

УДК 550.4:553.983+551.762.3(571.16)

ГЕОХИМИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО БОРТА НЮРОЛЬСКОЙ МЕГАВПАДИНЫ (ЮГО-ВОСТОК ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

И.С. Сотнич¹, Е.А. Костырева¹

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3, Российская Федерация,*

В работе представлены результаты детальных пиролитических и битуминологических исследований органического вещества баженовской свиты Томской области, являющихся частью комплексного (литологического, геохимического, петрофизического) изучения баженовской свиты по разработанной в ИНГГ СО РАН методике для высокообогащенных органическим веществом пород. Показано, что с ростом зрелости органического вещества от ПК₃ до МК₂ в породах увеличивается содержание «свободной микро нефти», происходят направленные изменения в составе битумоидов (извлекаемых хлороформом экстрактов) из открытых и закрытых пор как на групповом, так и на молекулярном уровне. Установлено, что различие в составе битумоидов открытых и закрытых пор отмечается даже в «незрелом» органическом веществе, увеличиваясь по мере вхождения в главную фазу нефтеобразования.

Ключевые слова: органическое вещество, битумоиды, углеводороды-биомаркеры, пироллиз, катагенез, зрелость, баженовская свита, Западная Сибирь.

GEOCHEMISTRY OF ORGANIC MATTER IN THE BAZHENOV FORMATION ON THE NORTH-EASTERN SIDE OF THE NYUROL MEGA-DEPRESSION (SOUTH-EAST OF WESTERN SIBERIA)

I.S. Sotnich¹, E.A. Kostyрева¹

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Koptug ave., 3, Russian Federation*

The article presents the results of detailed organic geochemistry studies being part of a comprehensive (lithological, geochemical, petrophysical) study of the Bazhenov Formation in the Tomsk Region using the IPGG SBRAS methodology for organic matter-rich source rock. As the thermal maturity increases from PK₃ to MK₂, the content of 'free micro oil' in source rock's pore spaces has been observed to increase. In the same time, there are modifications to the composition of bitumoids (chloroform source rock extracts) from open and closed pores at both the group and molecular levels. Even 'immature' organic matter has been establish to show a difference in bitumoids composition from open and closed pores, which increases as it enters the main phase of oil formation.

Keywords: organic matter, bitumoids, hydrocarbon biomarkers, pyrolysis, catagenesis, maturity, Bazhenov Formation, Western Siberia.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение состава баженовской свиты Западной Сибири, начатое с шестидесятых годов прошлого столетия Ф.Г. Гурами, Н.П. Запиваловым, А.Э. Конторовичем, И.И. Нестеровым, А.С. Фомичевым и др. [Гурами, 1959, 1961; Запивалов, 1963; Конторович и др., 1967; Нестеров, 1979; Нестеров, Ушатинский, 1986; Баженовский горизонт..., 1986; Зубков и др., 1986; и др.], в связи с

большим интересом к сланцевой нефти, продолжается и до настоящего времени во многих научных и научно-производственных организациях нашей страны (ВНИГНИ, ИНГГ СО РАН, ЗапСибГЦ, МГУ, НАЦ РН им. В.И. Шпильмана, ТомскНИПИнефть и др.). Детальные комплексные исследования баженовской свиты проводятся в последние годы на современном оборудовании методами органической геохимии в тесной взаимосвязи с литологами, петрофизиками, геофизиками [Гончаров и др., 2004, 2013; Дахнова и др., 2007; Самойленко, 2011; Балущкина и др., 2015; Козлова и др., 2015; Конторович и др., 2018а,б; Костырева, Сотнич, 2017; Зубков и др., 2018; Волков, 2019; Скворцов и др., 2019; Олейник, Оксенойд, 2020; Тихонова и др., 2021; Сотнич и др., 2023; и др.]. Тем не менее, по-прежнему актуальным остается расширение представлений о механизме и условиях формирования в ходе естественной термической эволюции интервалов баженовской свиты, обладающих коллекторскими свойствами, из которых могут быть получены промышленные притоки нефти. Представляют интерес и геохимические исследования состава нафтидов при их перераспределении в поровом пространстве пород баженовской свиты.

В последние годы в ИНГГ СО РАН под руководством академика А.Э. Конторовича была разработана комплексная программа по изучению баженовской свиты (единый отбор коллекции образцов для всего спектра литологических, геохимических, петрофизических исследований) [Конторович и др., 2018], составной частью которой является методика исследования хлороформенных битумоидов из открытого и закрытого порового пространства пород. В основу методики положена гипотеза, высказанная Белецкой С.В. [Белецкая, 1972, 1990] о том, что поровое пространство пород баженовской свиты запечатано асфальтенами. В терминологии Н.Б. Вассоевича [Вассоевич, 1958; 1959], экстракты, извлеченные из открытых пор, соответствуют параавтохтонным и аллохтонным (миграционным) битумоидам, т.е. нафтидам, перешедшим из сорбированного состояния в самостоятельную фазу. Параавтохтонные битумоиды, согласно А.Э. Конторовичу, в данном случае, являются «начальной стадией образования аллохтонного битумоида, когда битумоид из сорбированного состояния перешел в фазовообособленное, но его перемещение произошло на незначительное расстояние внутри нефтепроизводящей толщи, в частном случае – до ближайших открытых или закрытых пор, или в образовавшиеся в месте генерации битумоида вторичные поры внутри нефтепроизводящей толщи пород» [Конторович и др., 2018]. Экстракты закрытых пор – автохтонные битумоиды, которые «обычно находятся в абсорбированном состоянии в минеральной матрице породы и/или в рассеянном в ней органическом веществе» [Конторович и др., 2018] и высвобождаются лишь после механического разрушения породы. В настоящее время представленная методика апробирована на материалах центральных районов Западной Сибири, в частности, на образцах баженовской свиты Северо-Сургутского района и материалах отдельных скважин [Костырева, Сотнич, 2017; Замирайлова и др., 2019; Эдер и др., 2020; Сотнич, Костырева, 2021; Рыжкова и др., 2022; Сотнич и др., 2023]. Согласно полученным данным, аллохтонные и параавтохтонные битумоиды отличаются от автохтонных как по групповому, так и по молекулярному составу, и, как правило, составляют в среднем лишь 20 % от общей концентрации нафтидов в породе. Различие в составе битумоидов, извлекаемых из открытого и закрытого порового пространства пород баженовской свиты, отмечают и другие исследователи [Тихонова и др., 2021].

Цель данной работы – на основе комплексного анализа результатов геохимических исследований баженовской свиты выявить особенности состава и строения органического вещества баженовской свиты юго-восточного района Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования представленной работы является органическое вещество баженовской свиты Арчинской, Западно-Квензерской, Пельгинской, Среднеюлжавской и Южно-Майской площадей, расположенных в юго-восточной части Западной Сибири (Томская область).



