

В. Н. Меленевский¹, А. Н. Фомин^{1}, В. А. Каширцев¹, Е. А. Костырева¹*

Катагенез органического вещества юрско-меловых отложений юго-запада Енисей-Хатангского регионального прогиба

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: FominAN@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Геохимическими методами (углепетрография, пиролиз, хромато-масс-спектрометрия), изучено рассеянное органическое вещество юрско-меловых отложений в скважинах Нанаянская-310, Южно-Носковская-318, Паютская-1 Енисей-Хатангского регионального прогиба. На границе мела и верхней юры установлен скачок показателя отражения витринита. Это катагенетическое несогласие подтверждено также данными пиролиза и биомаркерными параметрами уровня зрелости. Ориентировочная мощность размытых отложений по разным скважинам составляет примерно 350-800 м.

Ключевые слова: Западно-Сибирский мегабассейн, юрские и меловые отложения, катагенез (уровень зрелости) органического вещества, нефтегазоносность

V. N. Melenevskiy¹, A. N. Fomin^{1}, V. A. Kashirtsev¹, E. A. Kostyreva¹*

Catagenesis of organic matter from Jurassic-Cretaceous deposits in the southwestern Yenisey-Khatanga regional trough

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: FominAN@ipgg.sbras.ru

Abstract. Dispersed organic matter from Jurassic-Cretaceous deposits has been studied by geochemical methods (coal petrography, pyrolysis, gas chromatography-mass spectrometry) in wells Nanyanskaya-310, South Noskovskaya-318, Payutskaya-1 in the Yenisey-Khatanga regional trough. The jump in vitrinite reflectance index has been identified at the Cretaceous/Upper Jurassic boundary. This catagenetic unconformity was also confirmed by pyrolysis data and biomarker parameters of the thermal maturity level. The rough thickness of eroded deposits is about 350-800 m for different wells.

Keywords: West Siberian megabasin, Jurassic deposits, organic matter catagenesis (organic matter maturity), oil and gas content

Введение

Впервые вопрос о возможной нефтегазоносности Енисей-Хатангского регионального прогиба был поставлен Н.С. Шатским (1932). За последующий многолетний период научных исследований поисковых и разведочных работ была доказана нефтегазоносность мезозойских отложений, хотя в начальный период значительных скоплений углеводородов (УВ) не обнаружено. За последнее время пробурен ряд новых глубоких скважин, вскрывших значительную мощность мезозойского осадочного чехла. Для оценки его нефтегазоносности важное значение имеют геохимические исследования состава органического вещества (ОВ) и

степени его постседиментационных (катагенетических) преобразований. Ранее проведенные исследования по геологии и геохимии рассматриваемой территории позволили в общих чертах наметить региональные особенности строения и эволюции процессов нефтидогенеза [1-9 и др.]. С появлением нового фактического материала по глубоким горизонтам осадочного чехла, появилась возможность дополнить и уточнить выполненные ранее геохимические исследования.

Методы и материалы

Образцы пород юрско-мелового разреза скважин Нанадянская-310, Южно-Носковская-318, Паютская-1 изучались как массовыми геохимическими методами, к которым относятся определение нерастворимого остатка (н.о), содержание органического углерода ($C_{орг}$), выхода хлороформенного битумоида ($B_{хл}$), пиролиза (S_1, S_2, T_{max}) на приборе SR Analyzer, так и детальными: группового состава экстракта, хромато-масс-спектрального анализа (ХМС) биомаркеров во фракции насыщенных и ароматических УВ, химического состава концентратов керогена. Определение отражательной способности витринита (R_{vt}^o) проводилось на микроскопе-спектрофотометре МСФП-2. ХМС метод анализа осуществлялся на комплексе - хроматограф GC 6890 соединенным с масс-селективным детектором MSD 5975С.

Результаты

Методом пиролиза изучено 65 образцов керна в диапазоне глубин 1986-4187 м. Наибольшее среднее содержание $C_{орг}$ (~1 % на породу) установлено в среднеюрских (малышевская, леонтьевская свиты), в гольчихинской свите (K_1-J_2) и меловых отложениях (суходудинская, дерябинская свиты).

