

*Е. А. Костырева<sup>1</sup>✉, И.С. Сотнич<sup>1</sup>*

## **Особенности фракционирования углерода в органическом веществе баженовской свиты юго-востока Западной Сибири**

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: KostyrevaEA@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Цель данной работы – на основе сравнительного анализа изотопного состава углерода (ИСУ) органического вещества и группового состава битумоидов баженовской свиты выявить особенности фракционирования углерода органического вещества при миграционных процессах. Установлено, что хлороформенные экстракты (и аллохтонные, и автохтонные), в среднем, более обогащены изотопом C<sup>12</sup> по сравнению с органическим веществом и керогеном ((-31,1) против (-30,5)‰). Такая закономерность наблюдается как в целом, так и по отдельным площадям. Показано, что несмотря на соблюдение модели хроматографической дифференциации битумоидов в ходе миграции классическая схема фракционирования изотопов в зависимости от полярности групп соединений органического вещества наблюдается не всегда, что, по-видимому, объясняется невысокой преобразованностью органического вещества.

**Ключевые слова:** изотопный состав углерода, органическое вещество, хлороформенный экстракт (битумоид), баженовская свита, Западная Сибирь

*Е. А. Kostyreva<sup>1</sup>✉, I. S. Sotnich<sup>1</sup>*

## **Features of carbon fractionation in the organic matter from the Bazhenov formation of the south-eastern Western Siberia**

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: KostyrevaEA@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** The study aims to identify the characteristics of carbon fractionation during migration processes through a comparative analysis of the isotopic composition of organic matter and the group composition of bitumoids (source rock extracts) of the Bazhenov Formation. The chloroform extracts (both allochthonous and autochthonous) has been established to be, on average, more enriched in the C<sup>12</sup> isotope compared to organic matter and kerogen ((-31,1) versus (-30,5)‰). This trend is observed both in general and for individual areas. It is shown that, although the model of chromatographic differentiation of bitumoids during migration is followed, the classical scheme of isotopic fractionation according to the polarity of the organic matter groups does not always hold. This seems to be explained by the low thermal maturity of the organic matter.

**Keywords:** carbon isotope composition, organic matter, source rock extract (bitumoid), Bazhenov formation, Western Siberia

### ***Введение***

Одно из направлений органической геохимии – это геохимия изотопного состава углерода в нефтях и органическом веществе. В нашей стране основы этого

направления были заложены академиком РАН Галимовым Э. М. [Галимов, 1973, 1981, 2006, Galimov, 2006 и др.]. Результаты исследования изотопного состава углерода органического вещества Сибирского региона опубликованы в работах Конторовича А.Э., Богородской Л.И., Верховской Н.А., Вышемирского В.С., Гольшева С.И., Падалко Н.Л., Тимошиной И.Д. и др. Закономерности фракционирования изотопов углерода в процессах фотосинтеза, диагенеза и катагенеза также выявляют генетические связи нефтидов с органическим веществом и являются доказательством эволюции нефтидогенеза, что предопределяет актуальность настоящей статьи [Вышемирский и др. 1971, Галимов, 1973, 1981, 2006, Galimov, 2006, Гольшев 1984, Гольшев и др., 1990, Конторович и др., 1985, 1985а, 1986, Конторович, 2004, Фурсенко и др., 2024 и др.]. Цель данной работы – на основе сравнительного анализа изотопного состава углерода органического вещества и группового состава битумоидов в баженовской свите выявить особенности фракционирования углерода при миграционных процессах.