Извлечение хлороформенных экстрактов из баженовской свиты проводилось последовательно [Конторович и др., 2018]: на первом этапе хлороформом при комнатной температуре экстрагировались свободные аллохтонные битумоиды («свободная микроневть») из открытого порового пространства пород образцов регулярной формы (ОРФ – цилиндры 30*30 мм, кубики 20*20 мм) и образцов грубого дробления (ОГД, 4-5 мм); на втором этапе проэкстрагированные ОГД дробились до 0,25 мм (образцы мелкого дробления – ОМД) и хлороформом извлекались автохтонные битумоиды из закрытого порового пространства пород. Коллекция для исследования включала 349 проб битумоидов, в том числе 117 ОГД, 117 ОМД и 115 ОРФ.

После экстракции в битумоидах методом колоночной (адсорбционно-жидкостной) хроматографии определялся их групповой состав. Далее насыщенная фракция битумоидов анализировалась методами газожидкостной хроматографии (газовый хроматограф AgilentTechnologies 7820 GC System с кварцевой капиллярной колонкой HP-5) и хромато-масс-спектрометрии (газовый хроматограф AgilentTechnologies 6890 с масс-селективным детектором MSD 5973N) [Сотнич, Костырева, 2021; Сотнич и др., 2023].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание $C_{орг}$ и нефтегенерационные характеристики ОВ. Баженовская свита Нюрольской впадины характеризуется высоким содержанием органического вещества (ОВ) – значения $C_{орг}$ достигают 17,9 % на породу (в среднем, 9,6 %). В большей части образцов $C_{орг}$ варьирует в пределах – 6-12 % на породу.

Наиболее высокими концентрациями $C_{орг}$ характеризуется баженовская свита из разреза Южно-Майской скважины – значения $C_{орг}$ до 15,6 % на породу при среднем 11,7 %. В Арчинской и Пельгинских образцах $C_{орг}$, как правило, изменяется от 8 до 17,5 % на породу, в среднем, 10,9 % и 10,5 % соответственно. В образцах Среднеюлжавской скважины значения $C_{орг}$ достигают 17,9 % на породу, но в большей части образцов варьируют в пределах 6 - 12 %, в среднем, 8,9 %. В баженовской свите Западно-Квензерской скважины концентрации $C_{орг}$ не превышают 11,6 % на породу, в среднем, 8,4 % (табл. 1).

Таблица 1. Содержание $C_{орг}$ и пиролизические характеристики органического вещества баженовской свиты Нюрольской мегавпадины

| Скважина (кол-во образцов) | Значения геохимических показателей* | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| | $C_{орг}$, в % на породу | S_1 , мг УВ/г породы | S_2 , мг УВ/г породы | HI, мг УВ/г $C_{орг}$ | T_{max} , °C |
| Западно-Квензерская-4 (24) | 3,8-11,6 / 8,4 | 4,2-8,6 / 7,2 | 16,0 - 40,8 / 32,5 | 272-402 / 356 | 440-447 / 443 |
| Пельгинская-2 (21) | 4,1-14,1 / 10,5 | 3,3-6,1 / 5,0 | 35,3 - 83,0 / 63,6 | 454-632 / 567 | 426-428 / 426 |
| Среднеюлжавская-10 (21) | 4,9-17,9 / 8,9 | 1,2-6,7 / 3,4 | 28,5 - 125,8 / 54,2 | 520-704 / 583 | 424-428 / 426 |
| Южно-Майская-413 (37) | 6,5-15,6 / 11,7 | 1,1-4,2 / 3,0 | 35,2 - 88,0 / 68,4 | 511-632 / 585 | 420-426 / 423 |
| Арчинская-47 (74) | 5,1-17,5 / 10,9 | 0,9-5,4 / 3,3 | 27,0 - 128,6 / 73,9 | 406-755 / 650 | 420-424 / 422 |

Примечание. Указан разброс значений: минимум-максимум /среднее.

По разрезу баженовской свиты ОВ распределено неравномерно: высокие значения $C_{орг}$ отмечаются в микститах кероген-кремнисто-глинистых и кероген-глинисто-кремнистых, которые слагают практически весь разрез баженовской свиты (пачки 2-4 согласно Эдер и др., 2022).

Нефтегенерационный потенциал ОВ баженовской свиты Нюрольской впадины в изученных скважинах (за исключением Западно-Квензерской) не реализован (см. табл. 1). Значения водородного индекса HI, как правило, изменяются в пределах 500-700 мг УВ/г $C_{орг}$ (в Арчинской до 755 мг УВ/г

$C_{орг}$). На Западно-Квензерской площади значения H_I в большинстве образцов (83 % коллекции) – 300-400 мг УВ/г $C_{орг}$. Пиролитический показатель S_1 в 78 % коллекции Западно-Квензерских образцов находится в пределах 6-9 мг УВ/г породы, S_2 – не превышает 50 мг УВ/г породы. В остальных образцах значения S_1 , как правило (90 % коллекции), менее 5 мг УВ/г породы, значения S_2 , наоборот, высокие – до 130 мг УВ/г породы, в большинстве образцов (68 % коллекции) ≥ 50 мг УВ/г породы.

Органическое вещество на территории исследования согласно пиролитическому показателю T_{max} (420-447°C) находится на стадиях катагенеза (по шкале А.Э. Конторовича) от ПК₃ (Арчинская) до МК₂ (Западно-Квензерская) (табл. 1). Значения отражательной способности витринита ($R_{v, \lambda}^0$, %), определенные А.Н. Фоминым в единичных образцах путем пересчета по псевдовитриниту [Фомин, 2011], изменяются от 0,61-0,65 в образцах Арчинской, Южно-Майской, Среднеюлжавской, Пельгинской скважин до 0,76-0,78 в Западно-Квензерских образцах, что соответствует грациям катагенеза МК₁¹ и МК₁² соответственно [Фомин, 2011].

Далее по тексту органическое вещество баженовской свиты образцов из Арчинской, Южно-Майской, Среднеюлжавской, Пельгинской скважин будет условно называться «незрелое/слабозрелое», из Западно-Квензерской скважины – «зрелое».

Содержание и групповой состав хлороформенных битумоидов. Содержание хлороформенных битумоидов ($B_{хл}$) в баженовской свите Нюрольской мегавпадины напрямую зависит от степени зрелости органического вещества. Так в «незрелом» органическом веществе из пород Среднеюлжавской, Пельгинской, Арчинской и Южно-Майской скважин концентрация битумоидов – низкая – в основном, не превышает 1 % на породу (табл. 2). Битумоиды находятся преимущественно в закрытом поровом пространстве пород: в более 80 % коллекции значения выходов $B_{хл}^{ОМД}$ изменяются от 0,1 до 0,75 % на породу (рис. 2а). В открытых порах ($B_{хл}^{ОРФ}$, $B_{хл}^{ОГД}$) содержание битумоидов на порядок ниже – от 0,01 до 0,1 % на породу. В «зрелом» органическом веществе из пород Западно-Квензерской скважины концентрации битумоидов ($B_{хл}^{общ} = B_{хл}^{ОГД} + B_{хл}^{ОМД}$) достигают 2,9 % на породу, при этом, в открытом поровом пространстве пород ($B_{хл}^{ОГД}$) – в основном, 0,5-1,25 % на породу, в закрытых порах ($B_{хл}^{ОМД}$) – 1,25-1,7 % (рис. 2б). Выхода битумоидов, извлеченных из открытого порового пространства ОРФ ($B_{хл}^{ОРФ}$), могут достигать высоких значений (до 2,3 %, см. табл. 2), но, в основном, ближе к значениям $B_{хл}^{ОГД}$ (см. рис. 2б).

