинтрузивных гидротерм [Комарницкий и др., 1993].

На поднятии Земли Франца-Иосифа зона MK_1 занимает самое высокое в Баренцевоморском регионе гипсометрическое положение - от 0 до 0,5 км и сопровождается как омоложением на север магматической активности (поздний мел - ранний палеоген), обусловившей компенсацию дефицита глубины погружения повышенными палеотемпературами, достигающими по некоторым оценкам 250-300°C [Безруков, 1997], так и действием мезозойско-кайнозойского аплифта, определившего выход катагенетически измененных пород в чуждую им зону катагенеза [Верба и Евдокимова, 1999; Muscato, 1997].

Влияние мезозойско-кайнозойского аплифта в значительной степени определило гипсометрическое положение катагенетических зон в разрезе осадочного чехла также и на основной площади Баренцевоморского мегапрогиба, норвежского сектора Баренцева и Северного морей. В

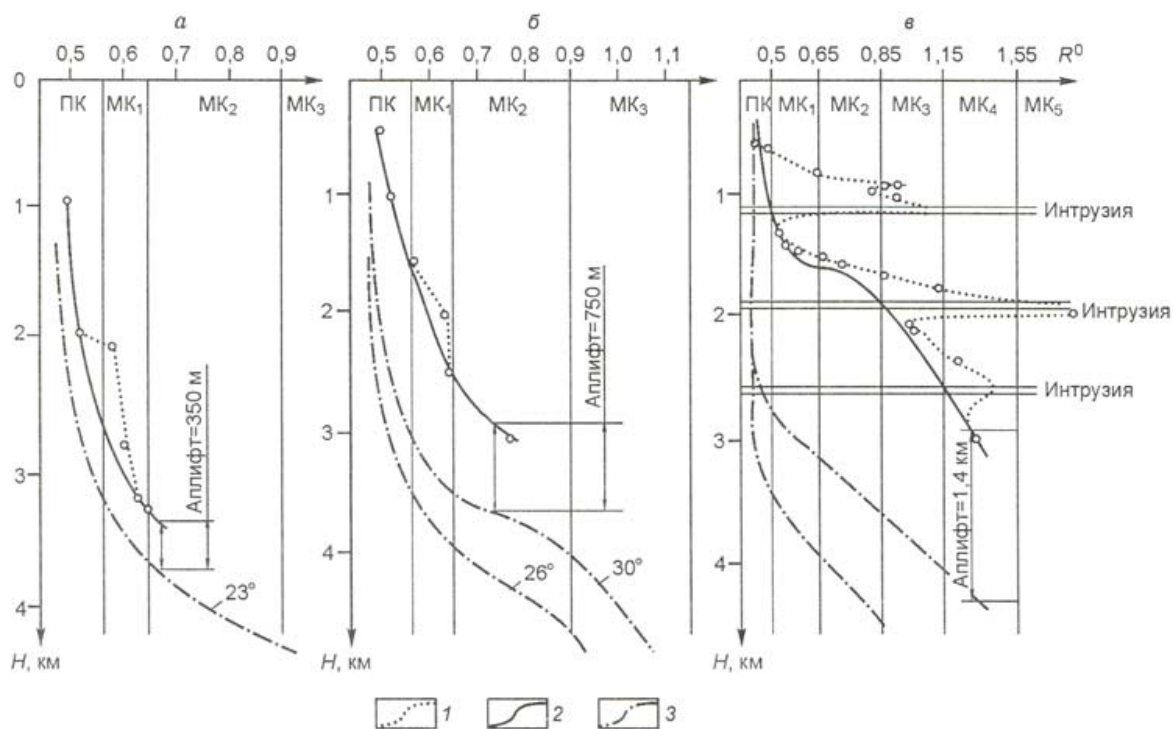


Рис. 7. Примеры оценки величины аплифта по данным катагенетического моделирования: а — скв. Песчаноозерская (о. Колгуев), б — скв. Лудловская; в — скв. Северная (о. Грэм-Белл, Земля Франца-Иосифа).

1 — аппроксимирующие данные R^0 по термической модели с учетом аплифта; 2 — то же, без учета аплифта; 3 — фактическая кривая катагенеза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ выполненных исследований катагенеза органического вещества осадочных отложений и его моделирование на шельфе Баренцева моря в стратиграфическом интервале мел - поздний палеозой общей мощностью 12-14 км показывает, что вертикальная катагенетическая зональность этой части осадочного чехла определена последовательно сменяющимися катагенетическими грациями - от ПК₃ до АК₁ включительно.