Общая характеристика рассеянного ОВ изученного разреза по его качеству и уровню катагенеза приведена на рис. 1 А в виде диаграммы зависимости HI от T_{max} . Из рисунка видно, что преобладающая часть разреза представлена ОВ с низкими значениями водородного индекса, что обусловлено значительным вкладом террагенной составляющей и неблагоприятными условиями в диагенетической стадии седиментогенеза. Интервал катагенетической зрелости охватывает главную зону нефтеобразования и начало зоны газообразования. Нефтематеринские свойства изученного разреза можно охарактеризовать как удовлетворительные, меловые отложения являются преимущественно газогенерирующими.

Известно, что температура T_{max} является пиролитическим параметром уровня зрелости ОВ. На рис. 1 Б показаны глубинные профили температуры T_{max} и отражательной способности витринита. Из полученных данных видно, что ОВ нижнемеловых отложений достигло МК₂ градации катагенеза, а среднеюрских – МК₃¹. Обращает на себя внимание большой разброс значений T_{max} по сравнению с отражательной способностью витринита. Особенно наглядно это проявляется, когда результаты представлены в виде диаграммы зависимости $R_{vt}^o=fT_{max}$ (рис. 1Б). Необходимо отметить, что это является не следствием погрешности определения температуры T_{max} ($\pm 3^\circ C$), а различием химического состава ОВ исследуемых проб.