Таблица 2. Содержание и групповой состав хлороформенных битумоидов баженовской свиты Нюрольской мегавпадины

| Скважина | Проба | $B_{хл}$, в % на породу | Групповой состав, в % на битумоид | | |
|-----------------------|-------|--------------------------|-----------------------------------|-------|------------|
| | | | углеводороды | смолы | асфальтены |
| Западно-Квензерская-4 | орф | 0,5-2,3 / 1,1 | 70-80 | 15-30 | < 5 |
| | огд | 0,3-1,7 / 1,0 | 70-80 | 20-25 | < 5 |
| | омд | 0,6-1,7 / 1,2 | 30-60 | 30-50 | < 30 |
| Пельгинская-2 | орф | 0,01-0,1 / 0,04 | 40-50 | 50-60 | не опр. |
| | огд | 0,01-0,2 / 0,07 | 40-55 | 40-50 | < 10 |
| | омд | 0,1-0,8 / 0,6 | 35-45 | 50-60 | < 20 |
| Среднеюлжавская-10 | орф | 0,01-0,2 / 0,06 | 35-50 | 50-80 | не опр. |
| | огд | 0,01-0,4 / 0,09 | 40-55 | 40-50 | < 10 |
| | омд | 0,1-0,6 / 0,4 | 35-45 | 45-60 | < 20 |
| Южно-Майская-413 | орф | 0,01-0,6 / 0,08 | 50-65 | 35-45 | < 5 |
| | огд | 0,01-0,2 / 0,04 | 50-70 | 30-45 | < 6 |
| | омд | 0,1-0,9 / 0,5 | 40-55 | 40-50 | < 10 |
| Арчинская-47 | орф | 0,1-0,9 / 0,3 | 50-80 | 30-50 | < 6 |
| | огд | 0,01-0,1 / 0,01 | 50-80 | 30-45 | < 6 |
| | омд | 0,3-1,8 / 0,6 | 40-60 | 40-55 | < 10 |

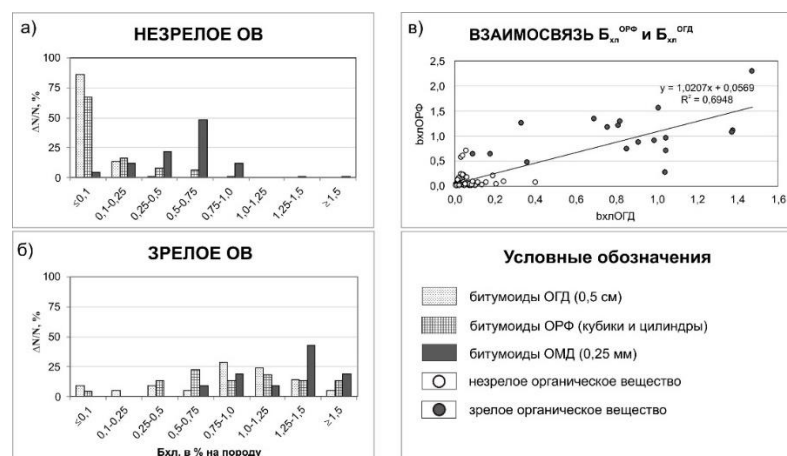


Рис. 2. Содержание хлороформных битумоидов в открытом (ОРФ, ОГД) и закрытом (ОМД) поровом пространстве пород баженовской свиты Нюрольской мегавападины: а, б – гистограммы распределения; в – зависимость между содержанием битумоидов в образцах регулярной формы (ОРФ) и в образцах грубого дробления (ОГД).

Сравнительный анализ выходов битумоидов, извлеченных из порового пространства образцов ОГД и ОРФ, показал, что их значения, в целом, сопоставимы (рис. 2в), зависимость $B_{\text{хл}}^{\text{ОРФ}}$ от $B_{\text{хл}}^{\text{ОГД}}$ – линейная ($R^2 = 0,7$).

Битумоиды, извлеченные из открытого (ОРФ, ОГД) и закрытого (ОМД) порового пространства пород, отличаются между собой по своему групповому составу (табл. 2, рис. 3).

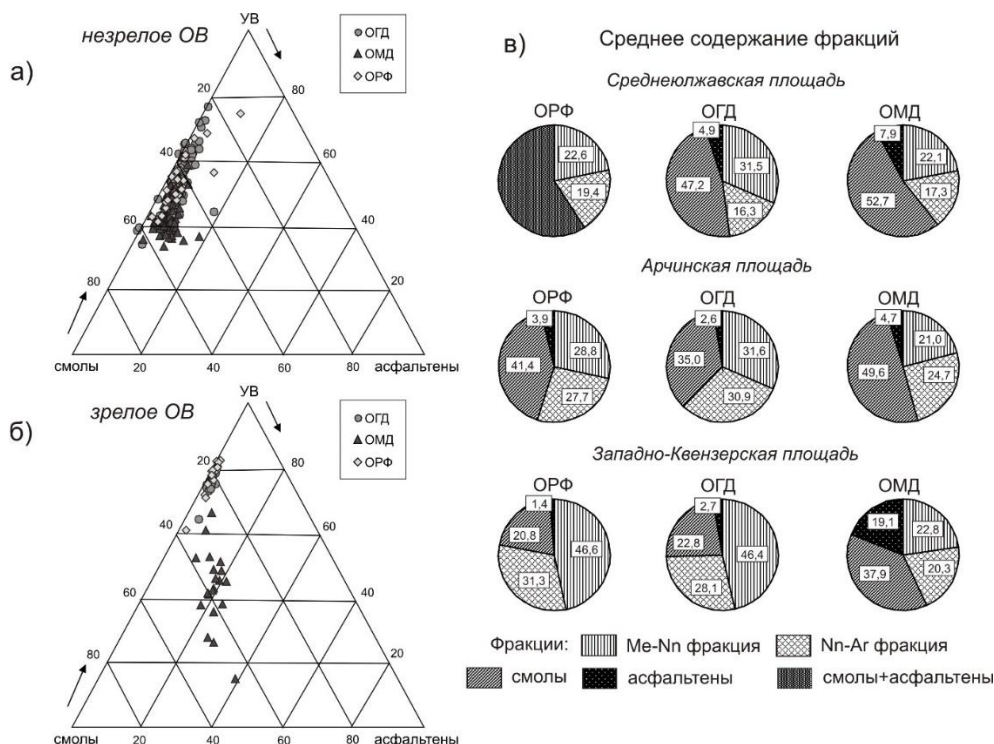


Рис. 3. Групповой состав битумоидов баженовской свиты Нюрольской мегавападины (в % на битумоид): а, б – тригонограммы распределения углеводов, смол и асфальтенов, в – циклограммы средних содержаний метано-нафтеновой (Me-Nn), нафтеново-ароматической (Nn-Ar) фракций, смол и асфальтенов.

