

Геохимия керогенов юрских отложений севера Западной Сибири

Л.С. Борисова^{1*}, А.Н. Фомин^{1,2}, Н.С. Ким², Е.С. Ярославцева¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В работе исследованы геохимические особенности состава керогенов юрских отложений севера Западной Сибири. Установлены закономерности изменения пиролитических и изотопных характеристик органического вещества, получена информация о его генетическом типе, уровне зрелости и нефтегазогенерационном потенциале. В юрских отложениях выявлены основные нефтепроизводящие комплексы (баженовский горизонт), а также горизонты, способные из-за своей высокой зрелости продуцировать преимущественно газообразные углеводороды (малышевский, леонтьевский, в меньшей степени левинский, китербютский горизонты).

Ключевые слова: органическое вещество, кероген, элементный состав, изотопный состав углерода, пиролиз, юрские отложения, север Западной Сибири

Для цитирования: Борисова Л.С., Фомин А.Н., Ким Н.С., Ярославцева Е.С. (2024). Геохимия керогенов юрских отложений севера Западной Сибири. *Георесурсы*, 26(4), с. 20–31. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.4>

Введение

Объектом настоящего исследования является кероген юрских отложений северных территорий Западной Сибири. Термин «кероген» впервые был предложен К. Брауном (1912) для обозначения органического вещества шотландских битумных сланцев. После расширения Б. Дюраном (1980) понятия «кероген» до нерастворимого органического вещества (НОВ) стало ясно, что знания о керогене позволяют установить взаимосвязь начального генерационного потенциала с захоронением органического вещества (ОВ) и превращением его в кероген, а также с изменением строения ОВ на всех этапах катагенеза в осадке.

Теоретические основы интерпретации результатов исследований органического вещества (в том числе и керогена) начали развиваться начиная со второй половины XX в. в трудах ведущих ученых: В.А. Успенского (Успенский и др., 1958; Успенский, 1970), Г.М. Парпаровой, С.Г. Неручева (Парпарова, Неручев, 1977), А.Э. Конторовича (Конторович и др., 1985; Конторович, 2004; Богородская и др., 2005), Ю.И. Корчагиной, О.П. Четвериковой (Корчагина, Четверикова, 1976), Б. Тиссо, Д. Вельте (Тиссо, Вельте, 1981), Д. Эспиталье (Espitalie, 1986), М. Ванденброка (Vandenbroucke, 2003). В настоящее время представления о природе и составе керогена существенно расширены работами коллективов: ВНИГРИ (Суханов

и др., 2011 и др.), ТомскНИПИнефть (Гончаров и др., 2016 и др.), ИГ Коми НЦ УрО РАН (Бушнев и др., 2019 и др.), ИНГГ СО РАН (Конторович и др., 2019; Борисова и др., 2020, 2022).

Материал и методика

Нами использовалась разработанная в 70–80 годах прошлого столетия Л.И. Богородской и А.Э. Конторовичем схема выделения и изучения нерастворимого органического вещества (керогена), описанная позднее в работе (Богородская и др., 2005). Предложенная академиком А.Э. Конторовичем классификация типов керогенов на основе их элементного состава и пиролитических параметров широко используется в современной литературе наряду с ранее созданной за рубежом классификацией (Ван-Кревелен, Шуер, 1960; Тиссо, Вельте, 1981).

В настоящей работе приводится информация по горизонтм о генетическом типе ОВ, степени его катагенеза и нефтегазогенерационном потенциале юрских отложений севера Западной Сибири на основании данных пиролиза, элементного и изотопного анализов керогена (230 проб) – рис. 1. Исследование ОВ пород проводили в лаборатории геохимии нефти и газа, в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (г. Новосибирск). На элементном анализаторе EA 1110 (CE Instruments, Италия) определяли содержания углерода, водорода, азота и серы керогенов, кислород рассчитывали, как разность, исходя из 100%. Важным геохимическим параметром состава и структуры керогена является атомное отношение водорода и углерода (H/C)_{ат}. Измерение изотопного состава углерода проб проводили на масс-спектрометре DELTAVAdvantage

* Ответственный автор: Любовь Сергеевна Борисова
e-mail: BorisovaLS@ipgg.sbras.ru

© 2024 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

(ThermoFisherScientific, Германия) в Томском филиале АО «СНИИГГиМС» (г. Томск). Пиролитические исследования выполнялись по методу Rock-Eval на анализаторе Source Rock Analyzer (Weatherford Laboratory, Instr. Division, США) в режиме ТРН/ТОС (S_1 , S_2 , S_3 , ТОС, T_{max}).

Результаты

Нижнеюрские отложения

Зимний горизонт изучен в 9 обр. береговой свиты. Содержание органического углерода ($C_{орг}$) меняется

от 0,40% до 2,26% на породу, в среднем составляя 1,58%. Нерастворимое ОВ характеризуется низким содержанием пиритной серы (0,20–1,15%), зольностью от 2,00% до 22,80%, влажностью в среднем 1,30% (табл. 1). Исключение составляет образец с юго-запада района исследования – с Хойтаркинской площади (скв. 71, гл. 4267 м), имеющий относительно высокое содержание $C_{орг}$ (4,96%), высокую зольность (38,33%) и большое количество пиритной серы (26,86%). По данным элементного анализа керогены зимнего горизонта имеют в среднем



Рис. 1. Схематическая карта точек отбора проб. Условные обозначения: 1 – речная сеть; 2 – города; 3 – граница района исследования; 4 – скважины, в которых изучены керогены

Горизонт	$C_{\text{орг}}, \%$	Сера пиритная, $\%$ на кероген	C, $\%$ на ОВ	H, $\%$ на ОВ	S, $\%$ на ОВ	O+N+S, $\%$ на ОВ	$(H/C)_{\text{ат}}$	$(O/C)_{\text{ат}}$	$\delta^{13}\text{C},$ $\%$	$T_{\text{max}},$ $^{\circ}\text{C}$	НІ, мг УВ/г $C_{\text{орг}}$
Зимний	1,58	0,7	87,1	4,3	0,3	8,6	0,60	0,07	–26,5	500	46
Левинский	1,91	0,6	85,4	4,7	0,3	9,9	0,66	0,09	–26,4	490	90
Шараповский	2,63	1,1	85,3	4,8	0,4	9,9	0,67	0,07	–25,9	480	66
Китербютский	2,45	1,6	85,4	4,9	0,5	9,7	0,69	0,07	–27,7	468	43
Надояхский	2,74	0,4	86,3	4,8	0,2	8,9	0,67	0,08	–26,6	478	40
Лайдинский	2,95	0,5	87,6	4,9	0,4	7,5	0,67	0,05	–25,0	476	45
Вымский	3,89	2,1	85,0	5,0	1,0	10,0	0,71	0,06	–25,4	460	114
Леонтьевский	3,43	2,3	82,4	5,1	0,4	12,5	0,75	0,09	–28,4	454	136
Малышевский	3,44	2,0	81,0	5,3	0,8	13,7	0,78	0,11	–26,3	452	123

Табл. 1. Средние данные анализа керогенов ниже- и среднеюрских отложений

относительно высокое содержание углерода (87,10%) при низких значениях концентрации водорода и атомного отношения Н/С (в среднем 4,30% и 0,60%), характеризуются низким содержанием серы (в среднем 0,27%) и тяжелым изотопным составом углерода (в среднем –26,5‰) (табл. 1). Из тригонограммы С–Н–ОNS (рис. 2) следует, что керогены изученных проб зимнего горизонта главным образом попадают в область высоко преобразованного ОВ (градации МК_3^{1-2} –АК) (Фомин, 2011) террагенного типа. Это подтверждается и пиролизическими данными: очень низкий нефтегенерационный потенциал – НІ в среднем

составляет 46 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$; температура максимального выхода углеводородов пика $S_2(T_{\text{max}})$ в среднем составляет 500 °С.