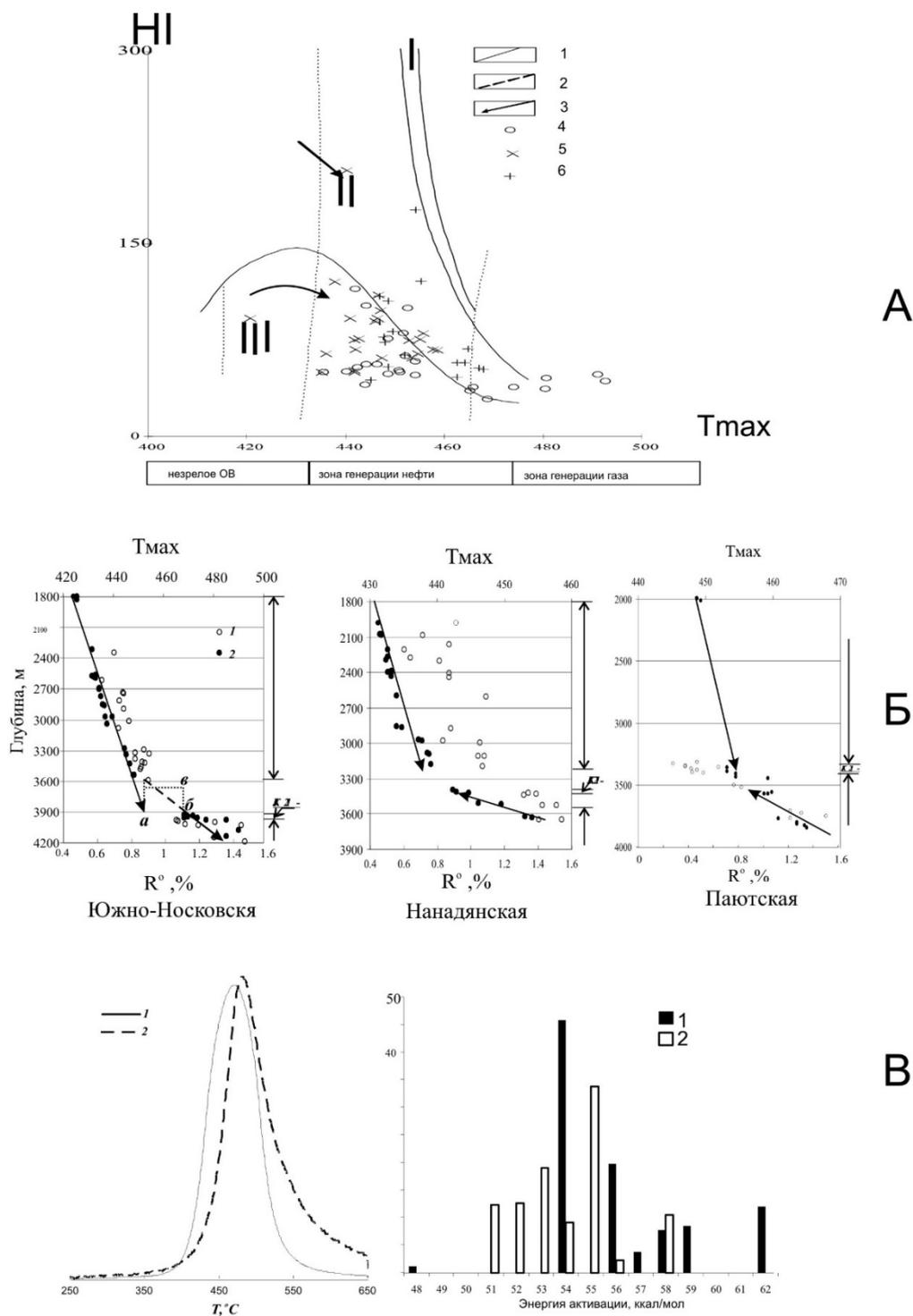


Рис. 1. **А** – диаграмма HI- T_{\max} : 1-линии, ограничивающие максимальные значения для водородного индекса (HI) трех типов органического вещества: 1- аквагенного озерного, 2-аквагенного морского, 3 –террагенного. Данные: 4- Южно_Носковская скв., 5 - Нанадянская скв., 6 – Паютская скв.; **Б** – изменение пиролитического параметра T_{\max} и отражательной способности витринита R_{vt}° с глубиной. **В** – пирограммы образцов из скв. Нанадянская (слева): 1 – гл. 2084,5 м, $C_{\text{орг}} = 3,49$, $T_{\max} = 432^{\circ}\text{C}$, 2 – гл. 1985,7 м, $C_{\text{орг}} = 1,53$, $T_{\max} = 443^{\circ}\text{C}$; (справа) – распределение энергии активации крекинга керогена 1 –гл. 2084,5м и 2 – гл. 1985,7м.

Значение T_{\max} является температурой, соответствующей максимальной скорости выделения углеводородов в процессе пиролитического анализа в варианте Rock-Eval, т.е. в конечном счете, она определяется кинетикой крекинга керогена. Последний процесс описывается в рамках представлений кинетики химических реакций и, в первую очередь, зависит от кинетических параметров - распределения энергии активации и предэкспоненциального множителя. Только для исходно монофациальных разрезов можно ожидать унифицированные зависимости $HI=f(T_{\max})$, показанных на рис. 1 А для трех типов ОВ – практически постоянная величина T_{\max} для первого типа ОВ в пределах главной зоны нефтеобразования (ГЗН) при переходе к III-ему типу сменяется на высокую «чувствительность» этого параметра к уровню катагенеза ОВ. Последний эффект объясняется более широким интервалом в распределении энергии активации для III-го типа ОВ в сравнении с первым. В качестве иллюстрации этого на рис. 1 В показаны пирограммы двух образцов из скв. Нанадянская-310.