Наиболее явно отличия наблюдаются в образцах Западно-Квензерской скважины (табл. 2): в составе битумоидов отмечается преобладание углеводородной составляющей – 70-80 % в битумоидах ОРФ и ОГД (в среднем, 77,9 и 74,5 % соответственно) и 30-60 % в битумоидах ОМД (в среднем, 43,1 %). Среди углеводородов насыщенные (Me-Nn фракция) доминируют над ароматическими (Nn-Ar фракция) в процентном соотношении, в среднем, 60:40 в битумоидах ОРФ и ОГД и 52:48 в битумоидах ОМД (рис. 3 б,в). Содержание смол в битумоидах открытых пор - преимущественно от 15 до 30 % (в среднем, 20,8 и 22,8 %), асфальтенов <5 % (в среднем, 1,4 и 2,7 %). В битумоидах закрытых пор концентрация смол варьирует от 30 до 50 % (в среднем, 37,9 %), содержание асфальтенов может достигать 30 % (единичный образец до 40 %).

В образцах Южно-Майской и Арчинской скважин концентрация УВ в битумоидах открытых пор изменяется от 50 до 70 % (в единичных образцах до 80 %), содержание смол – 30-45 % (в битумоидах ОРФ Арчинской скважины – до 50 %), асфальтенов – до 6 %, в битумоидах закрытых пор концентрации углеводородов – 40-60 % на битумоид, смол – 40-55 %, асфальтенов - до 10 % (табл. 2, рис. 3в). Среди углеводородов в этих образцах могут преобладать как насыщенные, так и ароматические, отношение Me-Nn/Nn-Ar, изменяется от 0,5 до 3.

Содержание УВ в битумоидах Пельгинской и Среднеюлжавской скважин понижено как в экстрактах из открытого, так и закрытого порового пространства пород: 35-55 % в пробах ОРФ и ОГД, 35-45 % в ОМД (табл. 2, рис. 3в). Концентрация смолистой составляющей в этих образцах – 40-50 % в ОГД, 45-60 % в ОМД, содержание асфальтенов – до 10 % и 20 % соответственно. В пробах ОРФ выделить асфальтеновую часть не удалось, суммарное содержание смол и асфальтенов в них – 50-60 % (в Среднеюлжавских образцах до 80 %). Среди углеводородов в битумоидах из ОРФ и ОГД преобладают насыщенные – Me-Nn/Nn-Ar >1; в битумоидах ОМД отношение Me-Nn/Nn-Ar изменяется от 0,6 до 2.

Углеводородный состав битумоидов. Характер распределения нормальных алканов во всех битумоидах одномодальный с максимумом на н-С₁₆-н-С₁₉ (рис. 4а). Значения отношения н-С₂₇ к н-С₁₇ ≤ 0,5, при этом, в битумоидах открытых пор значения, как правило, ниже по сравнению с битумоидами закрытых пор. Так, в образцах Среднеюлжавской, Пельгинской и Западно-Квензерской скважин, значения н-С₂₇/н-С₁₇ в экстрактах ОМД варьируют в пределах 0,1-0,3, 0,1-0,5 и 0,2-0,4 соответственно, а в экстрактах ОГД это отношение равно 0,1-0,2. В образцах Арчинской площади отношение н-С₂₇/н-С₁₇ изменяется преимущественно от 0,2 до 0,4 как в битумоидах открытых, так и закрытых пор, в образцах Южно-Майской площади – 0,2-0,3 в ОМД и 0,1-0,3 в ОГД.

Соотношение изопреноидных алканов пристан к фитану (Pr/Ph) варьирует – от 0,9 до 1,5. В Пельгинских и Среднеюлжавских битумоидах значения Pr/Ph, как правило, попадают в интервал значений 1,1-1,4. В образцах Арчинской скважины значения Pr/Ph преимущественно 1,3-1,5 (в экстрактах из ОРФ значения несколько занижены – 1,0-1,4). В битумоидах Южно-Майской скважины значения Pr/Ph изменяются от 0,9 до 1,5, в образцах Западно-Квензерской скважины – в основном, от 1,0 до 1,3.

Коэффициент CPI в битумоидах варьирует от 0,9 до 1,3. В битумоидах из ОРФ, ОГД и ОМД Западно-Квензерской скважины CPI, в основном, 0,94-1,02, в образцах Пельгинской скважины – 0,94-1,1, в Арчинской, Южно-Майской и Среднеюлжавской – преимущественно 0,98-1,18 (в единичных образцах до 1,3).

В составе стеранов C₂₇-C₂₉ (рис. 4б) во всех пробах отмечается преобладание холестерина C₂₇ (до 43 % от суммы стеранов) над метил- (C₂₈) и этил- (C₂₉) холестеранами, находящихся в близких концентрациях (рис. 5а). В целом для всей изучаемой коллекции битумоидов стераны C₂₇:C₂₈:C₂₉ содержатся в пропорции, в среднем, 43:27:30. Значения отношения стеранов C₂₉ к C₂₇ ≤ 1 (рис. 5б): в Западно-Квензерских образцах – 0,5-0,7, в Южно-Майских – 0,5-0,8, в Арчинских – 0,6-0,9, в Пельгинских и Среднеюлжавских – 0,6-1.

Отношение (стераны+прегнаны)/прегнаны в изученной коллекции битумоидов изменяется от 2,3 до 10,7, значения увеличиваются в ряду: Западно-Квензерская → Южно-Майская → Арчинская → Пельгинская → Среднеюлжавская скважины. Средние значения этого показателя в образцах ОРФ 3,2; 5,4; 7,2; 8,0; 9,8 соответственно, в ОГД – 2,5; 6,0; 6,2; 6,4; 8,1, в ОМД – 2,8; 6,4; 7,3; 7,4; 8,1.

Соотношения изомеров этилхолестанов (C_{29}), такие как $\beta\beta(20S+20R)/\alpha\alpha 20R$ и $\alpha\alpha 20S/\alpha\alpha 20R$, существенно отличаются в «зрелом» и «незрелом» органическом веществе изучаемой коллекции. Так, для образцов Западно-Квензерской скважины значения отношения $\beta\beta(20S+20R)/\alpha\alpha 20R$ C_{29} во всех пробах ≥ 3 , а $\alpha\alpha 20S/\alpha\alpha 20R$ $C_{29} \geq 1$. В Пельгинских образцах наблюдается широкий разброс значений этих показателей – от 0,4-0,5 до 2,5 и 1,3 соответственно, однако в большей части образцов значения показателей ≥ 1 . В Южно-Майской скважине $\beta\beta(20S+20R)/\alpha\alpha 20R$ также изменяется в широких пределах – от 0,5 до 1,4, при этом $\alpha\alpha 20S/\alpha\alpha 20R < 1$ (преимущественно 0,2-0,8). Арчинские и Среднеюлжавские образцы по этим показателям самые «незрелые»: значения показателя $\beta\beta(20S+20R)/\alpha\alpha 20R < 1$ (в основном, 0,5-0,9 и 0,4-0,8 соответственно), а $\alpha\alpha 20S/\alpha\alpha 20R$ изменяется от 0,1 до 0,8 (в основном, 0,2-0,4 и 0,4-0,6 соответственно).