Из левинского горизонта изучено 9 обр. ягельной и 4 обр. левинской свит. В нем органический углерод содержится подобно зимнему горизонту в низких концентрациях: значения $C_{\text{орг}}$ варьируют от 0,38% до 5,20% на породу, в среднем 1,91%. Исследования показали, что НОВ характеризуется низким содержанием пиритной серы 0,08–1,43% (в среднем 0,55%), зольностью до 11,13%, влажностью в среднем 1,35% (табл. 1). Значения $\delta^{13}\text{C}$ изотопного состава углерода НОВ изменяются от –28,6‰ до –24,7‰. Содержание углерода в среднем составляет 85,40%, значения водорода и атомного отношения Н/С в среднем выше, чем для НОВ зимнего горизонта – 4,73% и 0,66% (табл. 1). При нанесении данных на тригонограмму элементного состава можно наблюдать, что керогены левинского горизонта попадают в область террагенного и смешанного ОВ (рис. 2). Кроме того, из тригонограммы следует, что ОВ изученных проб менее преобразовано, чем в нижележащем зимнем горизонте (градации МК_2 – МК_3^1).

По данным пиролиза образцы НОВ левинского горизонта характеризуются в среднем небольшим, но по сравнению с зимним горизонтом более высоким остаточным нефтегенерационным потенциалом (НІ) (90 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$). Исключение составляют керогены Восточно-Бованенковской площади (скв. 10, гл. 3070–3960 м) с НІ 180 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$ и содержанием водорода 5,22% и Западно-Новогодней площади (скв. 210, гл. 3917–3940 м) с НІ 150 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$ и содержанием водорода 6,50% (рис. 2, 3).

Нерастворимое органическое вещество шараповского горизонта изучено по 16 обр. нижней пачки нижней под-свиты котухтинской свиты (черничной) и шараповской свиты. Содержание органического углерода в среднем составляет 2,63% на породу. Установлено, что керогены шараповского горизонта характеризуются более высоким (в среднем 1,10%) по сравнению с НОВ нижележащего левинского горизонта (в среднем 0,60%) содержанием пиритной серы (табл. 1). Элементный состав керогенов в среднем характеризуется относительно высокой концентрацией углерода (85,30%), но низким содержанием водорода и атомного отношения (Н/С)_{ат} (в среднем 4,80% и 0,67% соответственно). Керогены шараповского горизонта, следовательно, попадают в область террагенного и смешанного ОВ (рис. 2) достаточно высокой стадии

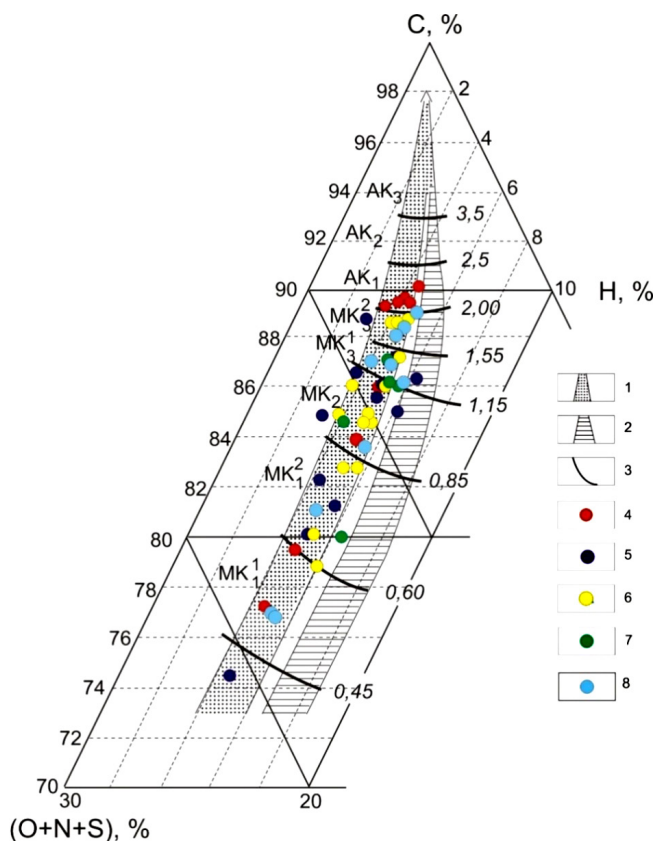


Рис. 2. Элементный состав керогенов ОВ нижеюрских отложений севера Западно-Сибирского бассейна. Поля эволюции элементного состава: 1 – углей и керогена террагенного типа; 2 – керогена аквагенного типа; 3 – границы зон катагенеза, цифрами обозначены значения $R_{\text{в}}$. Горизонты: 4 – зимний; 5 – левинский; 6 – шараповский; 7 – китербютский; 8 – надояхский

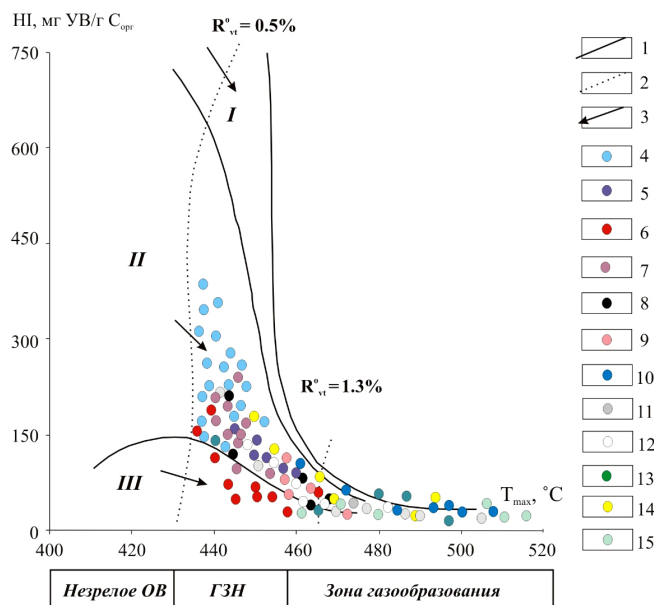


Рис. 3. Результаты пиролиза керогенов юрских отложений. Обозначения: 1 – направленность изменения типов ОВ; 2 – границы изолиний R^0_{vt} ; 3 – направление трансформации HI и T_{max} в катагенезе. Горизонты: 4 – баженовский (J3); 5 – георгийевский; 6 – васюганский; 7 – малышевский (J2); 8 – леонтьевский; 9 – вымский; 10 – лайдинский; 11 – надояхский (J1); 12 – китербютский; 13 – шараповский; 14 – левинский; 15 – зимний

преобразованности (MK_2 – MK_3^1). Кроме того, керогены изученных проб имеют тяжелый изотопный состав углерода (в среднем $-25,9\text{‰}$).

По данным пиролиза образцы НОВ шараповского горизонта характеризуются в среднем невысоким остаточным нефтегенерационным потенциалом ($66 \text{ мг УВ/г } C_{орг}$); температура максимального выхода углеводородов пика S_2 (T_{max}) в среднем составляет 490°C , что свидетельствует о существенной реализации ОВ его начального генерационного потенциала (табл. 1, рис. 3).

Китербютский горизонт представлен тогурской свитой. Керогены (10 обр.) имеют относительно высокие содержания ОВ ($C_{орг}$ в среднем составляет $2,45\%$) и пиритной серы (в среднем $1,60\%$) (табл. 1). Элементный состав керогена характеризуется высоким содержанием углерода ($84,7$ – $87,1\%$), доля водорода в среднем составляет $4,85\%$, но в отдельных образцах доходит до $6,65\%$ (рис. 2). Атомное отношение $(H/C)_{ат}$ варьирует от $0,51$ до $0,93$. Образец керогена с Новопортовской площади (скв. 88, гл. 2480 м) выделяется не только высоким содержанием водорода ($6,20\%$), но и аномально повышенным присутствием пиритной серы ($43,70\%$) и слабой преобразованностью ОВ (градации MK_1^1). Органическое вещество остальных образцов находится на более высоких градациях катагенеза MK_2 – MK_3^1 . Изотопный состав углерода керогенов этого горизонта варьирует от тяжелого ($-24,9\text{‰}$) до относительно легкого ($-29,9\text{‰}$), что подтверждает вклад в ОВ отдельных образцов аквагенной составляющей. Углеводородный потенциал изученных проб китербютского горизонта низкий и меняется в пределах 27 – $72 \text{ мг УВ/г } C_{орг}$. Исключение составляют образцы с Сугмутской площади (скв. 423, гл. 3866 м), имеющие более высокий остаточный нефтегенерационный потенциал – до $120 \text{ мг УВ/г } C_{орг}$ (рис. 3).