Ввиду малого различия их глубин (около 100 м) они должны находиться на одинаковой стадии преобразованности, однако различаются по величине T_{\max} более чем на 10°C . Расчет величины распределения энергии активации для этих образцов при фиксированном значении предэкспоненциального множителя ($A=1 \cdot 10^{14}$ 1/сек) проведен по программе Kinetics 2000, (опция – «Simple Run Kinetic»), результаты его показаны на рис. 1 В. Таким образом, незначительное изменение в распределении энергии активации – от 54 ккал/моль (1-й образец) до 55 ккал/моль (2-й образец) привело к существенному увеличению величины T_{\max} у этих образцов. Однако, несмотря на эти ограничения, четко просматривается симбатность (подобие) в глубинной зональности как по отражательной способности витринита, так и температуре T_{\max} . Из рис.1 Б видно, что на границе мела и верхней юры прослеживается скачок показателя отражения (скв. Ю-Носковская и Нанадянская) и температуры T_{\max} (скв. Ю-Носковская, Нанадянская и Паютская). Этот катагенетический или палеогеотермический перерыв, по-видимому, является следствием размыва частично нижнемелового и среднеюрского и полностью верхнеюрского интервала разреза. Основываясь на данных по изменению отражательной способности витринита (R_{vt}^0) по разрезу скважин можно примерно установить величину размыва. Наиболее наглядно это проявляется в скв. Южно-Носковская-318. Здесь градиент катагенеза ($\Delta R_{vt}^0/100$ м) составляет порядка 0,034. В подошве дерябинской свиты (K_1) на глубине 3600 м $R_{vt}^0 = 0,82\%$, а в кровле гольчихинской на глубине 4000 м (K_1 - J_2) – 1,12%. Следовательно, скачок отражательной способности витринита между этими горизонтами составляет 0,30%. Учитывая градиент катагенеза можно предположить, что мощность размывных толщ составляет порядка 800 м. В скв. Нанадянская-310 при близком градиенте катагенеза мощность размыва между этими толщами существенно меньше и не превышает 350 м. Интересно также отметить, что в скв. Южно-Носковская-318 градиент отражательной способности витринита ($\Delta R/\Delta H$) для меловой части разреза составляет величину равную $\approx 0,020 \%$ /100 м, а для юрских отложений $\approx 0,12 \%$ /100 м. В скв. Нанадянская-310 эти значения составляют соответственно 0,026 %/100 м и 0,15 %/100 м. В целом это совпадает с обобщен-

ными данными по катагенезу ОВ Западной Сибири [10] и свидетельствует в пользу более напряженного теплового потока в юрский период по сравнению с меловым.

Термокаталитическое "созревание" органического вещества при его фоссилизации по мере перехода осадков в горные породы ведет к направленному преобразованию молекул – биомаркеров, в частности терпанов и стеранов, происходит сложное последовательное изменение конфигурации (эпимеризация) ряда хиральных центров у «биомолекул», что ведет к образованию более термодинамически устойчивых «геомолекул» без особой перестройки всей молекулярной структуры. Для оценки степени "зрелости" органического вещества, служившего источником нефтяных углеводородов, в геохимических построениях используют различные соотношения био- и геомолекул. Среди стеранов это чаще всего соотношения изостеранов и α -стеранов ($14\beta, 17\beta, 20R + 20S / 5\alpha, 20R$), так называемый "коэффициент созревания" [11, 12 и др.]. Для гопанов на ранней стадии «созревания» обычно используются соотношения $17\alpha(H)21\beta(H)$ и $17\beta(H)21\beta(H)$ гопанов, а также отношение $22S/22R+22S$ изомеров (для гомогопанов C_{31} и далее). Кинетически первая реакция протекает значительно быстрее второй и поэтому первое соотношение удобно использовать для определения зрелости слабоизмененных углей, горючих сланцев и рассеянного органического вещества [12]. В зрелом органическом веществе и большинстве нефтей практически нет $17\beta(H)21\beta(H)$ гопанов, а соотношение изомеров $22S/22R$ примерно равно 60:40. Это соотношение отражает термодинамическое равновесие изомеров гопана для термокаталитически зрелых нефтей, а чем меньше степень зрелости, тем сильнее сдвинут баланс в сторону уменьшения изомера $22S$. Для «высокозрелого» рассеянного ОВ и нефтей наиболее показательным является термокаталитическое преобразование $17\alpha(H)21\beta(H)$ гопана C_{27} (или гопана Tm) в термодинамически стабильный $18\alpha(H)$ -неогопан C_{27} (гопан Ts). Другим не менее значимым показателем может служить отношение $18^*(H)$ -неогопана C_{29} к собственно $17^*(H)21^*(H)$ адиантану C_{29} . В качестве примера, наиболее ярко характеризующего скачек катагенетической преобразованности ОВ в интервале глубин 3500–3700 м, показаны масс-хроматограммы, сканированные по m/z 191 для разреза скв. Паютская-1 (рис. 2).

