

УДК 553.983

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ БИТУМОИДОВ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ СЕВЕРО-СУРГУТСКОГО РАЙОНА В ХОДЕ ГЕНЕРАЦИИ И МИГРАЦИИ И.С. Сотнич¹, Е.А. Костырева¹, С.В. Родякин¹, С.В. Рыжкова¹, А.Э. Конторович^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

Баженовская свита Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции в настоящее время выступает в качестве одного из ключевых объектов потенциального прироста запасов и добычи нефти. В статье представлены результаты исследования геохимии органического вещества баженовской свиты по методике, разработанной в ИНГТ СО РАН для высокообогащенных органическим веществом пород. Рассмотрены особенности группового и углеводородного состава битумоидов открытых и закрытых пор баженовской свиты Северо-Сургутского района. Установлено, что основная часть новообразованных нафтидов находится в свободном (фазово-обособленном) и сорбированном состояниях в закрытом поровом пространстве пород. В открытых порах находятся наиболее подвижные компоненты битумоидов, перераспределенные из закрытых пор в ходе первичной миграции и оставшиеся после эмиграции нафтидов из баженовской свиты в берриас-нижнеаптские (пласты групп А и Б) резервуары. Используемая в работе методика позволила по объему порового пространства, занимаемому битумоидами открытых пор, выделить интервалы с повышенной открытой пористостью и нефтенасыщенностью в разрезе баженовской свиты (силициты и карбонаты).

Баженовская свита, органическое вещество, битумоиды, нафтиды, поровое пространство, нефтенасыщенность, Западная Сибирь

DIFFERENTIATION OF THE BAZHENOV FORMATION BITUMOIDS IN THE NORTH-SURGUT REGION DURING GENERATION AND MIGRATION

I.S. Sotnich, E.A. Kostyрева, S.V. Rodyakin, S.V. Ryzhkova, A.E. Kontorovich

The Bazhenov Formation of the Western Siberian oil-and-gas province is currently one of the key objects of potential growth in oil reserves and production. Here we present results of a geochemical study of the Bazhenov Formation according to the methodology developed at Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk (IPGG SB RAS) for rocks highly enriched in organic matter. The features of the group and hydrocarbon compositions of the bitumoids that are filling open and closed pores of the Bazhenov Formation rocks from the North-Surgut region were considered. It has been established that most of the naphthides are in a free (phase-segregated) or sorbed state in a closed pore space. The open pores contain the most mobile components of bitumoids, redistributed from closed pores during the primary migration and remained after the secondary migration of naphthides from the Bazhenov Formation to the Berriasian–lower Aptian reservoirs (A and B strata groups). The methodology used in this work allows determining intervals with increased open porosity and oil saturation in the section of the Bazhenov Formation (silicites and carbonates) by the volume of pore space occupied by open-pore bitumoids.

Organic matter, bitumoid, naphthide, pore space, oil saturation, Bazhenov Formation, West Siberia

ВВЕДЕНИЕ

Баженовская свита — основная нефтематеринская толща Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, с которой генетически связано более 80 % ресурсов нефти этого мегабассейна [Конторович и др., 1967, 1975, 2018б; Гурари, 1981; и др.]. Вместе с тем в ходе естественной термической эволюции в ней сформировались зоны, обладающие коллекторскими свойствами, из которых были получены промышленные притоки нефти [Гурари, 1961, 1981; Новиков и др., 1970; Конторович и др., 1975; Булыникова и др., 1978; Нестеров, 1979, 1985; Нестеров и др., 1987]. По современным оценкам, в баженовской свите сосредоточено более 10 млрд т извлекаемых ресурсов нефти [Конторович и др., 2014, 2019; Калмыков, Балушкина, 2017; Скворцов и др., 2019; и др.]. Однако надежная методическая основа поиска перспективных для постановки поискового и разведочного бурения зон в баженовской свите до настоящего времени отсутствует. В связи с этим исследования, направленные на расширение представлений о механизме и условиях формирования нефтегазоносных зон в баженовской свите, являются актуальными.

© Сотнич И.С., Костырева Е.А., Родякин С.В., Рыжкова С.В., Конторович А.Э.

✉ e-mail: SotnichIS@ipgg.sbras.ru

ми. Генерация углеводородов и формирование вторичной органической пористости в баженовской свите — это взаимосвязанные процессы в ходе нафтидогенеза [Конторович и др., 1967, 1975; Гурари, Гурари, 1974; Конторович, 1976; Булынникова и др., 1978; Зубков и др., 1986]. Исследования состава нафтидов и их изменений при перераспределении в поровом пространстве пород баженовской свиты представляют большой интерес [Трофимук, Конторович, 1965; Вышемирский и др., 1971].

Целью представленного исследования является изучение особенностей состава и распределения битумоидов баженовской свиты в открытом и закрытом поровом пространстве пород в ходе их генерации и миграции на примере Северо-Сургутского района.

Объектом исследования является органическое вещество баженовской свиты Северо-Сургутского района Западной Сибири, расположенного в центральной части Западной Сибири (север ХМАО). В тектоническом отношении исследуемая территория относится к зоне сочленения двух надпорядковых структур — Хантейской гемиантеклизы Среднеобской региональной ступени и Южно-Надымской мегамоноклизы, входящей в состав Ямало-Карской региональной депрессии [Конторович и др., 1975, 2001]. Интервал залегания баженовской свиты 2790—2905 м на Хантейской гемиантеклизе и 2980—3003 м на Южно-Надымской мегамоноклизе, мощность свиты не превышает 25—30 м.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение органического вещества баженовской свиты проводилось по схеме, разработанной в ИНГГ СО РАН для обогащенных органическим веществом осадочных пород баженовской свиты [Конторович и др., 2018а, 2018б]. Особенностью этой методики является, во-первых, комплексность исследования, что дает возможность изучать особенности геохимии органического вещества в тесной взаимосвязи с результатами литологических и петрофизических исследований. Во-вторых, предложенная методика позволяет разделить свободные битумоиды, выполняющие открытые поры, и битумоиды закрытых пор и сорбированные. В проведенных исследованиях под битумоидами открытых пор подразумевается свободная микроневфть, т. е. экстракты битумоидов из недробленных пород, а под битумоидами закрытых пор — автохтонные битумоиды, высвобождающиеся после разрушения пород в процессе дробления и содержащие как нафтиды заблокированных пор, так и сорбированные на поверхности пород молекулы углеводородов и гетероциклических соединений [Конторович и др., 2018б].