### *Методы и материалы*

Материал исследования включает выборку из 35 образцов пород баженовской свиты по 8 площадям (Арчинская, Горстовая, Западно-Квензерская, Казанская, Межовская, Ракитинская, Толпаровская, Южно-Майская) в которых было изучено органическое вещество по методике, разработанной в ИНГГ СО РАН под руководством академика РАН Конторовича А.Э. [Конторович и др., 2018]. Методика позволяет разделить битумоиды из баженовской свиты уже на этапе экстракции хлороформом на аллохтонные ( $B^{ОГД}$  и  $B^{ОРФ}$ ) из образцов открытых пор (образцов регулярной формы – ОРФ и грубого дробления – ОГД) и остаточные автохтонные ( $B^{ОМД}$ ) из закрытых пор (образцов мелкого дробления – ОМД) [Конторович и др., 2018]. В рамках данной работы в ИНГГ СО РАН под руководством к.х.н. Падалко Н.Л. дополнительно определен изотопный состав углерода ( $\delta^{13}C$ , в ‰) органического вещества пород (31 обр.), керогена (4 обр.), битумоидов ( $B^{ОРФ}$  - 15 обр.,  $B^{ОГД}$  - 34 обр.,  $B^{ОМД}$  - 34 обр.), а также 18 фракций 7 битумоидов из ОРФ Арчинской площади и 1 хлороформенного экстракта Казанской по методике МВИ № 01.09.21 «Методика выполнения измерений смещения изотопного состава углерода в пробах нефти и ее компонентов, продовольственном сырье, пищевых продуктах, объектах животного и растительного происхождения методом масс-спектрометрии», разработанной и аттестованной Химическим факультетом СПбГУ, зарегистрирована под номером ФР.1.31.2010.07131. Результаты: **по углероду** приведены к международному стандарту PDB, который представляет собой карбонат кальция белемнита позднемелового возраста из формации Пи-Ди (Южная Каролина).

### *Результаты*

Содержание органического углерода в изучаемой коллекции повышенное и высокое ( $5,0 \div 17,3$  %, при среднем  $9,9\%$ ). Остаточный нефтегенерационный потенциал баженовской свиты (кероген II типа) в  $85\%$  образцов отличного качества ( $S_1 = 3,0-8,1$ ,  $S_2 = 30,5-124,5$  мг УВ/г породы,  $HI=446-718$  мг УВ/г  $C_{орг}$ ,  $PI=0,04-$

0,21). Значения температуры максимального выхода УВ изменяются от 421-423°C и 421-425°C в Арчинской и Южно-Майской площадях до 440-443 °C в Западно-Квензерской, что соответствует по [Гончаров и др., 2013] стадиям катагенеза от ПК<sub>3</sub>-МК<sub>1</sub><sup>1</sup> до МК<sub>1</sub><sup>2</sup> и подтверждается углепетрографическими определениями и значениями биомаркерных параметров [Фомин, 2011, Конторович и др., 2018, Сотнич, Костырева, 2024].

Выход аллохтонных битумоидов в большинстве образцов из ОГД меньше 0,5% (среднее 0,25%), а из ОРФ больше 0,5%. Содержание остаточных автохтонных битумоидов сопоставимо с Б<sup>ОРФ</sup> (среднее 0,75% против 0,71% соответственно). В групповом составе аллохтонных битумоидов в максимальной концентрации находятся углеводороды (до 73,7-77,0% в Б<sup>ОГД</sup> и 77,5-82,0% в Б<sup>ОРФ</sup>). Значения отношения насыщенные УВ к ароматическим изменяются от 0,9 до 3,5 при среднем 1,7 в Б<sup>ОРФ</sup> и от 0,8 до 3,0 при среднем 1,5 в Б<sup>ОГД</sup>. Среди асфальтово-смолистых компонентов при доминировании смол в 5,4-81,2 раза на асфальтены приходится не более 5,4%.

В остаточных автохтонных битумоидах концентрация УВ изменяется от 23,5 до 65,9% при среднем 47,6%. В их составе значения отношения насыщенные УВ к ароматическим варьируют от 0,6 до 4,1 при среднем 1,2. Концентрация асфальтенов в Б<sup>ОМД</sup> достигает 25,0 % при среднем 7,3%. Значения отношения смолы к асфальтенам изменяются на порядок (2-20).

В целом, как видно из рис. 1, наблюдается эффект, описанной в работе [Вышемирский и др., 1971] модели хроматографической дифференциации битумоидов в ходе миграции.

Изотопный состав углерода органического вещества баженовской свиты юго-востока Западной Сибири, как декарбонизированного ((-28,7)-(-32,8) ‰), так и для керогена ((-30,3)-(-30,5) ‰) и битумоидов ((-30,1)-(-31,9) ‰) характерен для аквагенного генотипа ОВ [Богородская, Конторович, Ларичев, 2005, Галимов, 1973, 1981, 2006, Голышев и др., 1990, Конторович и др., 1985, 1985а, 1986, Конторович, 2004, Конторович и др., 2018, Фурсенко и др., 2024 и др.] (табл.1). Сравнительный анализ средних значений  $\delta^{13}\text{C}$ , в ‰ показал, что в аквагенном ОВ на стадиях ПК<sub>3</sub>-МК<sub>1</sub><sup>2</sup> из разрезов 6 из 7 скважин наблюдается облегчение изотопного анализа от керогена (-30,4) и декарбонизированного ОВ ((-29,9)-(-30,9)) к битумоидам, как аллохтонным ((-30,3)-(-31,5)), так и автохтонным ((-30,7)-(-31,3)) (табл. 1).