Надояхский горизонт представлен одноименной свитой (10 обр.). Содержание органического вещества в изученной коллекции варьирует от $0,80\%$ до $5,27\%$. Керогены характеризуются низкой концентрацией пиритной серы ($0,14$ – $0,50\%$) и высоким содержанием углерода ($83,58$ – $89,20\%$) при относительно малой доле водорода ($3,97$ – $5,80\%$) и серы ($0,04$ – $0,60\%$) (рис. 2). Атомное отношение $(H/C)_{ат}$ варьирует от $0,55$ до $0,81$. Изотопный состав углерода керогенов в целом тяжелый – от $-28,6\text{‰}$ до $-24,2\text{‰}$, что указывает на террагенный тип ОВ. Органическое вещество преобразовано до градации AK_1 . Углеводородный потенциал керогенов главным образом низкий (18 – $45 \text{ мг УВ/г } C_{орг}$). Исключением является кероген с Медвежьей площади (скв. 316, гл. 2327 м), с относительно высоким нефтегенерационным потенциалом ($198 \text{ мг УВ/г } C_{орг}$) и повышенным содержанием водорода ($5,13\%$) при низком значении углерода ($76,91\%$). По данным отражательной способности витринита (R^0_{vt} $0,64\%$) и элементного анализа кероген с этой площади характеризуется невысокой степенью преобразованности (конец градации MK_1^1). Этому не противоречит пиролитический параметр T_{max} (440°C), отвечающий главной зоне нефтеобразования (рис. 3).

Среднеюрские отложения

Лайдинский горизонт представлен одноименной свитой и верхней подсвитой новогодней свиты (7 обр.). Изученные породы горизонта имеют содержание $C_{орг}$ в среднем выше, чем нижележащие среднеюрские отложения ($2,95\%$ против $2,26\%$ в среднем). Концентрация водорода в керогенах относительно высокая – $4,42$ – $5,80\%$, значения $(H/C)_{ат}$ варьируют от $0,61$ до $0,81$; при этом содержание углерода значительно – $85,80$ – $90,17\%$. Изотопный состав углерода керогена лайдинского горизонта тяжелый ($-25,1$... $-24,3\text{‰}$). Согласно полученным результатам (табл. 1, рис. 4) ОВ лайдинского горизонта преимущественно террагенное и высоко преобразовано (градации MK_3^2 – AK_1). УВ-потенциал ОВ горизонта низкий – 36 – $49 \text{ мг УВ/г } C_{орг}$ (рис. 3). Исключение составляет кероген с Евяхинской площади (скв. 356, гл. 4645 м) с относительно легким изотопным составом углерода ($-28,7\text{‰}$) и относительно высоким генерационным потенциалом ($109 \text{ мг УВ/г } C_{орг}$). По данным элементного анализа степень преобразованности его ОВ соответствует главной зоне нефтеобразования (MK_1^2 – MK_2).

Вымский горизонт представлен 15 обр., третья часть которых выделяется высокими значениями $C_{орг}$ (от $5,00\%$ до $10,23\%$). В среднем содержание $C_{орг}$ и пиритной серы в изученной выборке выше, чем в нижележащих породах нижней и средней юры ($3,89\%$ и $2,06\%$ соответственно) (табл. 1). Аномально высокое содержание пиритной серы ($24,05\%$) зафиксировано в образце с Евяхинской площади (скв. 356, гл. 4320 м). Элементный состав керогенов вымского горизонта характеризуется вкладом углерода от $79,51\%$ до $87,60\%$, водорода – от $4,30\%$ до $5,66\%$ (рис. 4), серы – до $6,07\%$, атомным отношением $(H/C)_{ат}$ – от $0,61$ до $0,83$. Изотопный состав углерода керогенов имеет значения от $-28,0\text{‰}$ до $-21,8\text{‰}$. Тип ОВ по данным элементного и изотопного анализов преимущественно террагенный, нефтегенерационный потенциал в среднем составляет $114 \text{ мг УВ/г } C_{орг}$ (рис. 3). Исключением является

образец из скважины Евояхинская-356 (гл. 4320 м), имеющий, по всей видимости, аквагенный генезис – наряду с отмеченным высокой концентрацией пиритной серы кероген с этой площади характеризуется относительно легким изотопным составом углерода ($-28,3\text{‰}$), высоким содержанием водорода, а также значительным остаточным нефтегенерационным потенциалом и степенью преобразованности ОВ, соответствующей главной зоне нефтеобразования (МК_2).

Леонтьевский горизонт представлен 8 обр. средне-тюменской подсвиты и 3 обр. леонтьевской свиты. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в них в среднем составляет $3,43\%$. Исключение – образец со скважины Медвежья-1001 (гл. 3543 м), характеризующийся высоким значением $\text{C}_{\text{орг}}$ ($10,56\%$). По элементному анализу керогенов содержание углерода в них варьирует от $79,20\%$ до $84,60\%$, водорода – от $4,55\%$ до $6,00\%$, серы – от $0,18\%$ до $1,00\%$. Значения $(\text{H/C})_{\text{ат}}$ в изученных керогенах лежат в диапазоне от $0,65$ до $0,87$. Изотопный состав углерода НОВ в среднем составляет $-28,4\text{‰}$, УВ-потенциал – $186 \text{ мг УВ/г } \text{C}_{\text{орг}}$. По полученным результатам исследования керогена леонтьевского горизонта (табл. 1, рис. 3, 4) тип ОВ этих отложений можно охарактеризовать как террагенный с примесью аквагенного. Исключение составляет кероген из скв. Евояхинской-356 (гл. 4145 м), отличающийся значением $\delta^{13}\text{C}$, равным $-29,8\text{‰}$, а также керогены пород, отобранных из скв. Медвежья-1001 (гл. 3543 м), Сузунская-4 (гл. 3677 м), Паютская-1 (гл. 3756 м), выделяющиеся по составу ОВ (аквагенного или смешанного генезиса) с относительно высоким содержанием водорода (до $6,00\%$) и остаточным нефтегенерационным потенциалом ($186\text{--}262 \text{ мг УВ/г } \text{C}_{\text{орг}}$). По данным элементного анализа степень преобразованности ОВ этих отложений соответствует главной зоне нефтеобразования ($\text{МК}_1^2\text{--}\text{МК}_2$). Этому не противоречат пиролитические данные: T_{max} составляет $435\text{--}438 \text{ }^\circ\text{C}$, что также отвечает главной зоне нефтеобразования (рис. 3).

Малышевский горизонт представлен 12 обр. верхнетюменской подсвиты и 11 обр. малышевской свиты. Для изученной коллекции содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в среднем составляет $3,44\%$, но в некоторых скважинах образцы пород содержат высокие концентрации ОВ: от $5,66\%$ до $10,60\%$ (Хейгинская-4 (гл. 3598 м), Юбилейная-200 (гл. 3731 м), Медвежья-1001 (гл. 3542 м), Туколандо-Вадинская-320 (гл. 4424 м), Стахановская-910 (гл. 3382 м). Согласно данным элементного анализа керогена содержание углерода в среднем составляет $80,98\%$ при относительно высокой концентрации водорода (в среднем $5,28\%$) (табл. 1). На тригонограмме С–Н–ОНС (рис. 4) образцы малышевского горизонта преимущественно попадают в область террагенного и смешанного ОВ, тогда как атомное отношение $(\text{H/C})_{\text{ат}}$ керогенов варьирует от $0,64$ до $0,98$, изотопный состав углерода – от $-29,45\text{‰}$ до $-23,5\text{‰}$. Кроме того, из тригонограммы элементного состава видно, что ОВ изученных проб главным образом находится на грациях $\text{МК}_1^2\text{--}\text{МК}_2$. Углеводородный потенциал керогенов пород малышевского горизонта меняется от 64 до $260 \text{ мг УВ/г } \text{C}_{\text{орг}}$. Следует подчеркнуть, что по ряду параметров керогены в скважинах с высокой концентрацией ОВ имеют аквагенный или смешанный генезис (скв. Новопортовская-137, гл. 2080 м; Черничная-46, гл. 2957 м;