Выделение битумоидов открытых пор выполнялось хлороформом при комнатной температуре [Успенский и др., 1966, 1975; Конторович, Винокур, 1967] из образцов, раздробленных до 0.5 см (образцы грубого дробления — ОГД) [Конторович и др., 2018а]. После этого проэкстрагированные образцы дробились до размерности 0.25 мм (образцы мелкого дробления — ОМД) и подвергались повторной экстракции, в результате которой получены выходы битумоидов закрытых пор. Все хлороформенные экстракты очищались от элементарной серы, затем методом элюентной жидкостной хроматографии определялся групповой (углеводороды, смолы, асфальтены) и групповой углеводородный составы битумоидов (фракции насыщенных углеводородов, ароматических соединений). Далее исследования проводились на молекулярном и атомном уровнях методами газожидкостной хроматографии (на хроматографе «Маэстро GX 7820», оснащенном кварцевой капиллярной неполярной колонкой с фазой HP-5 и пламенно-ионизационным детектором) и хромато-масс-спектрометрии (на системе, включающей газовый хроматограф Agilent Technologies 6890, имеющий интерфейс с высокоэффективным масс-селективным детектором MSD 5973N и компьютерной системой (ChemStation) регистрации и обработки информации HPG 1034).

Параллельно с битуминологическими исследованиями на анализаторе Source Rock Analyzer (SRA) — TPH/TOC (Weatherford Laboratory, Instr. Division) проводился пиролиз пород по методу Rock Eval, который включал несколько этапов: 1) пиролиз до экстракции битумоидов; 2) пиролиз после удаления битумоидов открытых пор (из ОГД); 3) пиролиз после удаления битумоидов закрытых пор (из ОМД). Содержание органического углерода $C_{орг}$ (в % на породу) определялось на предварительно обработанных 10 %-й соляной кислотой породах с помощью экспресс-анализатора АН-7529.

Коллекция kernового материала включала 429 образцов, отобранных в интервале баженовской свиты из скважин Дружная-322, Новоортъягунская-187, Повховская-70 и Южно-Ягунская-306. Содержание битумоидов (в % на породу) определялось для 254 проб ОГД и 252 проб ОМД, методами газожидкостной хроматографии и хромато-масс-спектрометрии исследованы 506 проб. Методом пиролиза изучено 399 проб пород до экстракции, 244 пробы пород после экстракции битумоидов из ОГД и 132 пробы пород после экстракции битумоидов из ОМД.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Литолого-геохимическая характеристика изученных разрезов. Баженовская свита Северо-Сургутского района характеризуется высокой литолого-фациальной изменчивостью как на территории

**Содержание органического углерода и нефтегенерационный потенциал пород баженовской свиты
в зависимости от их литологического типа**

Литологический тип породы	Содержание $C_{орг}$, в % на породе	Пиролитические характеристики (до экстракции)		
		S_1 , мг УВ/г породы	S_2 , мг УВ/г породы	НІ, мг УВ/г $C_{орг}$
Микстит глинистый	(4.9—7.4)/6.3	(2.5—6.9)/3.7	(20.2—28.7)/25.7	(371—485)/409
Микстит кероген-глинистый	(6.4—20.4)/11.1	(4.0—8.2)/4.8	(34.0—112.1)/54.8	(410—548)/488
Микстит керогеновый	(5.6—24.0)/15.4	(2.7—13.9)/7.2	(22.2—107.3)/70.1	(337—554)/438
Микстит кероген-кремнистый	(7.1—19.0)/12.0	(2.6—13.5)/6.4	(34.9—94.5)/56.0	(333—587)/472
Микстит кероген-карбонатный	(4.1—15.6)/9.9	(2.71—12.47)/5.26	(16.3—70.0)/45.5	(369—570)/456
Силицит керогеновый	(7.5—15.0)/10.0	(1.3—11.5)/5.7	(20.3—82.5)/47.2	(220—638)/471
Силицит	(1.4—8.3)/5.4	(1.13—7.90)/4.70	(6.9—43.4)/23.3	(283—716)/435
Карбонат	(0.5—6.7)/2.5	(0.47—8.43)/2.38	(2.2—37.3)/13.2	(320—756)/483

Примечание. В скобках приведен разброс значений геохимического параметра ОВ, после косой черты — среднее.

исследования, так и по разрезу свиты. Тем не менее в изученных разрезах баженовской свиты отмечаются «типичные» для центральных районов Западной Сибири закономерности [Нестеров, Ушатинский, 1986]: в нижней части разреза преобладают «радиоляриты и возникшие за счет их карбонатизации вторичные известняки» (по классификации ИНГГ СО РАН [Конторович и др., 2016] — силициты и карбонаты), в средней — «силициты глинистые» (силициты керогеновые с прослоями темно-серых микститов кероген-кремнистых и кероген-глинисто-кремнистых), в верхней — «глины кремнистые, известково-кремнистые, мергели, известняки» (переслаивание микститов кероген-глинистых, кероген-кремнистых, кероген-глинисто-кремнистых, кероген-карбонатных и кероген-кремнисто-карбонатных и карбонатных линз-прослоев [Конторович и др., 2016]).

Концентрации органического углерода ($C_{орг}$) в породах баженовской свиты изученных разрезов варьируют от 0.5 до 24 % на породу и, как правило, увеличиваются снизу вверх по разрезу [Костырева, Сотнич, 2017]. В соответствии с содержанием органического вещества в породах изменяются и нефтегенерационные характеристики в них: наибольшим нефтегенерационным потенциалом характеризуются микститы керогеновые, кероген-глинистые и кероген-кремнистые, наименьшим — микститы глинистые (переходная зона баженовской свиты), силициты и карбонаты (таблица).

Содержание битумоидов в литотипах пород баженовской свиты. Общий выход хлороформенного битумоида ($b_{хл\ общ}$) в породах баженовской свиты Северо-Сургутского района достигает 4.2 % на породу, в большей части образцов значения $b_{хл\ общ}$ варьируют в пределах 1.0—1.5 % на породу. Наиболее высокие концентрации битумоидов наблюдаются в образцах Повховской и Южно-Ягунской площадей ($b_{хл\ общ}$ в среднем 1.3—1.4 % на породу), на Дружной и Новоортьягунской площадях содержание битумоидов не превышает 2.0—2.2 % на породу (в среднем 1.1—1.2 %). Среди литотипов баженовской свиты высокие концентрации битумоидов (в среднем ≥ 1.5 %) имеют место в керогеновых, кероген-кремнистых и кероген-карбонатных микститах, наименее высокие — в силицитах (в среднем 1.2 %) и карбонатах (в среднем 0.9 %). Таким образом, среднее содержание хлороформенных битумоидов в литотипах баженовской свиты повторяет тренд распределения в них органического углерода $C_{орг}$ (см. таблицу), что подтверждает генетическую связь извлеченных битумоидов с органическим веществом баженовской свиты.