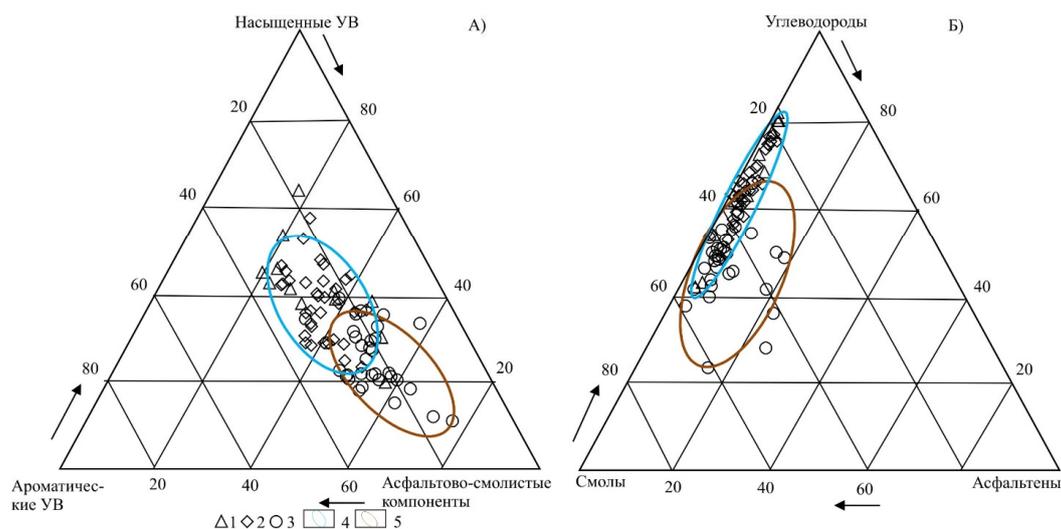


Рис. 1 Тригонограммы группового состава аллохтонных и автохтонных битумоидов баженовской свиты: А – насыщенные УВ – ароматические УВ – асфальтово-смолистые компоненты; Б – углеводороды – смолы – асфальтены. 1 –  $B^{OPF}$ , 2 –  $B^{OGD}$ , 3 –  $B^{OMD}$ , области битумоидов: 4 – аллохтонных ( $B^{OGD} + B^{OPF}$ ), 5 – автохтонных ( $B^{OMD}$ ).

Таблица 1

Значения изотопного состава углерода органического вещества (декарбонизированного (НО), керогена и битумоидов)

Скважина	Стадия катагенеза [Фомин, 2011, Конторович и др., 2018, Сотнич, Костырева 2024 ]	$\delta^{13}C$ , в ‰			
		НО	$B^{OPF}$	$B^{OGD}$	$B^{OMD}$
Арчинская-47	ПК <sub>3</sub> -МК <sub>1</sub> <sup>1</sup>	(-29,8)-(-30,6)/ -30,2(4)	(-31,5)-(-31,8)/ -31,6(3)	(-30,5)-(-31,1)/ -30,8(3)	(-31,0)-(-31,3)/ -31,2(4)
Казанская-16	ПК <sub>3</sub> -МК <sub>1</sub> <sup>1</sup>	-31,2	-	-	-
Южно-Майская-413	ПК <sub>3</sub> -МК <sub>1</sub> <sup>1</sup>	(-30,4)-(-32,8)/ -32,0(5)	-	(-30,1)-(-31,0)/ -30,7(6)	(-30,2)-(-31,0)/ -30,6(6)
Ракитинская-4	МК <sub>1</sub> <sup>1</sup> -МК <sub>1</sub> <sup>2</sup>	(-30,0)-(-30,4)/ -30,3 (4)	-	(-30,6)-(-31,3)/ -31,0(4)	(-31,0)-(-31,5)/ -31,2(4)