В правом углу рисунка показаны глубины отбора проб и величины геохимических параметров, перечисленных выше. Идентификация индивидуальных гопанов показана в табл. 1. Нетрудно заметить, что такой параметр как Ts/Tm на глубинах 3316 м, 3366 м, 3516 м. изменяется сравнительно плавно 1,39; 1,40; 1,48 соответственно и резко возрастает до 24,73(!) на глубине 3734 м. Аналогичный скачок отмечен и для отношения $18\alpha(H)$ -неогопана C_{29} к собственно $17\alpha(H)21\beta(H)$ адиантану C_{29} (рис. 2).

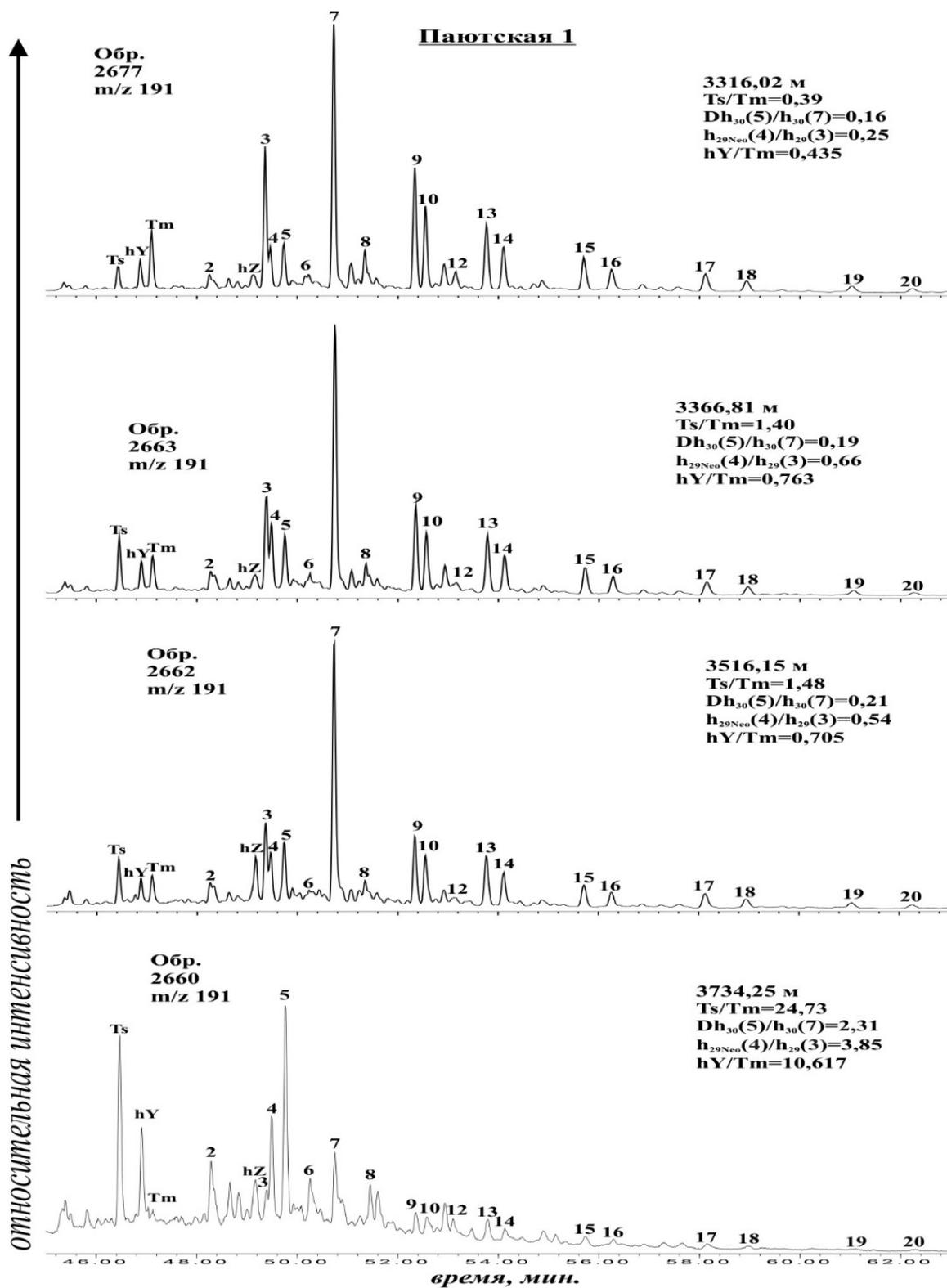


Рис. 2. Масс-хроматограммы распределения терпанов в насыщенной фракции битумоидов из агиллитов мезозойских отложений Паютской скв. с глубиной. (Идентификация углеводов в табл. 1)

Идентификация пиков терпанов при $m/z=191$

Услов. обозн.	Пик №	Эмпирическая формула	Молек. вес	Название структуры
h₂₇(Ts)		C ₂₇ H ₄₆	370	18α(H)-22,29,30-триснорнеогопан (Ts)
h_Y		C ₃₀ H ₅₂	412	
h₂₇(Tm)		C ₂₇ H ₄₆	370	17α(H),21β(H)-22,29,30-трисноргопан (Tm)
	1	C ₂₇ H ₄₆	370	17β(H),21β(H)-22,29,30-трисноргопан
	2	C ₂₉ H ₅₀	398	17α(H),21β(H)-30-нордиагопан
h_Z		C ₃₀ H ₅₂	412	C(14α)-гомо-26-нор-17α-гопан