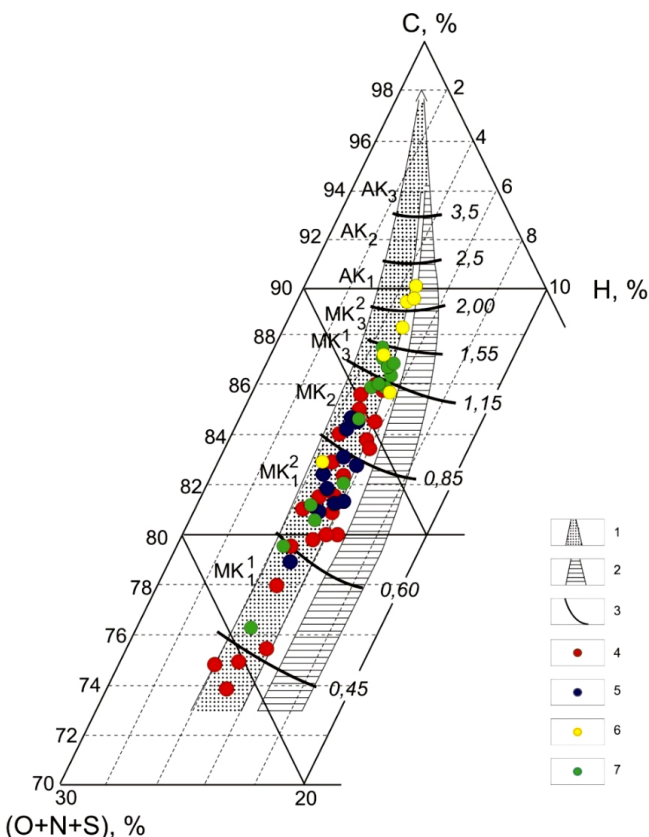


Рис. 4. Элементный состав керогенов ОВ среднеюрских отложений севера Западно-Сибирского бассейна. Горизонты: 4 – малышевский; 5 – леонтьевский; 6 – лайдинский; 7 – вымский. Условные обозначения см. на рис. 2

Хейгинская-4, гл. 3598 м; Медвежья-1001, гл. 3548 м; Стахановская-910, гл. 3382 м). Они отличаются относительно легким изотопным составом углерода (до $-29,4\text{‰}$), имеют высокий генерационный потенциал (до $230 \text{ мг УВ/г } \text{C}_{\text{орг}}$) и T_{max} в среднем $452 \text{ }^\circ\text{C}$. По данным элементного анализа и пироллиза (рис. 3) кероген ОВ этих отложений находится в главной зоне нефтегазообразования.

Верхнеюрские отложения

Васюганский и георгиевский горизонты изучены по 24 обр. пород васюганской, георгиевской, абалакской и сивговской свит (табл. 2). Среднее содержание органического углерода в этой выборке составляет $2,75\%$. Керогены васюганского горизонта по сравнению с керогенами георгиевского характеризуются более низкими значениями водорода и, соответственно, атомного отношения водорода и углерода ($5,19\%$ и $0,76$ против $5,85\%$ и $0,84$), но одинаково высокой концентрацией элементной серы (до $6,95\%$, в среднем $1,65\%$). При этом содержание и пиритной серы в керогенах этой выборки значительно выше, чем в нижележащих горизонтах средней юры (до $35,25\%$, в среднем $14,37\%$). На тригонограмме С–Н–ОНС (рис. 5) образцы васюганской свиты попадают в область террагенного ОВ, георгиевской – аквагенного.

По изотопному составу углерода керогены васюганского и георгиевского горизонтов имеют террагенный и смешанный генезис: $-25,7\text{...--}21,9\text{‰}$ и $-30,7\text{...--}25,0\text{‰}$ соответственно. Остаточный нефтегенерационный потенциал ОВ этих горизонтов варьирует от 46 до $215 \text{ мг УВ/г } \text{C}_{\text{орг}}$.

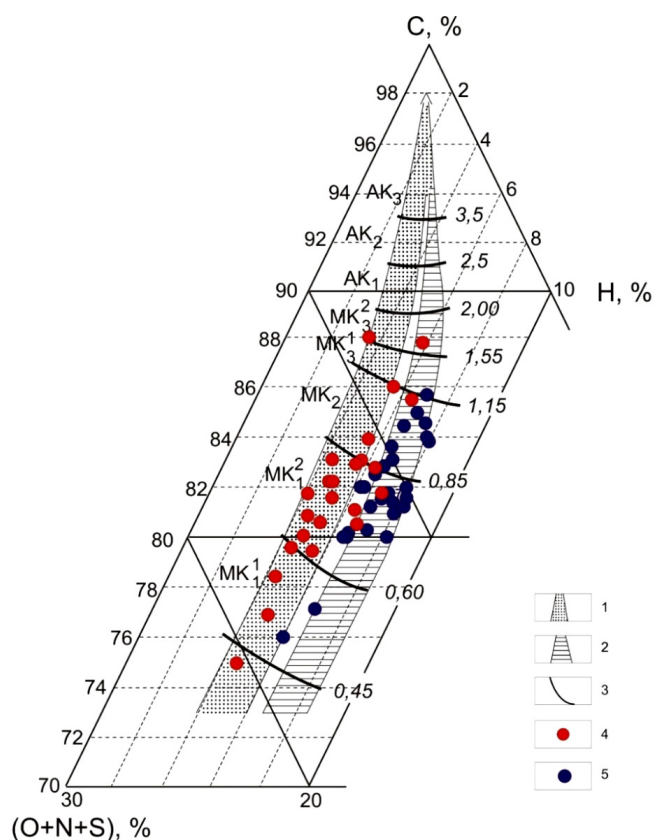


Рис. 5. Элементный состав керогенов ОВ верхнеюрских отложений севера Западно-Сибирского бассейна. Свиты: 4 – васюганская, сиговская, точинская, георгиевская; 5 – баженовская. Остальные условные обозначения см. на рис. 2

При этом значения $T_{\max}$ лежат в интервале 437–448 °С, что отвечает главной зоне нефтеобразования (рис. 3).

Из баженовского горизонта изучено 27 обр. керогенов баженовской свиты (табл. 2). Исследования показали, что НОВ свиты характеризуется высоким содержанием пиритной серы (в среднем 17,90%) и зольностью до 47,20% (Богородская и др., 2005). По данным элементного анализа керогены имеют в среднем невысокое содержание углерода (81,87%) при высоких концентрациях водорода до 8,20% (в среднем 7,18%) и серы до 10,12%

(в среднем 2,60%) (Конторович и др., 2019). Керогены баженовской свиты характеризуются самыми высокими значениями $(H/C)_{ат}$ для всего изученного разреза (в среднем 1,05) и очень легким изотопным составом углерода (в среднем –30,0‰). На тригонограмме C–H–ONS (рис. 5) они попадают в область аквагенного ОВ.

По пиролитическим данным ($T_{\max}$ – 430–448 °С, HI – 107–416 мг УВ/г $C_{орг}$) керогены баженовской свиты имеют высокий нефтегенерационный потенциал и находятся в главной зоне нефтеобразования (рис. 3). Органическое вещество изученной выборки относится к аквагенному типу (II типу) с высоким содержанием $C_{орг}$.

Для установления геохимических особенностей керогена юрских отложений не только по разрезу данные для ряда скважин по атомному отношению $(H/C)_{ат}$ и нефтегенерационному потенциалу HI были представлены на картах изменения катагенеза ОВ этих отложений по площади севера Западной Сибири отдельно для верхне-, средне- и нижнеюрских отложений (Фомин, 2011). Область высокой преобразованности пород верхнеюрских отложений (MK_2) распространяется на севере исследуемой территории (рис. 6). Именно в этой части Западно-Сибирского бассейна отмечено наиболее значительное прогибание юрских пластов (Конторович и др., 2001). В направлении более приподнятых частей бассейна (восточного и западного краев, а также на юг) имеет место снижение степени катагенеза до ПК.