Значения $b_{хл\ общ}$ хорошо коррелируют со значениями пиролитического показателя S_1 (до экстракции), соответствующего выходу углеводородов, находящихся в породе в свободном или адсорбированном состоянии (рис. 1).

Наиболее высокие значения S_1 наблюдаются в микститах керогеновых, кероген-кремнистых, кероген-карбонатных (до 14, в среднем 5—7 мг УВ/г породы) и силицитах керогеновых (до 11.5, в среднем 5 мг УВ/г породы).

В микститах кероген-глинистых и кремнисто-глинистых, а также в силицитах значения S_1 не превышают 8 мг УВ/г породы (в среднем 5 мг УВ/г породы), в карбонатах варьирует от 0.5 до 8.5 (в среднем 2.4 мг УВ/г породы).

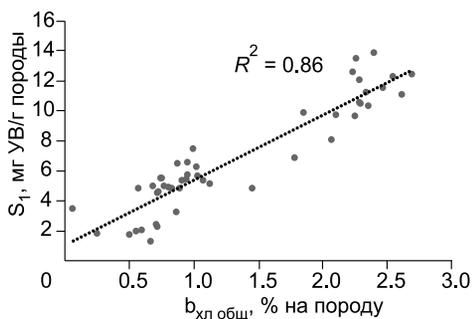
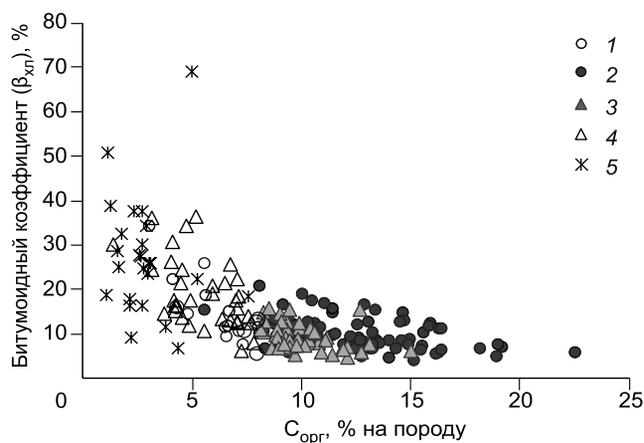


Рис. 1. Зависимость пиролитического показателя S_1 от выхода хлороформенного битумоида баженовской свиты на примере Повховской площади.

Рис. 2. Зависимость битумоидного коэффициента ($\beta_{\text{хл}}$) от содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$) (закономерность Успенского—Вассоевича) в породах баженовской свиты.

1 — микститы глинистые, кремнистые, карбонатные; 2 — микститы керогеновые, кероген-кремнистые, кероген-глинисто-кремнистые, кероген-карбонатные; 3 — силициты керогеновые; 4 — силициты; 5 — карбонаты; наименования литотипов баженовской свиты приведены согласно классификации [Конторович и др., 2016].



Обратную картину показывает распределение по разрезу битумоидного коэффициента ($\beta_{\text{хл}}$): отчетливо проявляется так называемая «закономерность Успенского—Вассоевича» (рис. 2) — наиболее высокие значения $\beta_{\text{хл}}$ отмечаются в силицитах (до 40 %, в среднем 20 %) и карбонатах (до 70 %, в среднем 30 %), в остальных литотипах баженовской свиты $\beta_{\text{хл}}$ не превышает 20 % (в среднем 10—15 %). Это показывает, что в силицитах и карбонатах преобладают аллохтонные битумоиды.

Подобно битумоидному коэффициенту ведут себя такие пиролитические показатели, как индекс продуктивности ($PI = S_1/S_1 + S_2$), показатель $S_1/C_{\text{орг}}$ и соотношение S_1/S_2 . Их повышенные значения (до 0.33 отн. ед., 250 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$ и 0.5 отн. ед. соответственно) отмечены в силицитах, распространенных преимущественно в нижней части разреза свиты на Повховской, Новоортьягунской и Дружной площадях, а также в прослое карбонатов Повховской площади и в единичных карбонатах (слой КС) Южно-Ягунской площади. В остальных литотипах баженовской свиты значения PI не превышают 0.2, показателя $S_1/C_{\text{орг}}$ — 110 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$, а S_1/S_2 — 0.1—0.2.

Распределение битумоидов в поровом пространстве пород. Современное распределение битумоидов в поровом пространстве пород можно оценить путем сравнения величины отношения выходов битумоидов открытых ($b_{\text{хл ОГД}}$) и закрытых ($b_{\text{хл ОМД}}$) пор (рис. 3).

Из рисунка 3 видно, что на Повховской площади наибольшее содержание битумоидов как в открытом ($b_{\text{хл ОГД}}$), так и в закрытом ($b_{\text{хл ОМД}}$) поровом пространстве пород имеет место в верхней части баженовской свиты, в то время как на остальных площадях содержания $b_{\text{хл ОГД}}$ и $b_{\text{хл ОМД}}$ распределены по разрезу равномерно. Концентрации битумоидов открытых пор на Повховской площади наибольших значений (до 1.0 % на породу) достигают в кероген-карбонатных и кероген-кремнистых микститах (верхняя часть разреза), повышенных (до 0.3 % на породу) — в силицитах и карбонатах (нижняя часть разреза) и наименьших (до 0.1 % на породу) — в керогеновых силицитах (средняя часть разреза).

На Южно-Ягунской площади высокие значения $b_{\text{хл ОГД}}$ установлены в «кокколитовой пачке» (до 0.6 % на породу, в единичном образце 1.28 %) и карбонатном пласте КС (до 0.4 % на породу, в единичном образце 3.92 %). На Дружной площади повышенные значения $b_{\text{хл ОГД}}$ (до 0.6 % на породу) имеют место в нижней части разреза, где происходит переслаивание силицитов и керогеновых силицитов. На Новоортьягунской площади распределение $b_{\text{хл ОГД}}$ относительно равномерно, отмечается небольшое повышение концентраций битумоидов открытых пор (до 0.3 % на породу, в единичном образце 0.75 %) в зоне распространения силицитов в подошве баженовской свиты. В целом повышенные значения отношения $b_{\text{хл ОГД}}/b_{\text{хл ОМД}}$ отмечаются в керогеновых, кероген-кремнистых и кероген-карбонатных микститах «кокколитовой» пачки (до 1.4 отн. ед.), а также в силицитах (до 1.1 отн. ед.) и карбонатах (до 12.9 отн. ед.). В остальных литотипах значения отношения $b_{\text{хл ОГД}}/b_{\text{хл ОМД}}$ не превышают 0.35.