h₂₉	3	C ₂₉ H ₅₀	398	17α(H),21β(H)-30-норгопан (адиантан)
h₂₉*	4	C ₂₉ H ₅₀	398	18α(H)-30-норнеогопан (Ts)
h₃₀*	5	C ₃₀ H ₅₂	412	диагопан
M₂₉	6	C ₂₉ H ₅₀	398	17β(H),21α(H)-30-норморетан
h₃₀	7	C ₃₀ H ₅₂	412	17α(H),21β(H)-гопан
M₃₀	8	C ₃₀ H ₅₂	412	17β(H),21α(H)-моретан
h₃₁(S)	9	C ₃₁ H ₅₄	426	17α(H),21β(H)-гомогопан (22S)
h₃₁(R)	10	C ₃₁ H ₅₄	426	17α(H),21β(H)-гомогопан (22R)
G₃₀	11	C ₃₀ H ₅₂	412	17β(H),21β(H)-гопан (гаммацерапан)
M₃₁	12	C ₃₁ H ₅₄	426	17β(H),21α(H)-30-гомоморетан (22S+22R)
h₃₂(S)	13	C ₃₂ H ₅₆	440	17α(H),21β(H)-бисгомогопан (22S)
h₃₂(R)	14	C ₃₂ H ₅₆	440	17α(H),21β(H)-бисгомогопан (22R)
h₃₃(S)	15	C ₃₃ H ₅₈	454	17α(H),21β(H)-трикисгомогопан (22S)
h₃₃(R)	16	C ₃₃ H ₅₈	454	17α(H),21β(H)-трикисгомогопан (22R)
h₃₄(S)	17	C ₃₄ H ₆₀	468	17α(H),21β(H)-тетракисгомогопан (22S)
h₃₄(R)	18	C ₃₄ H ₆₀	468	17α(H),21β(H)-тетракисгомогопан (22R)
h₃₅(S)	19	C ₃₅ H ₆₂	482	17α(H),21β(H)-пентакисгомогопан (22S)
h₃₅(R)	20	C ₃₅ H ₆₂	482	17α(H),21β(H)-пентакисгомогопан (22R)

Заключение

Из анализа результатов проведенных геохимических исследований (углепетрография, пиролиз, распределение насыщенных УВ-биомаркеров) можно сделать следующие выводы:

- в изученных разрезах скважин Нанаянская-310, Южно-Носковская-318, Паютская-1 Енисей-Хатангского регионального прогиба установлен катагенетический скачок, который отвечает мощности эродированных толщ равной приблизительно 350–800 м;

- в изученном разрезе можно предполагать наличие двух фаз генерации нефти: первая происходила в интервале нижнего мела – средней юры, однако за

счет размыва этих отложений, вероятность сохранения образовавшихся залежей УВ невелика; вторая фаза генерации УВ соответствует нижнемеловым отложениям, которые в настоящее время в интервале 2700–3600 м находятся в ГЗН.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта № FWZZ-2022-0011 программы ФНИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сороков Д.С. Органическое вещество юрско-меловых пород /Геология и нефтегазоносность Енисей-Хатангского прогиба. – Л.: Наука, 1971. – С. 83-91.
2. Афанасенков А.П. Особенности катагенетических преобразований рассеянного органического вещества юрско-меловых отложений Енисей-Хатангской нефтегазоносной области // Геохимические и геофизические методы прямых поисков залежей углеводородов в Енисей-Хатангском прогибе. – Л.: Наука, 1974. – С. 69-80.
3. Войцеховская А.Г. О составе рассеянного органического вещества в юрских и меловых отложениях Енисей-Хатангского прогиба //Енисей-Хатангская нефтегазоносная область. – Л.: Наука, 1974. – С. 81-97.
4. Данюшевская А.И. Геохимия органического вещества мезозойских отложений Средней Сибири. Теоретические закономерности и прогноз нефтегазообразования: Автореф. дисс. д-ра геол.-мин. наук. – Л.: ВНИГРИ, 1975. – 32 с.
5. Гребенюк В.В., Луговцов А.Д., Москвин В.И. Особенности формирования зон нефтегазонакопления в мезозое Енисей-Хатангского регионального прогиба //Геология и нефтегазоносность Енисей-Хатангского бассейна. – М.: Наука, 1982. – С. 132-140.
6. Болдушевская Л.Н., Фомин А.Н., Филиппов Ю.А. Зональность катагенеза органического вещества мезозойских отложений Енисей-Хатангской и Пур-Тазовской нефтегазоносных областей по данным пиролиза и отражательной способности витринита // Критерии оценки нефтегазоносности ниже промышленно освоенных глубин и определение приоритетных направлений геолого-разведочных работ /Под ред. М.Б.Келлера и А.В.Липилина. – Пермь: КамНИИКИГС, 2001. – Книга 2. – С. 99-105.
7. Полякова И.Д., Колганова М.М., Соболева Е.И., Степаненко Г.Ф. Геохимические критерии нефтегазоносности севера Сибирской платформы //Геология и нефтегазоносность Енисей-Хатангского бассейна. – М.: Наука, 1982. – С. 119-132.
8. Фомин А.Н., Ромахина Г.А. Катагенез рассеянного органического вещества юрско-меловых отложений западной части Енисей-Хатангского прогиба // Геология и геофизика. – 1989. – № 11. – С. 96-100.
9. Родченко А. П. Кероген верхнеюрских отложений западной части Енисей-Хатангского регионального прогиба // Геохимия. – 2022. – № 8. – С. 750-765.
10. Фомин А.Н., Конторович А.Э., Красавчиков В.О. Катагенез органического вещества и перспективы нефтегазоносности юрских, триасовых и палеозойских отложений северных районов Западно-Сибирского мегабассейна //Геология и геофизика. – 2001. – № 11-12. – С. 1875-1887.
11. Seifert W.K. and Moldowan J.M. Applications of steranes, terpanes and monoaromatics to the maturation, migration and source of crude oils // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 1979. – Vol.43. – P.111-126.
12. Петров Ал.А. Углеводороды нефти. – М.: Наука, 1984. – 264 с.

© В. Н. Меленевский, А. Н. Фомин, В. А. Каширцев, Е. А. Костырева, 2023