Что же касается латеральной катагенетической зональности, то в пределах Баренцевоморского мегапрогиба она в целом отражает строение этой крупнейшей геодепрессии, что подчеркивается конформностью структурных и катагенетических разделов в пределах Южно- и Северо-Баренцевских впадин. Совершенно иным по результатам моделирования представляется их соотношение в верхней части палеозойского терригенно-карбонатного комплекса на региональных поднятиях шельфа: Адмиралтейском мегавале и в зоне поднятий на западном борту мегапрогиба. Прибортовая зона поднятий характеризуется наибольшим несоответствием тектонической и катагенетической зональности структур осадочного чехла. Здесь сокращение мощности посленижнепермских терригенных комплексов (до 3-4 км по сравнению с 12-14 км в Южно-Баренцевской впадине) сопровождается заметным сжатием по вертикали зон катагенеза и общим отставанием интенсивности катагенных преобразований в рассматриваемой части осадочного чехла на 2-3 стадии. При этом изореспленды пересекают кровлю терригенно-карбонатного комплекса (отражающий горизонт Ia) (см. рис. 6), что позволяет датировать возраст зоны поднятий на западном борту Баренцевоморского мегапрогиба (и, очевидно, самого мегапрогиба) не моложе 250-280 млн лет. В последующем формирование осадочных комплексов в этой зоне происходило в условиях существования конседиментационного поднятия (зоны поднятий) по соседству с интенсивно погружающейся линейной депрессией, что предопределило существенные отличия в толщине синхронных комплексов в зоне поднятий и мегапрогибе. Отсюда с очевидностью следует принципиальный для оценок перспектив нефтегазоносности вывод о том, что зона поднятий на западном борту мегапрогиба (Центрально-Баренцевские поднятия) в течение, по крайней мере, последних 250 млн лет являлась положительной

структурой, существовавшей рядом с интенсивно развивавшимися впадинами (Южно- и Северо-Баренцевскими) и Нордкапским прогибом. В этих отрицательных структурах за это время накопились огромные объемы осадочных пород, существенная часть которых прошла главные фазы нефте- и газообразования. Сформированные в отрицательных структурах жидкие и газообразные углеводороды мигрировали в направлении ближайших крупных синхронных поднятий на западном борту Баренцевоморского мегапрогиба и Штокмановско-Лунинской мегаседловины, разделяющей Южно- и Северо-Баренцевские впадины. Уникальный масштаб газоносности Штокмановско-Лунинской мегаседловины доказан поисково-разведочными работами, затронувшими пока лишь верхний, юрско-меловой терригенный комплекс осадочного чехла. Естественно ожидать такие же результаты и в другой обширной нефтегазосборной области - на западном борту Баренцевоморского мегапрогиба.

Учитывая данные о составе и степени преобразования ОВ в изученной юрско-триасовой части осадочного чехла, можно предполагать, что основная часть УВ газов в юрско-меловой продуктивный комплекс центральной части Баренцевоморского шельфа поступила из нижележащих комплексов разреза - триасово-верхнепермского терригенного с преимущественно гумусовым типом ОВ и, возможно, каменноугольного-нижнепермского карбонатного и более древних с полигенетичным составом ОВ. Что же касается районов вероятного распространения нефтяных и газонефтяных месторождений на технически доступных глубинах, то в качестве таких структур могут предполагаться:

- Кольско-Канинская моноклинал, где вероятно наличие многочисленных неструктурных ловушек в зоне выклинивания мощного палеозойско-мезозойского осадочного чехла Южно-Баренцевской впадины;
- зона крупных поднятий западного борта Баренцевоморского мегапрогиба;
- Адмиралтейский мегавал в условиях сохранения достаточно надежных покрышек в палеозойском интервале разреза;
- район шельфа к югу от поднятия Земли Франца-Иосифа, где наряду с существованием «нефтяного окна» триасовые отложения представлены в морских фациях.