Из рис. 6 следует, что самые высокие значения параметров HI и $H/C_{ат}$ отмечаются в центральной и юго-западной частях изучаемого района: до 256 мг УВ/г $C_{эл}$ и 1,0 в центральной части и до 416 мг УВ/г $C_{орг}$ и 1,2 в юго-западной части. Это объясняется в первую очередь распространением в этих областях баженовской свиты. В областях, где верхнеюрские толщи представлены васюганской свитой и аналогами баженовской свиты (в юго-восточной и северной частях района исследования), нефтегенерационный потенциал керогена пород низкий и меняется в пределах 58–112 мг УВ/г $C_{орг}$. Значения остаточного нефтегенерационного потенциала керогенов также находятся в соответствии с их пониженным значением атомного отношения $(H/C)_{ат}$ (в среднем 0,75) (рис. 6).

Горизонт, свита	$C_{орг}$, %	Сера пиритная, %	C, % на ОВ	H, % на ОВ	S, % на ОВ	O+N+S, % на ОВ	$(H/C)_{ат}$	$(O/C)_{ат}$	$\delta^{13}C$, ‰	$T_{\max}$, °С	HI , мг УВ/г $C_{орг}$
Васюганский горизонт											
Васюганская, сиговская, точинская свиты	2,75	13,7	81,5	5,2	1,6	13,3	0,76	0,16	–23,4	448	90
Абалакская свита	2,23	18,0	83,2	5,6	0,7	11,2	0,81	0,08	–23,2	448	*
Георгиевская свита	2,50	15,0	83,7	5,9	1,9	10,5	0,84	0,06	–27,9	438	88
Среднее по горизонту	2,75	14,4	82,0	5,3	1,6	12,7	0,78	0,14	–24,8		89
Баженовский горизонт											
Баженовская свита	8,37	17,9	81,9	7,2	2,6	11,0	1,05	0,06	–30,0	437	312

Табл. 2. Средние данные анализа керогена верхнеюрских отложений. * Данные отсутствуют

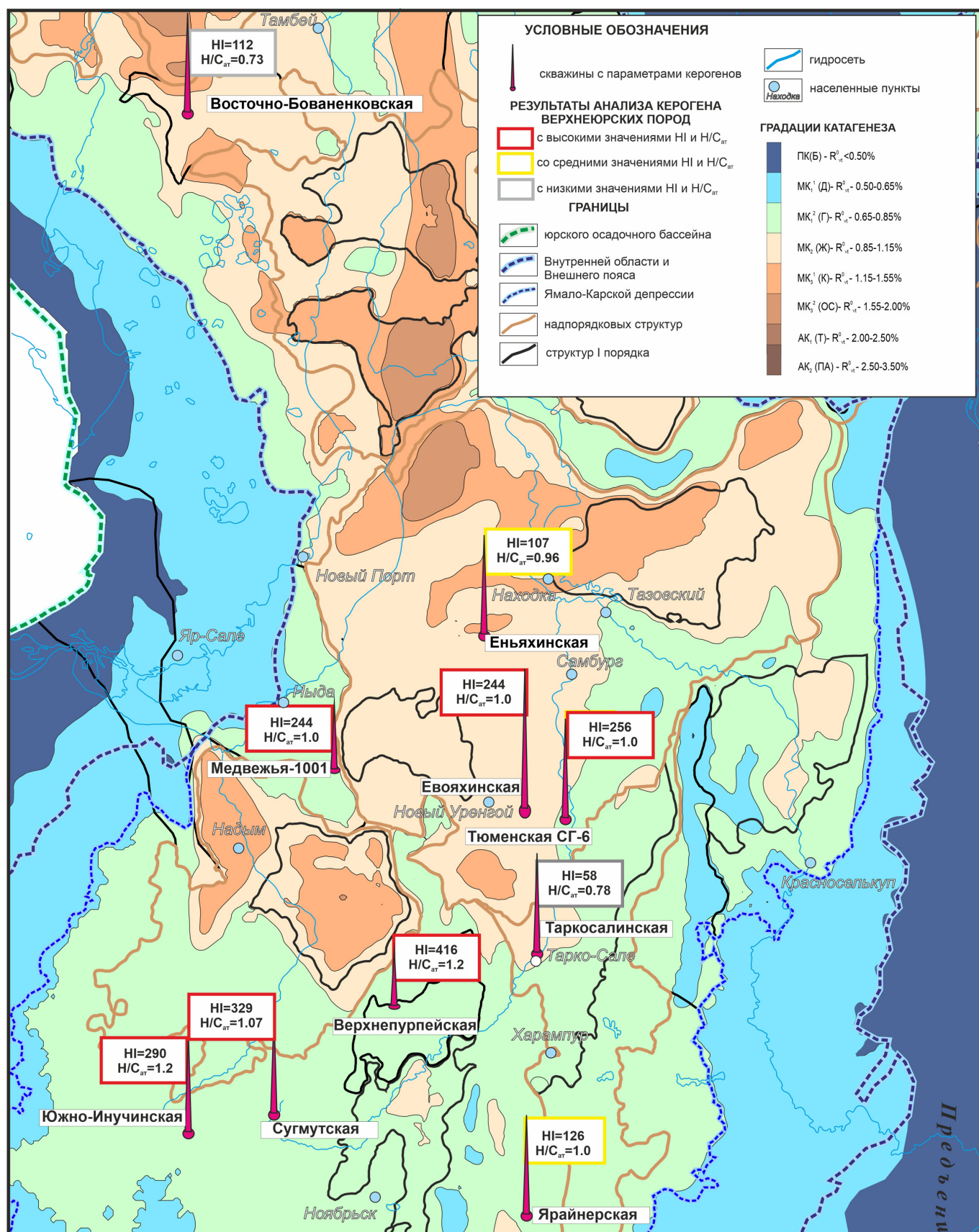


Рис. 6. Схематическая карта изменения нефтегенерационного потенциала (HI) атомного отношения (H/C_{at}) керогена верхнеюрских отложений севера Западной Сибири в соответствии с уровнем зрелости ОБ (Фомин, 2011)

Однако на востоке территории исследования в сивогской свите встречаются образцы керогенов с относительно высокими значениями $H/C_{ат}$, что не противоречит степени катагенеза ОВ этих отложений.

Керогены ОВ среднеюрских отложений по сравнению с верхнеюрскими характеризуются меньшими значениями параметров $H/C_{ат}$, которые повышаются лишь в пределах леонтьевского и малышевского горизонтов до 0,62 и 262 мг УВ/г $C_{орг}$ на северо-востоке (скв. Сузунская-4, гл. 3516 м) и до 0,8 и 260 мг УВ/г $C_{орг}$ на юге территории исследования (Стахановская-910, гл. 3380 м, Южно-Инуцинская-352, гл. 3206 м).

Керогены пород нижнеюрских отложений в центральной и северной частях изучаемой нами территории характеризуются высокой степенью преобразованности, соответствующей этапу апокатагенеза (градации AK_2 – AK_3) (рис. 8).

В южной части района исследования степень преобразованности ОВ нижнеюрских отложений соответствует преимущественно градациям MK_2 – MK_3^{1-2} . Керогены в целом характеризуются еще более низкими значениями параметров $H/C_{ат}$ (в среднем 16 мг УВ/г $C_{орг}$ и 0,66 соответственно) по сравнению с значениями, соответствующими вышележащим горизонтам средней юры, причем наименьшие величины лежат в центре территории (в среднем 46 мг УВ/г $C_{орг}$ и 0,57 соответственно), в областях наибольшего погружения (Конторович и др., 2001). Однако на севере и юге территории имеются участки (в пределах китербютского горизонта в скважине Новопортовской-88, гл. 2478 м, и левинского горизонта в скважинах Восточно-Бованенковская-10, гл. 3490 м, и Западно-Новогодняя-210, гл. 3837 м), где кероген выделяется относительно высокими значениями этих параметров (до 146 мг УВ/г $C_{орг}$ и 0,93 на севере и до 152 мг УВ/г $C_{орг}$ и 0,90 на юге). На востоке территории в районе скв. Черничной-46 в шараповском горизонте также отмечено повышение значений параметров керогенов ($H/C_{ат}$ – 0,78 и 76 мг УВ/г $C_{орг}$ соответственно) (рис. 8).