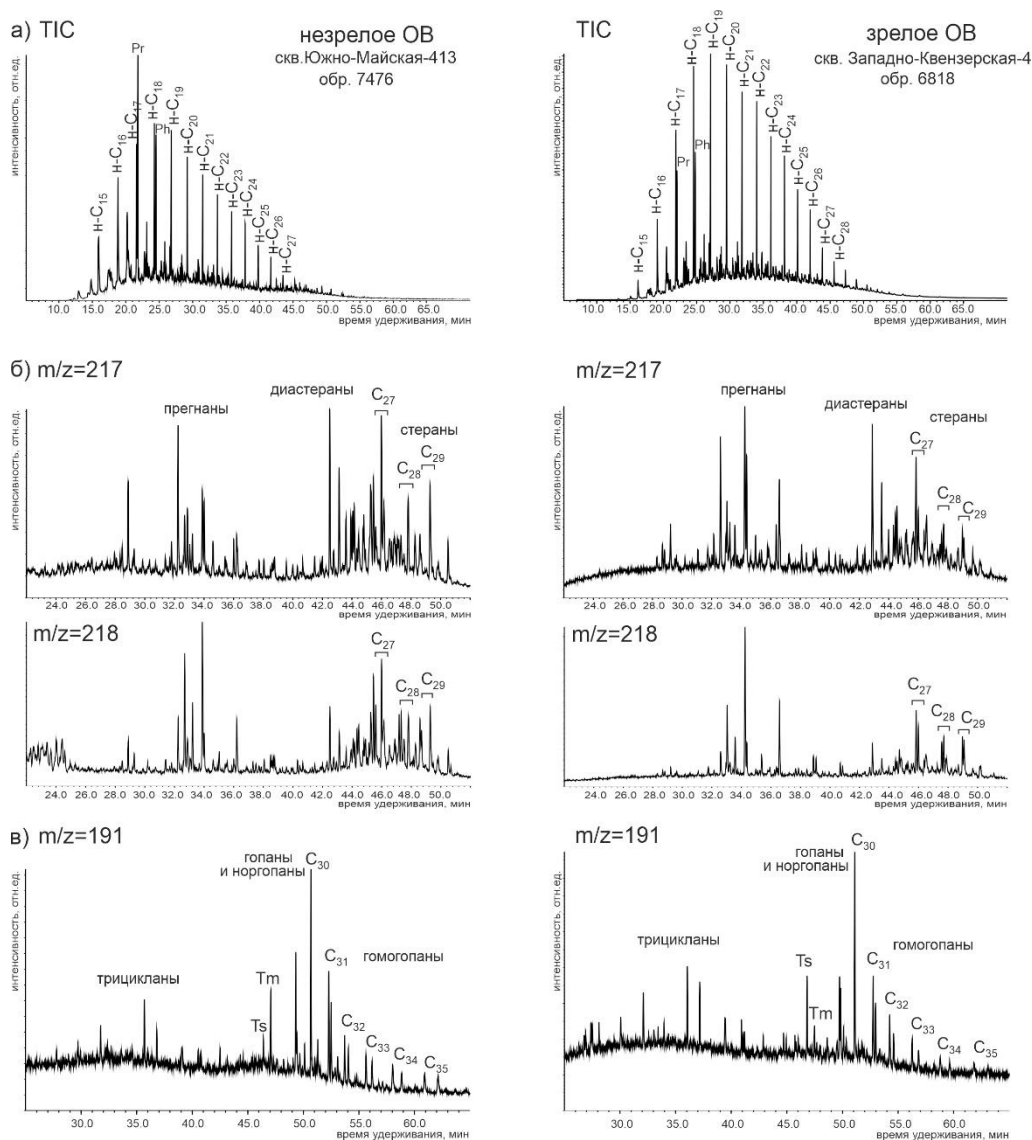


Рис. 4. Типовые хроматограммы (а), хромато-масс-фрагментограммы стеранов (б), терпанов (в) битумоидов баженовской свиты Нюрольской мегавпадины.

Распределение терпановых углеводородов в составе битумоидов Западно-Квензерской площади существенно отличается от остальных проб коллекции (рис. 4в). Как в экстрактах из открытых, так и закрытых пор среди терпанов отмечается высокое содержание трициклических углеводородов – до 40 % от суммы терпанов; гопаны и гомогопаны присутствуют в близких концентрациях (до 35 %) при незначительном преобладании гопанов; моретаны – не превышают 3 %, тетрацикланы – менее 3,5 %. Средние значения концентраций групп терпановых соединений в образцах ОРФ, ОГД и ОМД Западно-Квензерской скважины уменьшаются в ряду: трицикланы (34,8 %) → гопаны (31,8 %) → гомогопаны (29,0 %) → тетрацикланы (2,7 %) → моретаны (1,7 %).

В образцах Южно-Майской, Арчинской, Пельгинской и Среднеюлжавской скважин в составе терпанов преобладают гомогопаны (до 50 %), а концентрации моретанов выше по сравнению с тетрациклическими углеводородами. Средние содержания соединений в Южно-Майских битумоидах ОРФ, ОГД и ОМД уменьшаются в ряду: гомогопаны (37,4 %) → гопаны (33,0 %) → трицикланы (21,0 %) → моретаны (6,8 %) → тетрацикланы (1,7 %). В образцах Арчинской скважины в составе битумоидов ОМД доминируют гомогопаны, в битумоидах открытых пор (ОРФ и ОГД) – гопаны, средние значения соответственно: 39,9/36,9 % → 38,3/38,6 % → 11,3/13,8 % → 9,3/9,1 % → 1,2/1,4%. В битумоидах Пельгинской и Среднеюлжавской скважин концентрации терпановых соединений уменьшаются в ряду: гомогопаны (47,0 и 45,4 %) → гопаны (37,1 и 37,5 %) → трицикланы (9,2 и 9,2 %) → моретаны (5,5 и 6,5%) → тетрацикланы (1,1 и 1,0 %).

Трициклановый индекс ($I_{tc} = 2 \cdot \sum C_{19-20} / \sum C_{23-26}$) в изученной коллекции не превышает 1: в большей части Западно-Квензерских образцов изменяется от 0,5 до 0,9 (в среднем, 0,7), в пробах Южно-Майской и Арчинской скважин – преимущественно 0,3-0,9 (в среднем, 0,5), в Пельгинской и Среднеюлжавской – 0,3-0,7 (в среднем, 0,4) (рис.5 б).