Таким образом, основной вклад (в среднем около 80 %) в общий выход хлороформенных битумоидов ($b_{\text{хл общ}}$) вносят экстракты из закрытого порового пространства пород (до 2.0 % на породу), в то время как содержание битумоидов в открытых порах не превышает 1.0 % на породу и составляет, соответственно, около 20 % от $b_{\text{хл общ}}$. В карбонатных породах доля битумоидов из открытого порового пространства может достигать 90 % от общего выхода хлороформенного битумоида (см. рис. 3). Такое распределение свидетельствует об активно протекающих процессах перераспределения образованной микронепти в баженовской свите и эмиграции значительной ее части из баженовской свиты в перекрывающие и подстилающие резервуары, как это и предсказывали А.А. Трофимук и А.Э. Конторович [1965].

Еще в 60—70-е годы прошлого века было установлено, что содержание битумоидов в породе — это результирующая двух процессов — новообразования и первичной миграции [Трофимук, Конторович, 1965; Вышемирский и др., 1971; Конторович и др., 1975]. В представленной работе учитываются лишь нефти, оставшиеся в породе на момент проведения исследований. Нужно иметь в виду, что баженовская свита является источником огромных запасов нефти в залежах берриас-аптского комплек-

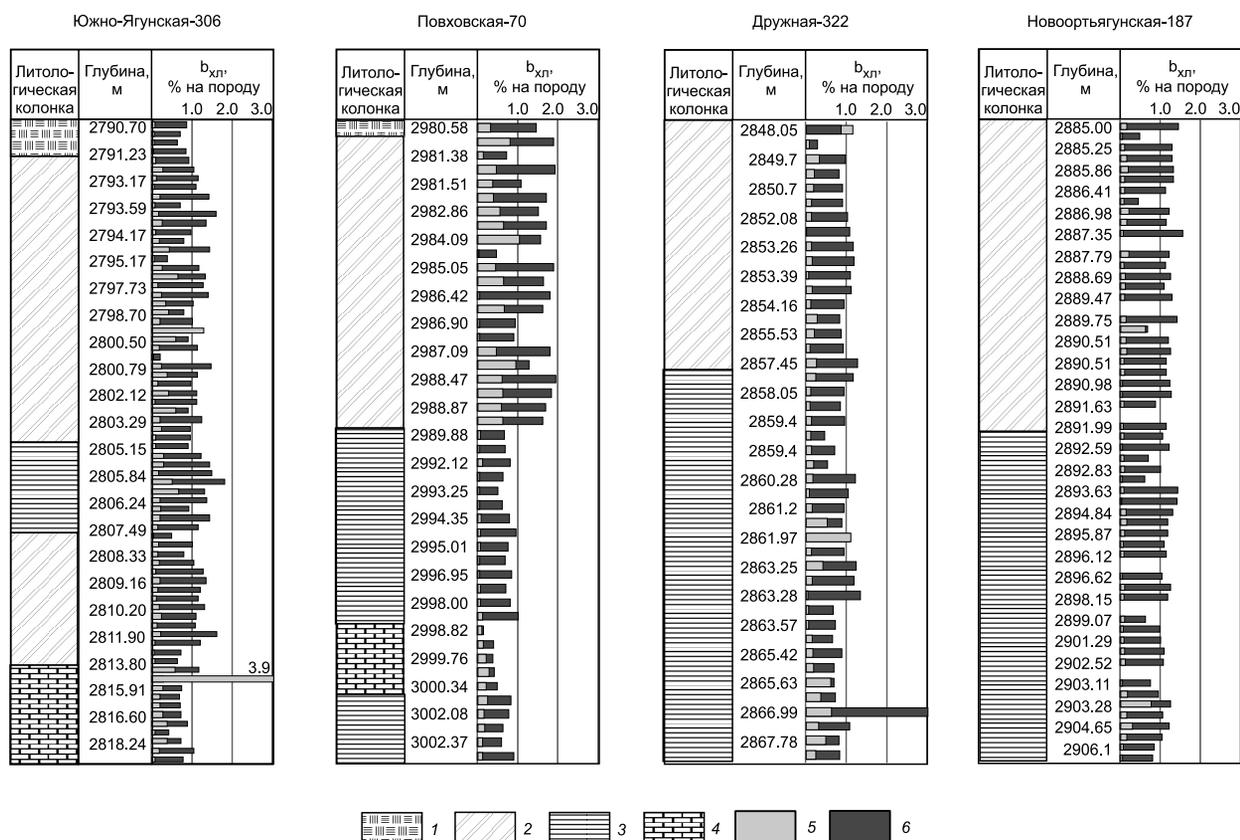


Рис. 3. Распределение выходов битумоидов открытых и закрытых пор по разрезу баженовской свиты Северо-Сургутского района Западной Сибири.

1 — глинистые микститы, 2 — переслаивание микститов керогеновых, кероген-кремнистых, кероген-глинисто-кремнистых, кероген-карбонатных, кероген-кремнисто-карбонатных, 3 — переслаивание силицитов и керогеновых силицитов, 4 — карбонаты; содержание битумоидов в поровом пространстве пород: 5 — в открытом ($b_{хл. оГД}$), 6 — в закрытом ($b_{хл. оМД}$). Литологические колонки приведены согласно [Эдер и др., 2019].

са [Конторович и др., 1967, 1975; и др.], следовательно, значительная часть битумоидов открытых пор покинула материнские породы в результате первичной миграции. На территории исследования открыт ряд крупных нефтяных месторождений (в том числе одноименные изучаемым площадям Повховское, Дружное, Южно-Ягунское нефтяные месторождения), в которых основная масса запасов нефти, генетически связанных с ОВ баженовской свиты, сосредоточена в неомских резервуарах [Конторович и др., 1975]. Кроме того, часть летучих фракций, заполнявших поровое пространство, была утеряна при бурении и подъеме керна на поверхность.