При сравнении схематических карт катагенеза юрских отложений с нанесенными на них основными параметрами керогенов (рис. 6–8) наблюдается уменьшение значений этих параметров от верхнеюрских отложений к нижнеюрским.

Заключение

В работе на примере изучения пиролитических параметров, элементного и изотопного составов 230 обр. керогенов верхне-, средне- и нижнеюрских отложений севера Западной Сибири показаны важные закономерности изменения геохимических характеристик ОВ в зависимости от его исходного типа с ростом катагенеза.

Верхнеюрские отложения севера Западной Сибири характеризуются значениями $C_{орг}$ от 1,0% в васюганском горизонте и до 19,0% в баженовской свите. Керогены верхнеюрских отложений характеризуются повышенным атомным отношением $H/C_{ат}$ в баженовском горизонте (0,96–1,25) и относительно повышенным – в васюганском (0,66–1,08), содержанием водорода до 8,4 и 7,3% соответственно. В этих толщах присутствует резкое разделение геохимических характеристик керогенов баженовской свиты, содержащей ОВ морского типа, и васюганского

горизонта, содержащего ОВ смешанного или террагенного типа. Изотопный состав углерода керогена васюганского горизонта тяжелый (–25,7...–21,9‰), в георгиевской свите более легкий (–30,0...–25,7‰), в баженовской самый легкий (–31,2...–27,9‰). Нефтегенерационный потенциал ОВ васюганского горизонта невысок и составляет 28–123 мг УВ/г $C_{орг}$, в баженовской свите он высокий и меняется в пределах 109–416 мг УВ/г $C_{орг}$. Органическое вещество верхнеюрских отложений севера Западной Сибири еще не вышло из главной зоны нефтеобразования.

Отложения **среднеюрского** возраста содержат до 4% $C_{орг}$. Образцы керогена характеризуются пониженными значениями водорода (4,3–6,2%) и атомного соотношения $H/C_{ат}$ (до 0,87). Керогены имеют относительно тяжелый изотопный состав углерода (–29,4)–(–24,3) ‰, а нефтегенерационный потенциал ОВ этих пород ниже по сравнению с верхнеюрскими отложениями (56–262 мг УВ/г $C_{орг}$). Степень катагенетической преобразованности для большей части образцов отвечает градациям MK_1 – MK_2 , следовательно, ОВ этих пород находится в главной зоне нефтеобразования и относится к керогену III типа, однако, **в среднеюрском разрезе** присутствуют уровни смешанного ОВ, для которых содержание водорода и изотопный состав углерода составляют до 6,3% и до –29,8‰ соответственно.

Породы **нижнеюрских** отложений севера Западной Сибири характеризуются содержаниями $C_{орг}$ от 0,4% до 5,3%. Нижнеюрские толщи имеют высокую степень катагенетической преобразованности (MK_2 – AK). В керогенах этих отложений понижено содержание водорода (не более 5,3%), атомное отношение $H/C_{ат}$ составляет порядка 0,5–0,8. Изотопный состав углерода керогенов тяжелый (–28,5...–24,0‰), они имеют низкий нефтегенерационный потенциал (14–180 мг УВ/г $C_{орг}$). Все это указывает на террагенное происхождение ОВ этих толщ (III тип керогена). Однако в изученной коллекции имеются единичные образцы керогенов с более высокими показателями содержания водорода (6,1–6,5%) и более легким изотопным составом углерода (–29,9...–29,4‰), они могут быть отнесены к смешанному типу ОВ (II–III).

Таким образом, по данным пироллиза породы верхней юры характеризуются повышенным нефтегенерационным потенциалом, а по мере погружения юрских толщ в зону апокатагенеза снижается нефтегенерационный потенциал пород и растет значение максимальной температуры выхода углеводородов, что в значительной мере характерно для нижнеюрской, а также частично для среднеюрской толщ. Умеренно преобразованные среднеюрские и верхнеюрские толщи находятся в главной зоне нефтеобразования, высокопреобразованные нижнеюрские – в зоне газообразования.

Использование схематических карт катагенетической преобразованности юрских отложений Западной Сибири (в пределах северных территорий) после уточнения геохимических особенностей керогена позволяет, по-видимому, прогнозировать в верхнеюрских отложениях достаточно перспективные земли на нефть, в ниже-среднеюрских – на газ, а в отдельных областях, может быть, и на легкие нефти.

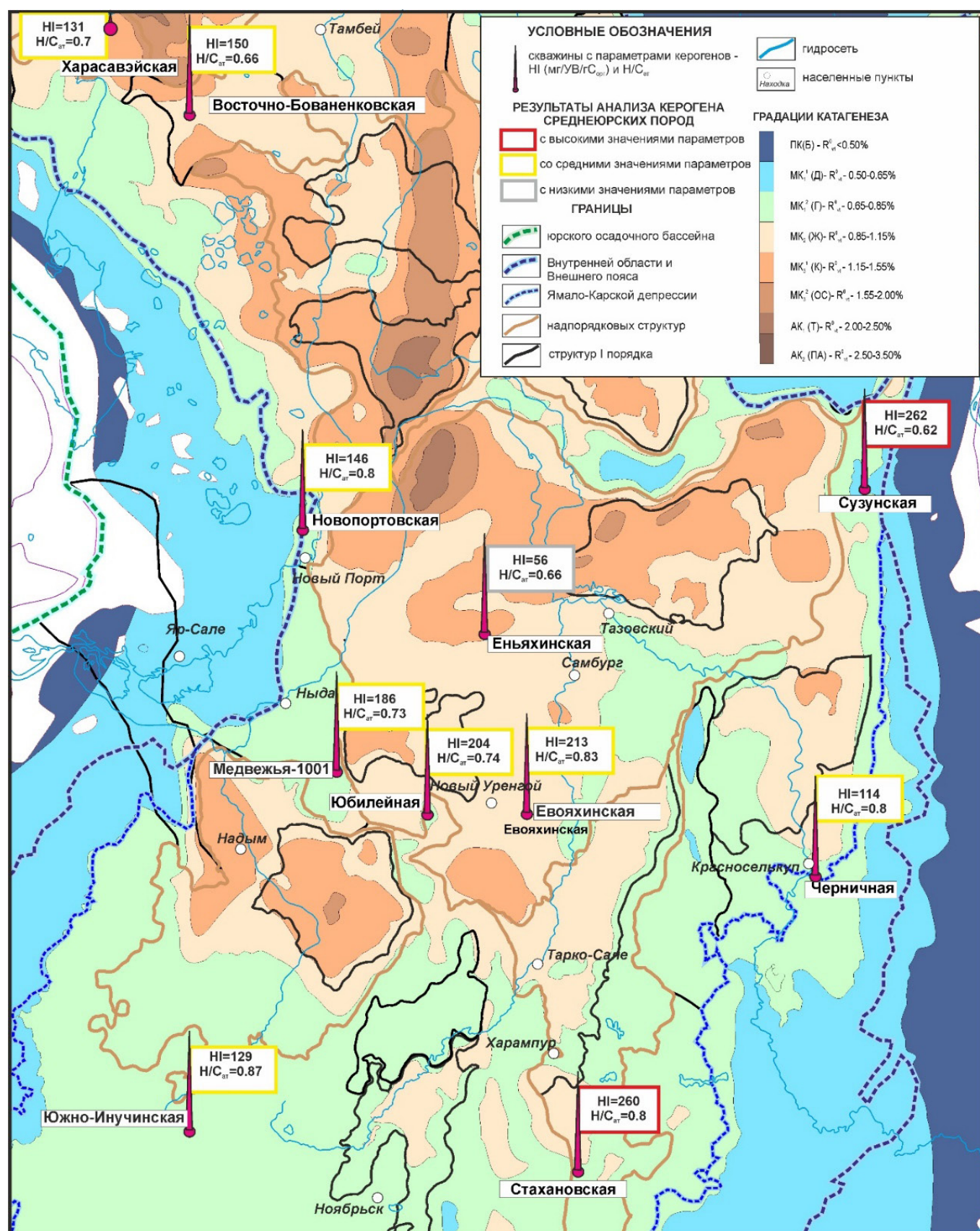


Рис. 7. Схематическая карта изменения нефтегенерационного потенциала (HI) и атомного отношения (H/C_{at}) керогена среднеюрских отложений севера Западной Сибири в соответствии с уровнем зрелости ОБ (Фомин, 2011)