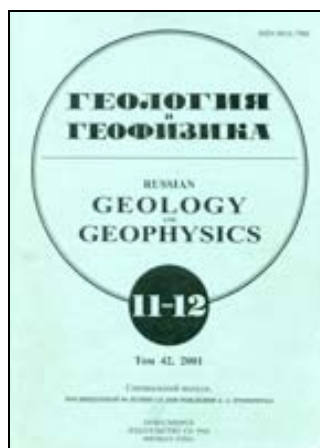
ЛИТЕРАТУРА

1. Аммосов И.И., Горшков В.И., Гречишников Н.П. и др. Петрология органических веществ в геологии горючих ископаемых. М., Наука, 1987, 332 с.
2. Моделирование процессов катагенеза органического вещества и нефтегазообразование // Ред. Е.А. Глебовская. Л., Недра, 1984, 137 с.
3. Неручев С.Г., Рогозина Е.А. Общая модель генерации нефти и газа в осадочных породах // Моделирование нефтегазообразования. М., Наука, 1992, с. 9-14.
4. Парпарова Г.М., Неручев С.Г., Жукова А.В. и др. Катагенез и нефтегазоносность. Л., Недра, 1981, 240 с.
5. Tissot B.P., Welte D.H. Petroleum formation and occurrence. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg-New-York-Tokyo, 1984, 699 p.
6. Жемчужников Ю.А. Зональность метаморфизма углей как метод расшифровки тектонических структур на примере Южно-Уэльского бассейна // Изв. АН СССР, Сер. геол., 1952, № 4, с. 15-26.
7. Погребницкий Е.О. Метаморфизм углей Донецкого бассейна // Химия твердого топлива, 1933, № 4, с. 289-293.
8. Скок В.И. Тектоника и глубинный метаморфизм угля в Кузнецком бассейне // Советская геология, 1963, № 5, с. 19-37.
9. Степанов Ю.В. Закономерности преобразования органического вещества углей на севере европейской части СССР // Угольные бассейны и условия их формирования. М., Наука, 1983, с. 34-41.
10. Harland W.B. Paleogene correlation in and around Svalbard // Geol. Mag., 1975, v. 112, p. 421-429.
11. Verba M.L., Evdokimova N.K. Magmatic intrusions influence on oil and gas generation of Barents Sea Mesozoic rocks // 57-th EAPG. Glasgow. Scotland. Extent abstr., 1995, p. 539-540.
12. Гордеева А.О., Жидкова Л.В., Хоменко А.В. Влияние интрузий долеритов на нефтегазоносность Южно-Тунгусской нефтегазосборной области // Геология нефти и газа, 1999, № 5-6, с. 34-39.

13. *Иванов Ю.А., Мясникова И.П.* Новые аспекты перспектив нефтегазоносности северных районов Сибирской платформы // Геология нефти и газа, 2000, № 4, с. 33-40.
14. *Конторович А.Э., Лиханов И.И., Лепетюха В.А. и др.* Применение геотермометров для оценки температур метаморфизма в осадочных бассейнах с трапповым магматизмом // Докл. РАН, 1995, т. 345, № 1, с. 793-796.
15. *Верба М.Л., Евдокимова Н.К.* Термическая история мезозойских отложений и оценка величины кайнозойского апlifта Баренцевской плиты по данным исследования катагенеза органического вещества // Нефтегазовая геология на рубеже веков. Т. 3. СПб., 1999, с. 351-360.
16. *Супруненко О.И., Евдокимова Н.К., Школа И.В. и др.* Перспективы нефтегазоносности архипелага Земля Франца-Иосифа // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб., ВНИИОкеангеология, 1998, с. 163-168.
17. *Gentzis T., Goodarzi F.* Thermal maturity and source potential of the sedimentary succession from the Drake field, Sverdrup basin, Arctic Canada // J. Petrol. Geol., 1993, v. 16, № 1, p. 33-54.
18. *Theis N., Nielsen H., Sales J.* Impact of data integration on basin modelling in the Barents Sea // Basin modelling: Advances and Applications edited by Dore A. et al. // NPF Special publication 3, Elsevier, Amsterdam, 1993, p. 433-444.
19. *Борисов А.В., Таныгин И.А., Винниковский В.С., Борисова И.А.* Штокмановско-Луниинский структурный порог Баренцевоморского шельфа - новый крупный нефтегазоносный район России // Геология нефти и газа, 1995, № 7, с. 10-15.
20. *Комарницкий В.М., Сапожников Е.А., Устинов Н.В.* Трапповые тела в осадочной толще Восточно-Баренцевского мегапрогиба // Нефтегазоносность Баренцево-Карского шельфа (по материалам бурения на шельфе и островах): Сб. науч. трудов. СПб., Роскомнедра. 1993, с. 55-63.
21. *Безруков В.М.* Природные битумы о. Грезм-Белл Земли Франца-Иосифа и их значение для оценки перспектив нефтегазоносности арктической окраины Баренцево-Северо-Карского шельфа // Геология нефти и газа, 1997, № 2, с. 20-24.
22. *Мусатов Е.Е.* Неотектонические критерии нефтегазоносности Баренцево-Карского шельфа // Известия ВУЗов. Геология и разведка, 1997, № 3, с. 43-51.
23. Атлас палеогеографических карт. Шельфы Евразии в мезозое и кайнозое. ГИН АН СССР. Робертсон групп. Лондон, 1990.

Поступила в редакцию 3 июля 2001 г.

Ссылка на статью:



Граumberг И.С., Евдокимова Н.К., Супруненко О.И. Катагенетическая зональность осадочного чехла Баренцевоморского шельфа в связи с нефтегазоносностью // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 11-12. С. 1808-1820.