Соотношение битумоидов открытых и закрытых пор подтверждают и пиролитические показатели, измеренные до и после извлечения (экстракции) битумоидов (рис. 4). Значения показателя S_1 после экстракции битумоидов из открытого порового пространства снизились незначительно (примерно в 1.5 раза), в то время как после удаления битумоидов закрытых пор показания S_1 уменьшились в 3 раза. Это означает, что большая часть образованного органическим веществом баженовской свиты углеводородов находится в основном не в открытом поровом пространстве пород, а запечатана в относительно более изолированных условиях закрытых пор. Показатель S_2 после удаления битумоидов также снижается, но по сравнению с S_1 в значительно меньшей степени. В основном изменения показателя S_2 отмечаются в верхней и средней частях разреза баженовской свиты — в микститах кероген-кремнистых и силицитах керогеновых, в которых ΔS_2 может достигать 18 мгУВ/г породы и связывается с удалением из породы в составе экстрактов высокомолекулярных смолистых компонентов, входящих в пик S_2 [Конторович и др., 1986; Дахнова и др., 2007].

Групповой состав битумоидов открытых пор близок к групповому составу нефтей (содержание УВ до 80 % на битумоид, асфальтенов около 10 %). В битумоидах закрытых пор содержание углеводородов изменяется от 40 до 60 % на битумоид, концентрации асфальтенов — до 20 % (рис. 5). Содержание углеводородов в битумоидах открытых пор выше, чем в битумоидах закрытых пор в 1.3—1.4 раза, содержание смол и асфальтенов ниже в 1.2—1.3 и 2.0—3.5 раза соответственно. Такое распределение

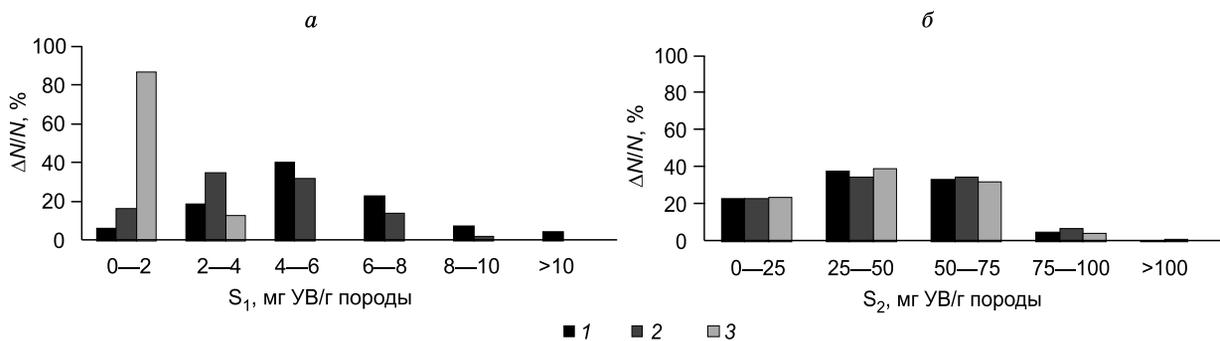


Рис. 4. Изменение значений пиролитических показателей S_1 (а) и S_2 (б) после экстракции битумоидов из открытого и закрытого порового пространства пород баженовской свиты Северо-Сургутского района.

$\Delta N/N$ — частота встречаемости образцов, где N — общее количество образцов, а ΔN — количество образцов в заданном интервале значений. 1 — до экстракции битумоидов, 2 — после экстракции битумоидов открытых пор, 3 — после экстракции битумоидов закрытых пор.

битумоидных компонентов объясняется «хроматографическим эффектом» первичной миграции, по А.Э. Конторовичу и А.А. Трофимуку [Трофимук, Конторович, 1965; Вышемирский и др., 1971], согласно которому углеводородами и другими подвижными компонентами обогащаются при эмиграции аллохтонные и параавтохтонные битумоиды, к ним относятся битумоиды открытых пор. Та часть битумоидов, которая не участвует в первичной миграции (остаточные битумоиды, в нашем случае битумоиды закрытых пор), должна остаточным образом обогащаться компонентами с низкой миграционной способностью — смолами и асфальтенами по сравнению с углеводородами, а также нафтеново-ароматическими углеводородами по сравнению с метаново-нафтеновыми.

Для изученной коллекции соотношение насыщенных (Me-Nn) углеводородов к ароматическим (Nn-Ar) и отношение смолы/асфальтены в битумоидах открытых и закрытых пор являются информативными показателями перераспределения подвижных компонентов битумоидов в ходе адсорбционно-хроматографического фракционирования.

Соотношение Me-Nn/Nn-Ar в битумоидах открытых пор из образцов Новоортьягунской и Повховской площадей достигает 4—5, из Дружной и Южно-Ягунской площадей значения Me-Nn/Nn-Ar не превышают 3. В битумоидах закрытых пор возрастает концентрация ароматических углеводородов,

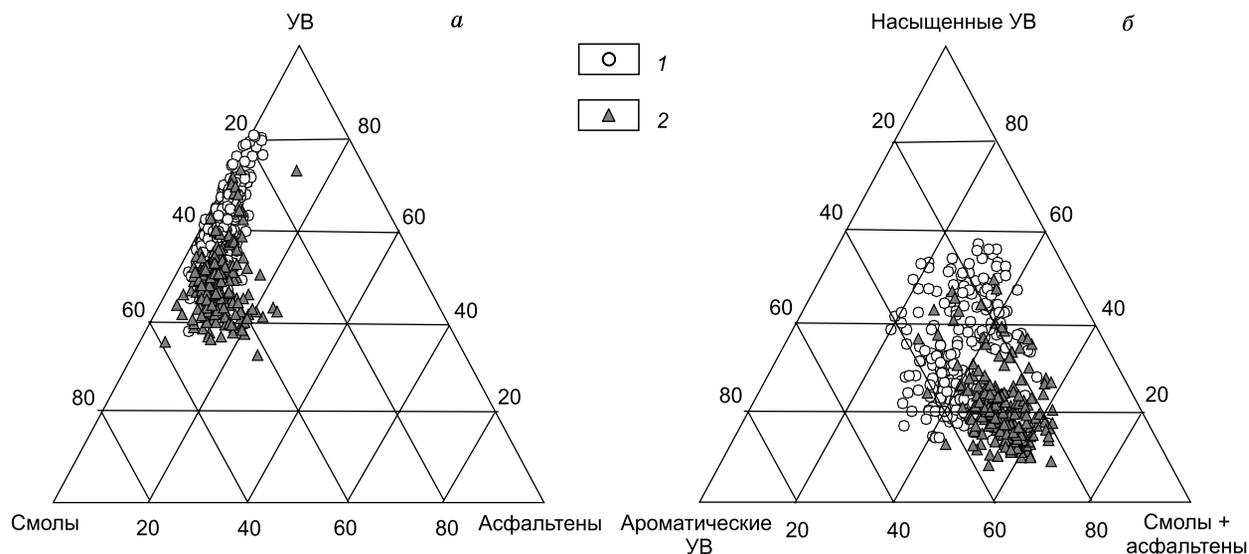


Рис. 5. Тригонограммы группового состава битумоидов открытых и закрытых пор баженовской свиты Северо-Сургутского района:

а — УВ (насыщенные + ароматические), смолы, асфальтены, б — насыщенные УВ, ароматические УВ и Σ смолы + асфальтены. 1 — битумоиды открытых пор, 2 — битумоиды закрытых пор.