Соотношение гомогопанов C_{35}/C_{34} в пробах Западно-Квензерской скважины – 0,5-0,9 (в среднем, 0,7), в Пельгинской – 0,4-1 (в среднем, 0,8), в Среднеюлжавской – 0,5-1,4 (в среднем, 0,9), в Южно-Майской – 0,8-1,4 (в среднем, 1,0), в Арчинской – 0,9-1,8 (в среднем, 1,3) (рис.5 в).

Значения соотношения концентраций трисноргопанов (C_{27}) Ts/Tm в Западно-Квензерских образцах, как правило, больше 2 (в среднем, 2,4), в остальных пробах коллекции изменяются от 0,3 до 0,7 (в среднем, 0,4-0,5).

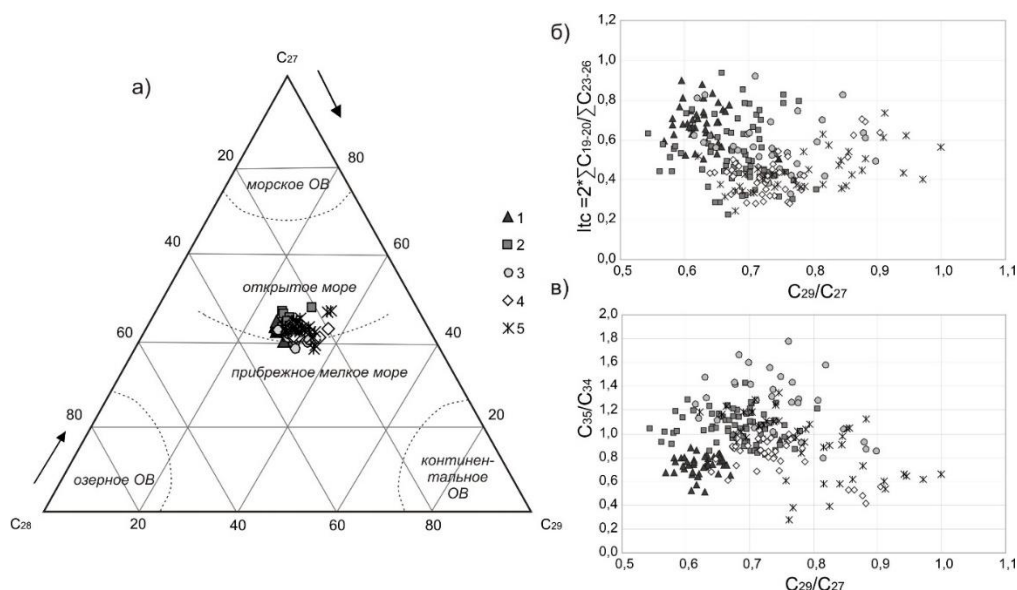


Рис. 5. Распределения стеранов и терпанов в битумоидах баженовской свиты Нюрольской мегавпадины: а – тригонограмма распределения стеранов C_{27} - C_{29} (поля генотипов ОБ согласно [Huang, Meinschein, 1979]), б, в – зависимости трицикланового (I_{tc}) и гомогопанового (C_{35}/C_{34}) индексов от стеранового (C_{29}/C_{27}).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов определений $C_{орг}$, пиролитических (S_1 , S_2 , HI , T_{max}), углепетрографических (R^o_{vt}) и битуминологических ($B_{хл}$, групповой состав, УВ-биомаркеры) исследований баженовской свиты Томской области (северо-восточный борт Нюрольской мегавпадины) показал, что образцы изучаемой коллекции можно разделить на 2 группы.

Первая группа включает в себя образцы баженовской свиты из разреза скважин Арчинская-47, Южно-Майская-413, Пельгинская-2 и Среднеюлжавская-10. Они характеризуются наиболее высокими значениями содержаний органического вещества ($C_{орг}$ до 17,9 % на породу) и нефтегенерационного потенциала ($HI = 500-700$ мг УВ/г $C_{орг}$, S_2 до 130 мг УВ/г породы) при низких концентрациях битумоидов в поровом пространстве пород ($S_1 \leq 5$ мг УВ/г породы, $B_{хл} \leq 1$ % на породу). При этом битумоиды находятся преимущественно в закрытых порах (в открытых порах $B_{хл} \leq 0,1$), в групповом составе битумоидов преобладают как углеводороды (35-60 %), так и смолы (40-60 %).

Вторая группа – образцы скважины Западно-Квензерская-4. Содержание $C_{орг}$ в них до 11,6 % на породу, нефтегенерационный потенциал более выработан ($HI = 300-400$ мг УВ/г $C_{орг}$, $S_2 \leq 50$ мг УВ/г породы). Породы характеризуются высоким содержанием битумоидов (S_1 до 8,6 мг УВ/г породы, $B_{хл}$ до 2,0 % на породу), причем как в открытом ($B_{хл}^{ОРФ}$ и $B_{хл}^{ОГД}$ до 1,25 %), так и в закрытом ($B_{хл}^{ОМД}$ до 1,7 %) поровом пространстве пород. Групповой состав битумоидов открытых и закрытых пор в этих образцах существенно отличается: в битумоидах открытых пор доминируют углеводороды (до 80 %), в закрытых – углеводороды (30-60 %) и смолы (30-50 %).

Анализ молекулярного состава битумоидов показал, что основным фактором, контролирующим распределение УВ-биомаркеров (н-алканы, изопреноиды, стераны, терпаны) в органическом веществе баженовской свиты Томской области, является степень его катагенетической преобразованности. Зрелость ОВ на территории исследования, согласно рассчитанным показателям, увеличивается в ряду:

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| по отражательной способности витринита R^o_{vt} : | Ар→СЮ→Пг→ЮМ→ЗК |
| по пиролитическому показателю T_{max} : | Ар→ЮМ→СЮ→Пг→ЗК |
| по алкановому показателю CPI: | Ар, СЮ, ЮМ →Пг→ЗК |
| по стерановому показателю $\beta\beta(20S+20R)/\alpha\alpha 20R$ C_{29} : | Ар, СЮ →ЮМ→Пг→ЗК |
| по стерановому показателю $\alpha\alpha 20S/\alpha\alpha 20R$ C_{29} : | Ар, СЮ →ЮМ→Пг→ЗК |
| по терпановому показателю Ts/Tm : | Ар,ЮМ,СЮ,Пг → ЗК |

При оценке степени зрелости органического вещества нефтематеринских пород морского генезиса необходимо для увеличения достоверности кроме универсального и общепринятого параметра катагенеза R^o_{vt} дополнительно учитывать пиролитический T_{max} и молекулярные показатели, характеризующие непосредственно органическое вещество баженовской свиты [Фомин, 2011; Гончаров и др., 2004, 2013].