Толпаровская-2	МК <sub>1</sub> <sup>1</sup> -МК <sub>1</sub> <sup>2</sup>	(-30,7)-(-31,3)/ -30,9(5)	-	(-31,0)-(-31,8)/ -31,4(5)	(-31,2)-(-31,8)/ -31,3(5)
Горстовая-91	МК <sub>1</sub> <sup>1</sup> -МК <sub>1</sub> <sup>2</sup>	(-29,2)-(-30,5)/ -29,9(5)	(-30,9)-(-31,5)/ -31,2(2)	(-31,0)-(-31,8)/ -31,3(5)	(-30,9)-(-31,5)/ -31,2(4)
Западно-Квензерская-4	МК <sub>1</sub> <sup>2</sup>	(-29,9)-(-30,4)/ -30,1(3) -30,4 (2)*	(-30,5)-(-31,1)/ -30,9(5)	(-30,5)-(-31,2)/ -30,9(5)	(-30,6)-(-30,8)/ -30,7(4)
Межовская-11	МК <sub>1</sub> <sup>2</sup>	(-28,7)-(-30,8)/ -29,9(5) (-30,3)-(-30,5)/ -30,4(2)*	-30,3	(-31,1)-(-31,9)/ -31,5(6)	(-30,4)-(-31,5)/ -31,1(6)
среднее		(-28,7)-(-32,8)/ -30,5(32) (-30,3)-(-30,5)/ -30,4(4)*	(-30,3)-(-31,8)/ -31,1(11)	(-30,1)-(-31,9)/ -31,1(34)	(-30,2)-(-31,8)/ -31,0(33)

\*- изотопный состав керогена

Рассмотрим более детально фракционирование изотопов углерода ОВ на отдельных площадях в зависимости от степени его преобразованности, состава и миграционных процессов (рис. 2-3, табл. 1). На всех площадях при соблюдении модели хроматографической дифференциации битумоидов в ходе миграции фракционирование изотопов углерода наблюдается не всегда (табл. 1, рис. 1, 2). С увеличением степени преобразованности в аллохтонных битумоидах, как в Б<sup>ОРФ</sup> так и в Б<sup>ОГД</sup> увеличиваются содержания УВ (с 43,0% до 82,0% и с 58,3 до 77,0% соответственно) и значения отношения насыщенные структуры к ароматическим (с 1,1 до 3,5 и с 0,96 до 1,5 соответственно). В составе асфальтово-смолистых компонентов концентрация асфальтенов, не превышая 5,4% в аллохтонных битумоидах, увеличивается в остаточных автохтонных с 7,3 (градации ПК<sub>3</sub>-МК<sub>1</sub><sup>1</sup>) до 25,0% (МК<sub>1</sub><sup>2</sup>). Галимовым Э.М. была установлена закономерность: утяжеление изотопов углерода с ростом полярности соединений в ряду: насыщенные УВ→ароматические УВ→смолы→асфальтены. В изученной коллекции мы наблюдаем такую закономерность на Казанской площади. На Арчинской, где были определены значения  $\delta^{13}\text{C}$  только насыщенной и ароматической фракции Б<sup>ОРФ</sup> она сохраняется в одном из 7 образцов (рис. 2). Как видно из таблицы 1 разброс значений  $\delta^{13}\text{C}$ , как в аллохтонных, так и в автохтонных битумоидах по площадям не превышает 0,9‰. Сравнительный анализ значений  $\delta^{13}\text{C}$  в Б<sup>ОГД</sup> и Б<sup>ОМД</sup> по отдельным образцам на изучаемой территории показал, что значимый разброс значений (> 0,5‰) только в 6 образцах, из них по 2 образца на Межовской (2400,7; 2401,5м), Арчинской (2618,06; 2619,99м) и по одному на Горстовой (2213,47м), Ракитинской (2443,55м) площадях. Утяжеление углерода отмечается на

Межовской и Горстовой (с (-31,8)-(-31,9) до (-30,4)-(-30,8)‰ и с (-31,8) до (-31,0)‰ соответственно) в автохтонных битумоидах, а на Арчинской и Ракитинской (с (-31,3) до (-30,5)-(-30,7) ‰ и с (-31,1) до (-30,6) ‰ соответственно) в аллохтонных. На рисунке 3 приведены примеры группового состава и значений  $\delta^{13}\text{C}$  аллохтонных и автохтонных битумоидов разной степени преобразованности.