соотношение Me-Nn/Nn-Ar значительно ниже: в образцах Повховской площади < 3 , на остальных площадях < 2 .

Среди литотипов пород баженовской свиты повышенные значения (≥ 1) отношения Me-Nn/Nn-Ar отмечаются в единичных прослоях карбонатов, кероген-карбонатных и кероген-кремнистых микститов «кокколитовой пачки» в верхней части баженовской свиты (Южно-Ягунская, Дружная, Повховская площади), а также в нижней части разреза свиты — в карбонатах слоя КС (Южно-Ягунская), в прослое силицитов-радиоляритов (Дружная, Повховская) и развитых по ним вторичных карбонатах (Повховская). На Новоортьягунской площади весь разрез характеризуется высокими (≥ 0.9) значениями отношения Me-Nn/Nn-Ar, а относительно повышенные значения (2.5—5.0) установлены в нижней части разреза, где он сложен керогеновыми силицитами с единичными прослоями кероген-кремнистых микститов.

Соотношение смолы/асфальтены в битумоидах открытых пор изменяется от 2.5 до 30 (в единичных образцах до 60), что в среднем в 1.5—2.0 раза выше по сравнению с битумоидами закрытых пор, где значения этого параметра варьируют от 1 до 15 (в единичных образцах до 30). Наименьшие значения отношения смолы/асфальтены установлены на Дружной площади. В битумоидах открытых пор отношение смолы/асфальтены изменяется от 3 до 12 (в среднем 5.5), в битумоидах закрытых пор — от 1 до 9 (в среднем 3). В битумоидах Южно-Ягунской и Повховской площадей значения этого параметра варьируют от 2.5—3.0 до 20—25 в битумоидах открытых пор и от 1.0—1.5 до 15 в битумоидах закрытых пор. На Новоортьягунской площади значения отношения смолы/асфальтены наиболее высокие, в битумоидах открытых пор — 4.5—30 (в среднем 9.5), в битумоидах закрытых пор — 3—17 (в среднем 6). По литотипам распределение отношения смолы/асфальтены в целом повторяет тренд распределения соотношения насыщенных и ароматических УВ, подтверждая факт перераспределения наиболее миграционно-способных компонентов битумоида из закрытых пор в открытые в ходе первичной миграции.

Влияние первично-миграционных процессов на «биомаркерные» показатели. Анализ результатов распределения индивидуальных соединений насыщенной и ароматической фракций битумоидов, опубликованных ранее в работах [Костырева, Сотнич, 2017; Сотнич, Костырева, 2021], показал, что, несмотря на генетическое единство, в составе битумоидов открытых и закрытых пор отмечается различие на молекулярном уровне. Главным образом это отражается на показателях, основанных на распределении алканов ($(n-C_{17} + n-C_{18})/(Pr + Ph)$), этилхолестанов ($(\beta\beta 20S + 20R)/\alpha\alpha 20R C_{29}$ и $\alpha\alpha 20S/\alpha\alpha 20R C_{29}$), фенантронов (ФИ = $2MФ/Ф$, МРІ = $1.5 \cdot (2MФ + 3MФ)/(0.69 \cdot Ф + 1MФ + 9MФ)$), РР-1 = $1MФ/(2MФ + 3MФ)$), дибензотиофенов (4-МДБТ/1-МДБТ, ДБТИ = $(2 + 3MДБТ)/ДБТ$) и характеризующих степень зрелости ОВ. Значения этих параметров ниже и имеют меньшую дисперсию в битумоидах закрытых пор по сравнению с битумоидами из открытого порового пространства пород [Сотнич, Костырева, 2021]. Наиболее контрастно эта тенденция проявляется для ОВ Повховской площади: значения отношения $(n-C_{17} + n-C_{18})/(Pr + Ph)$ в битумоидах открытых пор > 2.5 , в битумоидах закрытых пор снижаются до 2.0—2.5; фенантроновый индекс в битумоидах закрытых пор изменяется от 0.3 до 0.6, в битумоидах открытых пор достигает 0.8; дибензотиофеновый индекс (ДБТИ) в закрытых порах не превышает 1.0, а в открытых порах достигает 1.4. Ранее такой эффект был отмечен при сравнении «связанного» и «легкорастворимого» битумоидов баженовской свиты Салымского месторождения [Снимщикова и др., 1989].

Различие значений показателей зрелости ОВ в битумоидах открытых и закрытых пор может объясняться влиянием несколькими разными по механизму, разнесенными во времени и пространстве процессами [Гончаров, 2000]. Во-первых, это влияние миграционных процессов, которые в первую очередь сказываются на битумоидах открытых пор. Значит при перераспределении углеводородов из закрытого порового пространства в открытое мигрирует наиболее преобразованная, легкая и миграционно-способная часть битумоида. Во-вторых, многостадийность процессов генерации [Гончаров, 2000; Костенко, 2014], т. е. углеводороды, находящиеся в открытых порах, являются результатом более раннего этапа генерации микронепти, чем углеводороды закрытых пор. Таким образом, открытые поры являются «транзитной зоной», куда собираются флюиды разных стадий генерации, что находит отражение в молекулярных показателях зрелости органического вещества.

Определение «истинной» пористости по содержанию битумоидов открытых пор. Разработанная в ИНГГ СО РАН методика позволяет определять открытую пористость пород двумя способами [Конторович и др., 20186]. Во-первых, аналитически в образцах регулярной формы (кубиках и цилиндрах), как общепринято по ГОСТу 26450.0-85, 26450.1-85, а также в образцах грубого дробления (по методике ИНГГ СО РАН), что увеличивает количество определений и повышает достоверность. При этом стандартная схема была изменена с учетом литологии и нефтенасыщенности объекта. После сушки образцов сначала была замерена пористость пород (по гептану) до экстракции битумоидов $K_{II}^{д/3}$, далее образцы подвергались экстракции, снова высушивались, затем проводились повторные измерения пористости ($K_{II}^{н/3}$). Во-вторых, открытая пористость ($m_{откр.}$) может быть определена по объему порового

пространства, занимаемому «свободной микронепфтью», т. е. битумоидами открытых пор с поправкой на усадку нефти открытых пор при бурении и подъеме керна.