Таким образом, согласно углепетрографическим, пиролитическим и биомаркерным данным наиболее «зрелым» органическим веществом градации катагенеза $МК_1^2$ - начала $МК_2$ характеризуются образцы второй группы, т.е. образцы Западно-Квензерской скважины. Органическое вещество из образцов первой группы либо еще не вступило, либо находится в самом начале главной фазы нефтеобразования (градации $ПК_3$ - $МК_1^1$). Среди этой группы наиболее преобразовано органическое вещество Пельгинской скважины, наименее преобразовано органическое вещество Арчинской скважины; Среднеюлжавские и Южно-Майские образцы занимают промежуточное положение. Полученные данные согласуются с опубликованными ранее

результатами [Замирайлова и др., 2019, Рыжкова и др., 2022], а также с данными И.В. Гончарова с соавторами [Гончаров и др., 2016], согласно которым в районе Чузиско-Чижапской седловины выделяется "холодная", т.е. слабо прогретая территория осадочного чехла, на которой баженовская свита ещё не вступила в стадию нефтегенерации и совсем ещё не реализовала свой потенциал, а в районе Тамрадской впадины, где расположена Западно-Квензерская площадь, - "горячая" зона, что предполагалось и ранее [Сурков, Жеро, 1981; Конторович, 2001]. Данные о распределении ароматических соединений в битумоидах баженовской свиты Томской области [Гончаров и др., 2013, 2016; Сотнич, Костырева, 2025] подтверждают эти выводы.

По молекулярным параметрам можно проводить оценку не только степени преобразованности органического вещества, но и определять обстановки его накопления. Распределение УВ-биомаркеров (преобладание n -алканов $C_{16}-C_{19}$, $n-C_{27}/n-C_{17} \leq 0,5$, соотношение стеранов $C_{27}:C_{28}:C_{29}$, соотношение $C_{29}/C_{27} < 1$, трицикланный индекс $I_{tc} < 1$ и т.д.) указывает на морской генотип исходного органического вещества. Согласно палеогеографическим реконструкциям [Конторович и др., 2013], на территории исследования баженовская свита накапливалась в обстановках открытого моря глубиной 100-200 м.

Разброс значений параметров Pt/Ph , C_{29}/C_{27} , (стераны + прегнаны)/прегнаны, C_{35}/C_{34} свидетельствует об несколько отличных условиях накопления органического вещества баженовской свиты Среднеюлжавской и Пельгинской скважин от Арчинской, Южно-Майской и Западно-Квензерской. Последние, согласно значениям этих молекулярных показателей, накапливались в несколько более глубоководных обстановках, что вполне согласуется с палеотектоническими реконструкциями [Конторович и др., 2001].

Сравнительный анализ состава битумоидов, извлеченных из открытого (из ОРФ, ОГД) и закрытого (из ОМД) порового пространства пород, показал, что значения некоторых молекулярных параметров хоть и незначительно, но отличаются в экстрактах из ОРФ, ОГД, ОМД, что указывает на протекающие в породе процессы перераспределения углеводородов в поровом пространстве пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На территории северо-восточного борта Нюрольской впадины (юго-восток Западной Сибири, Томская область) органическое вещество баженовской свиты разнородно по степени его катагенетической преобразованности (от $ПК_3$ до $МК_2$), что, вероятно, обусловлено региональным уменьшением теплового потока в юго-восточном направлении по мере приближения к структурам Внешнего пояса Западно-Сибирской геосинеклизы [Конторович и др., 2009, Сурков, Жеро, 1981; Новиков и др., 2018]. Согласно геохимическим (пиролитическим, битуминологическим, углепетрографическим) данным, наиболее преобразовано органическое вещество Западно-Квензерской площади (градации $МК_1^2$ - $МК_2$), о чем свидетельствуют более выработанный нефтегенерационный потенциал, высокие значения пиролитического параметра T_{max} , групповой состав битумоидов и молекулярные показатели зрелости. На остальных площадях (Арчинская, Южно-Майская, Пельгинская, Среднеюлжавская) органическое вещество баженовской свиты либо не вступило, либо находится в начале главной фазы нефтеобразования (градации $ПК_3$ - $МК_1^1$): самое «незрелое» ОВ отмечается на Арчинской площади, более преобразовано ОВ Пельгинской площади, ОВ Южно-Майской и Среднеюлжавской площадей занимает промежуточное положение.

Степень зрелости ОВ существенно влияет на его распределение в поровом пространстве пород (с ростом зрелости увеличивается содержание «свободной микроневфти»), что отражается как на групповом, так и на молекулярном составе извлекаемых хлороформом экстрактов (битумоидов). Различие в групповом составе битумоидов открытых и закрытых пор отмечается даже в «незрелом» ОВ, увеличиваясь с ростом катагенеза по мере вхождения в главную фазу нефтеобразования.

БЛАГОДАРНОСТИ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Проектов № FWZZ-2022-0011 и FWZZ-2022-0012 программы ФНИ.

ЛИТЕРАТУРА

- Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность).** (1986). Ред. В.С. Вышемирский. Новосибирск, Труды ИГиГ. Выпуск 649, 217 с.
- Балушкина Н.С., Калмыков Г.А., Коробова Н.И., Шарданова Т.А. (2015).** Структура пустотного пространства нефтенасыщенных пород баженовской и абалакской свит в центральной части Западно-Сибирского бассейна // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, № 5, с. 69-77.
- Волков В.А. (2019).** О необходимости учета геохимических данных при оценке объемным методом запасов и ресурсов нефти в баженовской свите // Недропользование XXI век, № 3 (79), с. 138-143.
- Гончаров И.В., Самойленко В.В., Обласов Н.В., Носова С.В. (2004).** Молекулярные параметры катагенеза органического вещества пород баженовской свиты Томской области // Геология нефти и газа, № 5, с. 53-59.
- Гончаров И.В., Самойленко В.В., Обласов Н.В., Фадеева С.В. (2013).** Катагенез органического вещества баженовской свиты юго-востока Западной Сибири (Томская область) // Нефтяное хозяйство, № 10, с. 32-37.
- 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.
- Гурари Ф.Г. (1959).** Геология и перспективы нефтегазоносности Обь-Иртышского междуречья. Л.: Гостоптехиздат, 174 с.
- Гурари Ф.Г. (1961).** О поисках нефти и газа в мезозое Западно-Сибирской низменности // Труды СНИИГТиМС, выпуск 17. Л.: Гостоптехиздат, с. 15-31.
- Дахнова М.В., Назарова Е.С., Славкин В.С., Колосков В.Н., Алексеев А.Д. (2007).** Геохимические методы в решении задач, связанных с освоением залежей нефти в баженовской свите на западе Широтного Приобья // Геология нефти и газа, № 6, с. 39-43.
- Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Эдер В.Г., Рыжкова С.В., Сотнич И.С. (2019).** Литолого-геохимическая характеристика георгиевской, баженовской и куломзинской свит на Арчинской площади (Нюрольская впадина, Томская область) // Геология нефти и газа, № 3, с. 99-113, DOI: 10.31087/0016-7894-2019-3-99-113.
- Запивалов Н.П. (1961).** Геолого-геохимическая характеристика мезозойских отложений и перспективы нефтегазоносности Обь-Иртышского междуречья: автореф. дис. канд.-та геол.-минерал. наук. Новосибирск, 23 с.
- Зубков М.Ю., Сонич В.П., Зарипов О.Г. (1986).** Геологические и литолого-геохимические критерии промышленной нефтеносности отложений баженовской свиты Западной Сибири // Проблемы нефтеносности баженовской свиты Западной Сибири. Москва: ИГиРГИ, с. 5-14.
- Зубков М.Ю., Репетов С.Н., Галенко Е.О. (2018).** Оценка нефтегенерационных свойств пород баженовской свиты (Западная Сибирь) методом материального баланса на основе данных пиролиза // Горные ведомости, № 4, с. 20-44.
- Козлова Е.В., Калмыков Г.А., Ганичев Д.И., Балушкина Н.С. (2015).** Формы нахождения углеводородов в породах баженовской свиты // Геофизика, №3, с. 15-22.
- Конторович А.Э., Бабина Н.М., Богородская Л.И., Винокур Б.Г., Зимин Ю.Г., Колганова М.М., Липницкая Л.Ф., Луговцов А.Д., Мельникова В.М., Парпарова Г.М., Рогозина Е.А., Стасова О.Ф., Трушков П.А., Фомичев А.С. (1967).** Нефтепроизводящие толщи и условия образования нефти в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности. Л.: Недра, 223 с.
- Конторович А.Э., Фомин А.Н., Красавчиков В.О., Истомин А.В. (2009).** Катагенез органического вещества в кровле и подошве юрского комплекса Западно-Сибирского мегабассейна // Геология и геофизика, т. 50, № 11, с. 1191-1200.
- Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В., Шурыгин Б.Н., Вакуленко Л.Г., Гайдебурова Е.А., Данилова В.П., Казаненков В.А., Ким Н.С., Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. (2013).** Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика, т. 54, № 8, с. 972-1012.