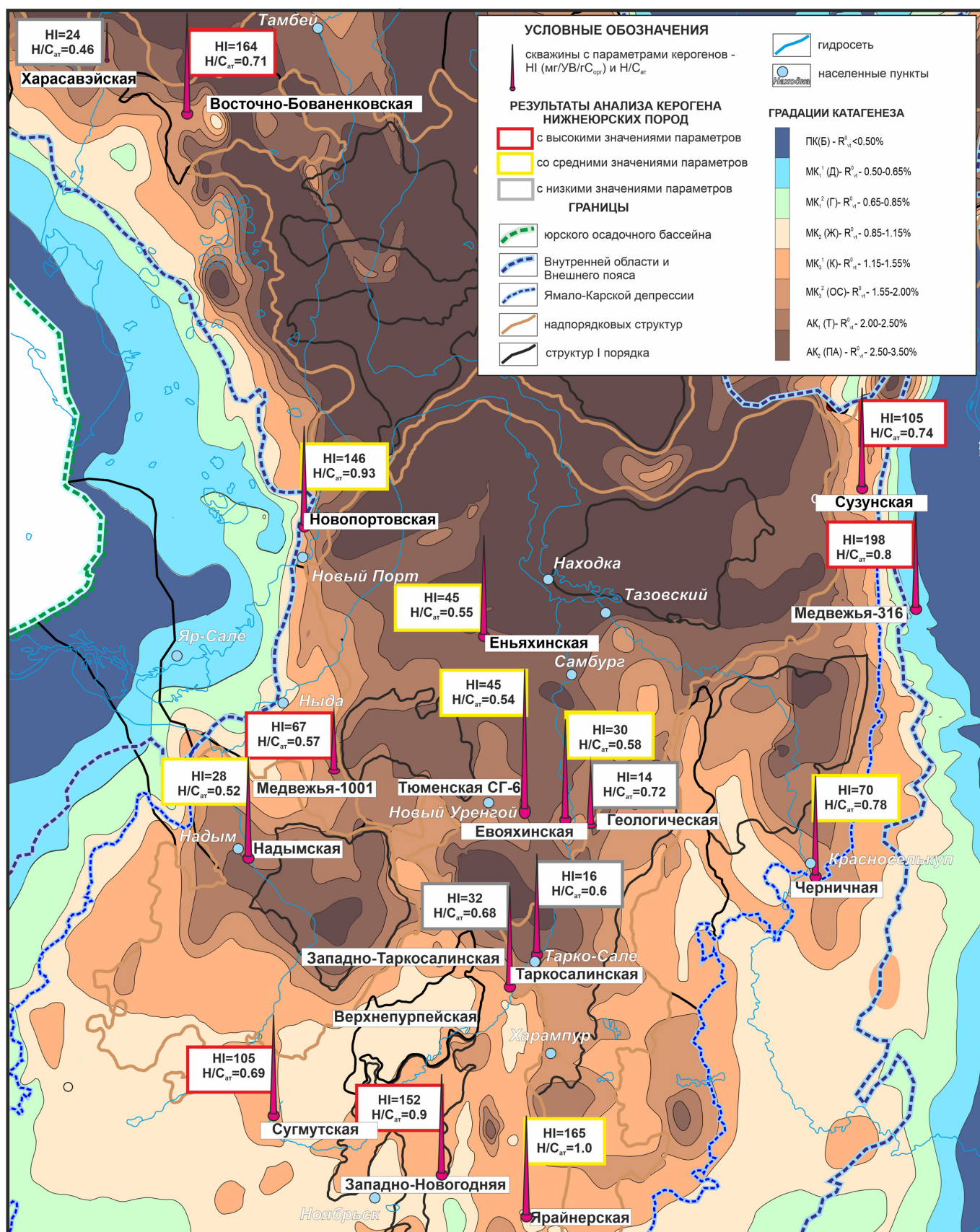


Рис. 8. Схематическая карта изменения нефтегенерационного потенциала (HI) и атомного отношения (H/C_{at}) керогена нижнеюрских отложений севера Западной Сибири в соответствии с уровнем зрелости ОБ (Фомин, 2011)

Финансирование/Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов ФНИ № FWZZ-2022-0011, FWZZ-2022-0012.

Авторы выражают благодарность рецензентам за внимательную проработку статьи и полезные рекомендации, существенно улучшившие работу.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Литература

Богородская Л.И., Конторович А.Э., Ларичев А.И. (2005). Кероген: методы изучения, геохимическая интерпретация. Новосибирск: Филиал «Гео», 255 с.

Борисова Л.С., Фомин А.Н., Ярославцева Е.С. (2020). Геохимическая характеристика состава органического вещества (керогена) юрских отложений северных районов Среднего Приобья. *Георесурсы*, 22(3), с. 21–27. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.21-27>

Борисова Л.С., Фомин А.Н., Ярославцева Е.С. (2022). Трансформация в катагенезе состава и структуры нерастворимого органического вещества глубокопогруженных юрских отложений на севере Западно-Сибирского бассейна. *Петролеумика*, 2(1), с. 72–80. <https://doi.org/10.53392/27823857-2022-2-1-72>

Бушнев Д.А., Бурдельная Н.С., Мокеев М. В. (2019). Результаты ¹³C ЯМР- и ИК-спектроскопии керогена верхнедевонских доманикитов Тимано-Печорского Бассейна. *Геохимия*, 64(11), с. 1146–1157. <https://doi.org/10.31857/S0016-75256411146-1157>

Ван-Кревелен Д.В., Шуер Ж. (1960). Наука об угле. М.: Госгортехиздат, 303 с.

Гончаров И.В., Самойленко В.В., Обласов Н.В., Фадеева С.В., Веклич М.А., Кашапов Р.С., Трушков П.В., Бахтина Е.С. (2016). Типы и катагенез органического вещества баженовской свиты и ее возрастных аналогов. *Нефтяное хозяйство*, (10), с. 20–25.

Конторович А.Э., Богородская Л.И., Борисова Л.С., Бурштейн Л.М., Исмаилов З.Р., Ефимова О.С., Костырева Е.А., Лемина Н.М., Рыжкова С.В., Созинов С.А., Фомин А.Н., Лившиц В.Р. (2019). Геохимия и катагенетические превращения керогена баженовского горизонта. *Геохимия*, 64(6), с. 585–593. <https://doi.org/10.31857/S0016-7525646585-593>

Конторович А.Э. (2004). Очерки теории нафтидогенеза: Избранные статьи. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 545 с.

Конторович А.Э., Богородская Л.И., Голышев С.И. (1985). Распределение стабильных изотопов углерода в седиментах различной генетической природы. *Геология и геофизика*, (7), с. 3–11.

Конторович В.А., Беляев С.Ю., Конторович А.Э., Красавчиков В.О., Конторович А.А., Супруненко О.И. (2001). Тектоническое строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое. *Геология и геофизика*, 42(11-12), с. 1832–1845.

Корчагина Ю.И., Четверикова О.П. (1976). Методы исследования рассеянного органического вещества осадочных пород. М.: Недра, 228 с.

Парпарова Г.М., Неручев С.Г. (1977). Основы генетической классификации рассеянного органического вещества пород. *Геология и геофизика*, (5), с. 45–51.

Суханов А.А., Баженова Т.К., Котельникова Е.Н. (2011). Углеродное вещество керогена сапропелитов: зависимость структурных характеристик от биоценологического типа органического вещества и степени его катагенеза. *Геохимия*, (9), с. 957–970.

Тиссо Б., Вельте Д. (1981) Образование и распространение нефти. М.: Мир, 503 с.

Успенский В.А. (1970). Введение в геохимию нефти. Л.: Недра, 312 с.
Успенский В.А., Инденбом Ф.Б., Чернышева А.С., Сенникова В.Н. (1958). К разработке генетической классификации рассеянного органического вещества. *Тр. ВНИГРИ*. Л.: Гостоптехиздат, Вып. 128: Вопросы образования нефти, с. 221–362.

Фомин А.Н. (2011). Катагенез органического вещества и нефтегазонасыщенность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 331 с.