Анализ изменения значений открытой пористости пород баженовской свиты Северо-Сургутского района до ($K_n^{n/3} = 0.1—10.2\%$) и после экстракции ($K_n^{n/3} = 0.1—15.6\%$) показал, что после извлечения битумоидов в части образцов (~20% коллекции) пористость либо осталась на том же уровне, либо уменьшилась, т. е. объем порового пространства, который должен освободиться после удаления флюида не образовался, а наоборот, сократился. Это объясняется тем, что пустотное пространство пород баженовской свиты (как пустотность по всей матрице, так и седиментогенно-катагенетическая трещиноватость (сланцеватость, «листоватость»)) плохо закреплено каркасом породы и частично или полностью «схлопывается» при потере породой флюидов и уплотнении под действием геостатического давления [Конторович и др., 2018б]. Такое же «схлопывание» пустотности могло происходить и, несомненно, происходило в образцах, пористость которых после экстракции увеличилась. Это означает, определения пористости пород баженовской свиты традиционными методами не являются достоверными.

Единственный способ достоверно установить пористость пород баженовской свиты, согласно методике ИНГГ СО РАН, это определять пористость по насыщению пород естественным природным флюидом — битумоидом [Конторович и др., 2018б]. Высокое содержание битумоидов в породах баженовской свиты делает их гидрофобными, поэтому поровая вода (седиментогенная, кристаллическая, «возрожденная»), элизионная вода, а также «возрожденная» вода, образующая при катагенезе из гидроксильных групп органического вещества) при уплотнении не задерживается и покидает баженовскую свиту. Принимая, что поровое пространство баженовской свиты не содержит остаточной воды и полностью заполнено битумоидами (нефтью), можно по их массе и плотности битумоидов открытых пор определить объем, который они занимали в породе в пластовых условиях и по этой величине определить пористость пород (1):

$$m_{\text{откр}} = 100 \cdot \alpha \cdot b_{\text{хл огд}} / \rho_{\text{пл}} \cdot V_{\text{обр}}, \quad (1)$$

где $b_{\text{хл огд}}$ — масса (выход) извлеченного из открытых пор битумоида, характеризующего «свободную микронепфть», $\rho_{\text{пл}}$ — плотность нефти баженовской свиты в пластовых условиях, $V_{\text{обр}}$ — объем образца, который определяется процедурой приготовления образцов.

При этом необходимо иметь в виду, что экстрагируемый из открытых пор битумоид по массе и объему отличается от нафтидов, заполнявших открытые поры в природных условиях. Это происходит по двум причинам: 1) при бурении и подъеме керна на поверхность происходит дегазация флюидов и потеря ими конденсатных низкокипящих фракций жидких углеводородов (усадка нефти); 2) при экстракции битумоидов из образцов, отгонке растворителей и сушке битумоида в значительной степени или полностью теряются углеводороды, кипящие при температуре ниже 270 °С. Поэтому в аналитически определенную массу битумоида открытых пор, согласно методике ИНГГ СО РАН, необходимо сначала ввести поправку за аналитические потери, а затем поправку за коэффициент усадки нефти.

Открытая пористость пород баженовской свиты ($m_{\text{откр}}$), рассчитанная по методике ИНГГ СО РАН, в изученных разрезах изменяется от 0.1 до 12.5% (в среднем 2.1%). Повышенные значения открытой пористости (> 4%) зафиксированы как в верхней, так и нижней части разреза в полном соответствии с интервалами повышенных значений выходов битумоидов открытых пор ($b_{\text{хл огд}}$), битумоидного коэффициента ($\beta_{\text{хл}}$), индекса продуктивности (PI) и показателя $S_1/C_{\text{орг}}$.

Таким образом, детальные геохимические исследования органического вещества баженовской свиты в комплексе с литологическими и петрофизическими исследованиями позволяют с высокой точностью установить в разрезе свиты нефтенасыщенные интервалы, что повышает достоверность оценки геологических ресурсов нефти баженовской свиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Северо-Сургутском районе Западной Сибири нафтиды баженовской свиты, не эмигрировавшие в вышележащие берриас-нижнеаптские резервуары и оставшиеся на сегодняшний день в свите, находятся преимущественно в закрытом поровом пространстве пород. Среди литотипов баженовской свиты максимальные концентрации битумоидов закрытых пор ($\geq 1.5\%$ на породу) отмечаются в верхней части разреза, где распространены керогеновые, кероген-кремнистые, кероген-глинисто-кремнистые и кероген-карбонатные микститы.

«Свободная микронепфть», состоящая из наиболее подвижных фракций битумоидов, в наибольших количествах находится преимущественно в открытом поровом пространстве карбонатов ($\beta_{\text{хл}}$ до 70%, в среднем 30%) и силицитов (до 40%, в среднем 20%) в нижней части изученных разрезов баженовской свиты; именно она при благоприятных условиях формирует залежи нефти в баженовской свите. В остальных литотипах баженовской свиты содержание битумоидов в открытых порах составля-

ет в среднем лишь 20 % от общей концентрации нафтидов в породе, что следует учитывать при оценке геологических ресурсов нефти в баженовской свите.

Анализ группового, углеводородного и молекулярного составов битумоидов открытых и закрытых пор подтверждает влияние первичных миграционных процессов на состав битумоидов, которые в процессе нафтидогенеза претерпевают следующие этапы: генерация флюидов органическим веществом → заполнение порового пространства микропор, часть из которых имеет затрудненный отток в макропоры (битумоиды закрытых пор) → перераспределение битумоидов в открытое поровое пространство нефтематеринской породы → эмиграция свободной микронепти в коллектор (открытые поры).

Работа выполнена при поддержке проектов ФНИ № FWZZ-2022-0012 «Цифровые геолого-геофизические и петрофизические модели осадочных комплексов с трудноизвлекаемыми запасами нефти в Западной и Восточной Сибири как резерв для прироста запасов и добычи» и FWZZ-2022-0011 «Органическая геохимия нефтепроизводящих пород и нафтидов, геохимические предпосылки нефтегазоносности протерозойских и фанерозойских осадочных бассейнов Сибири и Республики Саха (Якутия), включая Арктическую зону».

ЛИТЕРАТУРА

Булынникова С.П., Гольберт А.В., Климова И.Г., Конторович А.Э., Полякова И.Д., Решетникова М.А., Турбина А.С. Палеобиофации нефтегазоносных волжских и неокомских отложений Западно-Сибирской плиты // М., Недра, 1978, 87 с. (Тр. СНИИГГиМС, вып. 248).