- Конторович А.Э., Ян П.А., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Эдер В.Г. (2016).** Классификация пород баженовской свиты // Геология и геофизика, т. 57, № 11, с. 2034–2043, DOI: 10.15372/GiG20161106.
- Конторович А.Э., Костырева Е.А., Родякин С.В., Сотнич И.С., Ян П.А. (2018a).** Геохимия битумоидов баженовской свиты // Геология нефти и газа, № 2, с. 79–88, DOI: 10.31087/0016-7894-2018-2-79-88
- Конторович А.Э., Родякин С.В., Бурштейн Л.М., Костырева Е.А., Рыжкова С.В., Ян П.А. (2018b).** Пористость и нефтенасыщенность пород баженовской свиты // Геология нефти и газа, № 5, с. 61–73, DOI: 10.31087/0016-7894-2018-5-61-73.
- Конторович В.А. (2002).** Тектоника и история развития юго-восточных районов Западной Сибири в мезозое и кайнозое // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, № 4, с. 4–16.
- 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 кайнозое и мезозое // Геология и геофизика, т. 42, № 11–12, с. 1832–1845.
- Костырева Е.А., Сотнич И.С. (2017).** Геохимия органического вещества баженовской свиты севера Хантейской антеклизы // Геология и геофизика, т. 58, № 3–4, с. 533–543, DOI: 10.15372/GiG20170316.
- Нестеров И.И. (1979).** Новый тип коллектора нефти и газа // Геология нефти и газа, № 9, с. 26–29.
- Нестеров И.И., Ушатинский И.Н. (1986).** Баженовская свита Среднего Приобья // Советская геология, № 2, с. 32–39.
- Новиков Д.А., Рыжкова С.В., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. (2018).** О геотермической зональности нефтегазоносных отложений северо-западных районов Новосибирской области // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ, №5, с. 69–76, DOI: 10.31660/0445-0108-2018-5-69-76.
- Олейник Е.В., Оксенойд Е.Е. (2020).** К принятию новой методики подсчета запасов нефти в отложениях баженовской толщи Западной Сибири // Недропользование XXI век, №2 (85), с. 92–101.
- Рыжкова С.В., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Сотнич И.С., Фомин М.А., Эдер В.Г. (2022).** Характеристика продуктивного интервала баженовской свиты в юго-восточных районах Западной Сибири (на примере Западно-Квензерской площади) // Нефтегазовая геология. Теория и практика, т. 17, № 4, http://www.ngtp.ru/rub/2022/34_2022.html
- Самойленко В.В. (2011).** Геохимия органического вещества баженовской свиты юго-востока Западной Сибири и генетически связанных с ним флюидов, в которой приведены результаты в том числе и для Нюрольской впадины // Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук, Томск, 22 с.
- Скворцов М.Б., Немова В.Д., Дахнова М.В., Копилевич Е.А., Сурова Н.Д., Кирсанов А.М., Можегова С.В. (2019).** Новые методические подходы к оценке ресурсов нефти в отложениях баженовской свиты // Геология и геофизика, т. 60, № 2, с. 217–229, DOI: 10.15372/GiG2019014.
- Сотнич И.С., Костырева Е.А. (2021).** Ароматические соединения в битумоидах баженовской свиты севера Хантейской гемиантеклизы // Георесурсы, т. 23, № 1, с. 42–51., DOI: 10.18599/grs.2021.1.4.
- Сотнич И.С., Костырева Е.А., Родякин С.В., Рыжкова С.В., Конторович А.Э. (2023).** Дифференциация битумоидов баженовской свиты Северо-Сургутского района в ходе генерации и миграции // Геология и геофизика, т. 64 (12), с. 1732–1741, DOI: 10.15372/GiG2023145.
- Сурков В.С., Жеро О.Г. (1981).** Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. М.: Недра, 143с.
- Тихонова М.С., Калмыков А.Г., Иванова Д.А., Видищева О.В., Калмыков Г.А., Борисов Р.Б. (2021).** Модель распределения углеводородных соединений в пустотном пространстве баженовского горизонта // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, 1(6), с.98–109. DOI: 10.33623/0579-9406-2021-6-98-109
- Фомин А.Н. (2011).** Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. Новосибирск: СО РАН, 331 с.
- Эдер В.Г., Рыжкова С.В., Дзюба О.С., Замирайлова А.Г. (2022).** Литостратиграфия и обстановки седиментации баженовской свиты (Западная Сибирь) в центральном, юго-восточном и северных районах её распространения // Стратиграфия. Геологическая корреляция, т. 30, №5, с. 46–74, DOI: 10.31857/S0869592X22050027.
- Эдер В.Г., Рыжкова С.В., Костырева Е.А., Павлова М.А., Сотнич И.С., Замирайлова А.Г., Пономарева Е.В. (2020).** Литолого-геохимические и геофизические особенности приграничных толщ баженовского и куломзинского горизонтов (основание нижнего мела) центральных районов Западной Сибири // Геология и геофизика, т. 61, № 7, с. 943–961, DOI: 10.15372/GiG2019124.

Эдер В.Г., Замирайлова А.Г. (2023). Литология баженовской свиты Западной Сибири. Новосибирск: СО РАН, 243с.

Huang Wen-Yen, Meinschein W.G. (1979) Sterols as ecological indicators // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 43, pp. 739-745, DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90257-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90257-6)