Espitalie J. (1986) Use of Tmax as a Maturation Index for Different Types of Organic Matter. Comparison with Vitrinite Reflectance. In: Burrus, J., Ed., *Thermal Modelling in Sedimentary Basins*, Editions Technip, Paris, 475–496.

Vandenbroucke M. (2003). Kerogen: from types to models of chemical structure. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*, 58(2), pp. 243–269. <https://doi.org/10.2516/ogst.2003016>

Сведения об авторах

Любовь Сергеевна Борисова – доктор геол.-минерал. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Коптюга, д. 3
e-mail: BorisovaLS@ipgg.sbras.ru

Александр Николаевич Фомин – доктор геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН;
Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Коптюга, д. 3
e-mail: FominAN@ipgg.sbras.ru

Наталья Сергеевна Ким – канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Коптюга, д. 3
e-mail: KimNS@ipgg.sbras.ru

Екатерина Сергеевна Ярославцева – научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Коптюга, д. 3
e-mail: YaroslavtsevaES@ipgg.sbras.ru

Статья поступила в редакцию 15.05.2024;

Принята к публикации 08.10.2024;

Опубликована 20.12.2024

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Geochemistry of Kerogens of Jurassic Deposits of the North of Western Siberia

L.S. Borisova^{1*}, A.N. Fomin^{1,2}, P.S. Kim², E.S. Yaroslavtseva¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

*Corresponding author: Lyubov S. Borisova, e-mail: BorisovaLS@ipgg.sbras.ru

Abstract. This work studies the geochemical features of the composition of kerogens from Jurassic deposits in the north of Western Siberia. The patterns of changes in the pyrolytic and isotopic characteristics of organic matter were established, information was obtained on its genetic type, maturity and residual oil and gas generation potential of organic matter. In the Jurassic deposits, the main oil-producing complexes were identified (Bazhenov horizon), as well as horizons capable of producing predominantly gaseous hydrocarbons due to their high maturity (Malyshevsky, Leontievsky, to a lesser extent Levinsky, Kiterbyutsky).

Keywords: organic matter, kerogen, elemental composition, carbon isotope composition, pyrolysis, Jurassic deposits, north of Western Siberia

Recommended citation: Borisova L.S., Fomin A.N., Kim P.S., Yaroslavtseva E.S. (2024). Geochemistry of Kerogens of Jurassic Deposits of the North of Western Siberia. *Georesursy = Georesources*, 26(4), pp. 20–31. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.4>

Acknowledgement

This work was supported by the FNI projects No. FWZZ-2022-0011, FWZZ-2022-0012.

The authors would like to thank the reviewers for their careful review of the article and useful recommendations, which significantly improved the work.

References

- Bogorodskaya L.I., Kontorovich A.E.H., Larichev A.I. (2005). Kerogen: methods of study, geochemical interpretation. Novosibirsk: GeO branch, 255 p. (In Russ.)
- Borisova L.S., Fomin A.N., Yaroslavtseva E.S. (2022). Transformation in catagenesis of the composition and structure of insoluble organic matter of deeply buried Jurassic deposits in the north of the West Siberian Basin. *Petroleomika*, 62(2), pp. 191–198. (In Russ.) <https://doi.org/10.53392/27823857-2022-2-1-72>
- Borisova L.S., Fomin A.N., Yaroslavtseva E.S. (2020). Geochemistry of the insoluble organic matter (kerogen) components in Jurassic deposits in northern regions of the Latitudinal Ob area. *Georesursy = Georesources*, 22(3), pp. 21–27. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.21-27>
- Bushnev D.A., Burdelnaya N.S., Mokeev M.V. (2019). Results of ¹³C NMR and IR spectroscopy of kerogen from Upper Devonian domonikites of the Timan-Pechora Basin. *Geokhimiya = Geochemistry*, 64(11), pp. 1146–1157. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0016-752564111146-1157>
- Espitalie J. (1986) Use of Tmax as a Maturation Index for Different Types of Organic Matter. Comparison with Vitrinite Reflectance. In: Burrus, J., Ed., *Thermal Modelling in Sedimentary Basins*, Editions Technip, Paris, 475–496.
- Fomin A.N. (2011). Catagenesis of Organic Matter and Oil and Gas Potential of Mesozoic and Paleozoic Deposits of the West Siberian Megabasin. Novosibirsk: INGG SO RAN, 331 p. (In Russ.)
- Goncharov I.V., Samojlenko V.V., Oblasov N.V., Fadeeva S.V., Veklich M.A., Kashapov R.S., Trushkov P.V., Bakhtina E.S. (2016). Types and catagenesis of organic matter of the Bazhenov Formation and its age analogues. *Neftyanoe khozyajstvo = Oil industry*, (10), pp. 20–25. (In Russ.)
- Kontorovich A.E., Bogorodskaya L.I., Golyshev S.I. (1985). Distribution of Stable Carbon Isotopes in Sediments of Different Genetic Nature]. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*, (7), pp. 3–11. (In Russ.)
- Kontorovich A.E. (2004). Essays on the Theory of Naftidogenesis: Selected Articles. Novosibirsk: SO RAN, 545 p. (In Russ.)
- Kontorovich A.E.H., Bogorodskaya L.I., Borisova L.S., Burshtejn L.M., Ismagilov Z.R., Efimova O.S., Kostyreva E.A., Lemina N.M., Ryzhkova S.V., Sozinov S.A., Fomin A.N. (2019). Geochemistry and catagenetic transformations of kerogen of the Bazhenov horizon. *Geokhimiya = Geochemistry*, 64(6), pp. 585–593. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0016-7525646585-593>
- Kontorovich V.A., Belyaev S.YU., Kontorovich A.E.H., Krasavchikov V.O., Kontorovich A.A., Suprunenko O.I. (2001). Tectonic structure and history of the West Siberian geosyncline development in the Mesozoic and Cenozoic. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*, 42(11–12), pp. 1832–1845. (In Russ.)
- Korchagina Yu.I., Chetverikova O.P. (1976). Methods for studying dispersed organic matter of sedimentary rocks. Moscow: Nedra, 157 p. (In Russ.)
- Parparova G.M., Neruchev S.G. (1977). Fundamentals of genetic classification of dispersed organic matter of rocks. *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*, (5), pp. 45–51. (In Russ.)
- Sukhanov A.A., Bazhenova T.K., Kotelnikova E.N. (2011). Carbon matter of sapropelite kerogen: dependence of structural characteristics on the biocenotic type of organic matter and the degree of its catagenesis. *Geokhimiya = Geochemistry*, (9), pp. 957–970. (In Russ.)
- Tissot B.P., Welte D.H. (1978). Petroleum formation and occurrence. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 538 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96446-6>
- Uspenskii V.A., Indenbom F.B., Chernysheva A.S., Sennikova V.N. (1958). On the development of a genetic classification of dispersed organic matter. *Tr. VNIIGRI*. Leningrad: Gostoptekhizdat, v. 128, pp. 221–362. (In Russ.)
- Uspenskii V.A. (1970). Introduction to Oil Geochemistry. Leningrad: Nedra, 307 p. (In Russ.)
- Vandenbroucke M. (2003). Kerogen: from types to models of chemical structure. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*, 58(2), pp. 243–269. <https://doi.org/10.2516/ogst:2003016>
- Van-Krevelen D.V., Shuer ZH. (1960). Science of coal. Moscow: Gosgortekhizdat, 303 p. (In Russ.)

About the Authors

Lyubov S. Borisova – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Leading Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

3 Ak. Koptuyug av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
e-mail: BorisovaLS@ipgg.sbras.ru

Aleksandr N. Fomin – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Chief Researcher at the Laboratory of Oil and Gas Geochemistry, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Novosibirsk State University

3 Ak. Koptuyug av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
e-mail: FominAN@ipgg.sbras.ru

Natal'ya S. Kim – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Novosibirsk State University

3 Ak. Koptuyug av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
e-mail: KimNS@ipgg.sbras.ru

Ekaterina S. Yaroslavtseva – Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

3 Ak. Koptuyug av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
e-mail: YaroslavtsevaES@ipgg.sbras.ru

Manuscript received 15 May 2024;

Accepted 8 October 2024; Published 20 December 2024

© 2024 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)