Вышемирский В.С., Конторович А.Э., Трофимук А.А. Миграция рассеянных битумоидов. Новосибирск, Наука, 1971, 168 с.

Гончаров И.В. Об оценке катагенеза нефтей // Изв. Томского политехнического университета, 2000, т. 303, № 1, с. 182—188.

Гурари Ф.Г. О поисках нефти и газа в мезозое Западно-Сибирской низменности // Труды СНИИГГиМС. Л., Гостоптехиздат, 1961, вып. 17, с. 15—31.

Гурари Ф.Г. Доманикиты и их нефтегазоносность // Советская геология, 1981, № 11, с. 3—12.

Гурари Ф.Г., Гурари И.Ф. Формирование залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты Западной Сибири // Геология нефти и газа, 1974, № 5, с. 36—40.

Дахнова М.В., Назарова Е.С., Славкин В.С., Колосков В.Н., Алексеев А.Д. Геохимические методы в решении задач, связанных с освоением залежей нефти в баженовской свите на западе Широкого Приобья // Геология нефти и газа, 2007, № 6, с. 39—43.

Зубков М.Ю., Сонич В.П., Зарипов О.Г. Геологические и литолого-геохимические критерии промышленной нефтеносности отложений баженовской свиты Западной Сибири // Проблемы нефтеносности баженовской свиты Западной Сибири, М., ИГиРГИ, 1986, с. 5—14.

Калмыков Г.А., Балущкина Н.С. Модель нефтенасыщенности порового пространства пород баженовской свиты Западной Сибири и ее использование для оценки ресурсного потенциала. М., Геос, 2017, 247 с.

Конторович А.Э. Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности. М., Недра, 1976, 250 с. (Тр. СНИИГГиМС, вып. 229).

Конторович А.Э., Винокур Б.Г. «Холодная» и «ультразвуковая» экстракции битумоидов из пород // Вопросы литологии и геохимии Сибири. Л., Недра, 1967, с. 195—207. (Тр. СНИИГГиМС, вып. 46).

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. Нефтепроизводящие толщи и условия образования нефти в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности. Л., Недра, 1967, 223 с.

Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К., Сурков В.С., Трофимук А.А., Эрвье Ю.Г. Геология нефти и газа Западной Сибири. М., Недра, 1975, 680 с.

Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Фомичев А.С., Шведенков Г.Ю. Пиролиз как метод изучения нефтегазогенерационного потенциала материнских пород // Геология нефти и газа, 1986, № 12, с. 36—41.

Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Казаненков В.А., Конторович В.А., Костырева Е.А., Пonomарева Е.В., Рыжкова С.В., Ян П.А. Баженовская свита — главный источник ресурсов нетрадиционной нефти в России // Георесурсы, геознергетика, геополитика, 2014, № 2 (10), с. 1—8.

Конторович А.Э., Ян П.А., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Эдер В.Г. Классификация пород баженовской свиты // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (11), с. 2034—2043.

Конторович А.Э., Костырева Е.А., Родякин С.В., Сотнич И.С., Ян П.А. Геохимия битумоидов баженовской свиты // Геология нефти и газа, 2018а, № 2, с. 79—88.

Конторович А.Э., Родякин С.В., Бурштейн Л.М., Костырева Е.А., Рыжкова С.В., Ян П.А. Пористость и нефтенасыщенность пород баженовской свиты // Геология нефти и газа, 20186, № 5, с. 61—73.

Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Лившиц В.Р., Рыжкова С.В. Главные направления развития нефтяного комплекса России в первой половине XXI века // Вестник РАН, 2019, т. 89, № 11, с. 1095—1104.

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

Костенко О.В. Блокирующий характер распределения высокомолекулярных соединений битумоида в поровой системе баженовской свиты // Нефтегазовая геология. Теория и практика: электрон. науч. журнал, 2014, т. 9, № 1, с. 1—13.

Костырева Е.А., Сотнич И.С. Геохимия органического вещества баженовской свиты севера Хантейской антеклизы // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (3—4), с. 533—543.

Нестеров И.И. Новый тип коллектора нефти и газа // Геология нефти и газа, 1979, № 9, с. 26—29.

Нестеров И.И. Строение и нефтегазоносность баженинов Западной Сибири. Тюмень, 1985, 177 с.

Нестеров И.И., Ушатинский И.Н. Баженовская свита Среднего Приобья // Советская геология, 1986, № 2, с. 32—39.

Нестеров И.И., Ушатинский И.Н., Малыхин А.Я., Ставицкий Б.П., Пьянков Б.Н. Нефтегазоносность глинистых пород Западной Сибири. М., Недра, 1987, 256 с.

Новиков Р.Г., Салманов Ф.К., Тяг А.В. Перспективы открытия крупных залежей нефти в трещиноватых аргиллитах баженовской свиты // Нефть и газ Тюмени, 1970, вып. 7, с. 1—3.

Скворцов М.Б., Немова В.Д., Дахнова М.В., Копилевич Е.А., Сурова Н.Д., Кирсанов А.М., Можегова С.В. Новые методические подходы к оценке ресурсов нефти в отложениях баженовской свиты // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (2), с. 217—229.

Снимщикова Е.В., Трофимова И.А., Руднева Н.М., Северинова Л.П. Легкорастворимые и связанные битумоиды баженовской свиты // Геохимические проблемы оценки нефтегазоносности. М., ИГиРГИ, 1989, с. 122—127.

Сотнич И.С., Костырева Е.А. Ароматические соединения в битумоидах баженовской свиты севера Хантейской гемиантеклизы // Георесурсы, 2021, т. 23, № 1, с. 42—51.

Трофимук А.А., Конторович А.Э. Некоторые вопросы теории органического происхождения нефти и проблема диагностики нефтепроизводящих толщ // Геология и геофизика, 1965 (12), с. 3—14.

Успенский В.А., Родионова К.Ф., Горская А.И., Шишкова А.П. Руководство по анализу битумов и рассеянного органического вещества горных пород (для лабораторий геолого-разведочных организаций). Л., Недра, 1966, 316 с.

Успенский В.А., Радченко О.А., Горская А.И., Шишкова А.П. Методы битуминологических исследований. Задачи исследований и пути их разработки. Л., Недра, 1975, 319 с.

Эдер В.Г., Костырева Е.А., Юрченко А.Ю., Балушкина Н.С., Сотнич И.С., Козлова Е.В., Замирайлова А.Г., Савченко Н.И. Новые данные о литологии, органической геохимии и условиях формирования баженовской свиты Западной Сибири // Георесурсы, 2019, т. 21, № 2, с. 129—142.