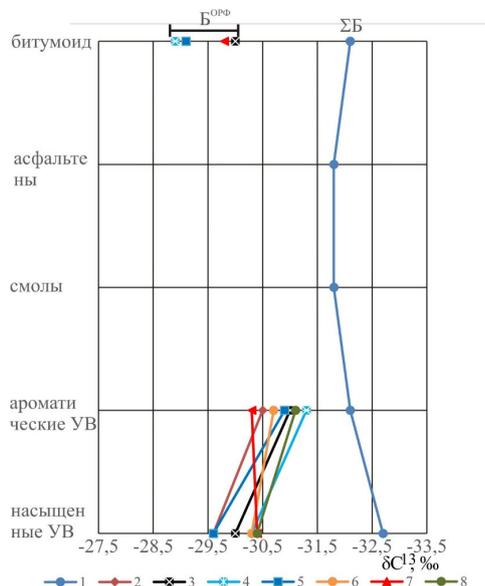


Рис. 2. Изотопный состав углерода во фракциях битумоидов баженовской свиты Арчинской и Казанской площадей. 1 – Казанская ( $\Sigma\text{Б}$ ); Арчинская ( $\text{Б}^{\text{ОРФ}}$ ), глубины, м: 2 – 2613,3, 3 – 2619,3, 4 – 2623,3, 5 – 2624,2, 6 – 2625,9, 7 – 2627,0, 8 – 2631,6

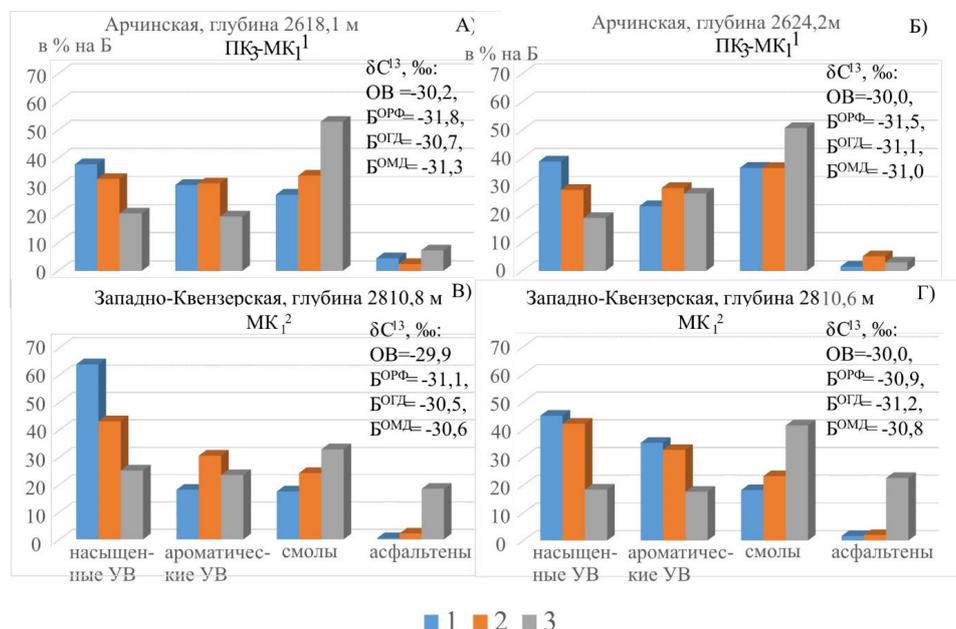


Рис. 3. Примеры фракционирования изотопов углерода в битумоидах баженовской свиты Арчинской (А-Б) и Западно-Квензерской (В-Г) площадей. 1 –  $\text{Б}^{\text{ОРФ}}$ , 2 –  $\text{Б}^{\text{ОГД}}$ , 3 –  $\text{Б}^{\text{ОМД}}$

## *Заключение*

Сравнительный анализ изотопного состава углерода декарбонизированного органического вещества, керогена и битумоидов в баженовской свите показал, что в среднем хлороформенные экстракты, как аллохтонные, так и автохтонные более обогащены изотопом  $C^{12}$ , чем органическое вещество и кероген ((-31,1) против (-30,5)‰). Такая закономерность наблюдается в целом и по отдельным площадям (табл.1). Несмотря на соблюдение модели хроматографической дифференциации битумоидов в ходе миграции (рис.1) установленная классическая схема фракционирования изотопов углерода в зависимости от полярности групп соединений ОВ наблюдается не всегда, как в среднем по скважинам, так и по отдельным образцам (рис. 2, 3), что, нашло свое отражение в сопоставимых значениях  $\delta^{13}C$  аллохтонных и автохтонных битумоидов и объясняется, по-видимому, невысокой преобразованностью ОВ (табл.1).

## *Благодарности*

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта FWZZ-2022-0011 «Органическая геохимия нефтепроизводящих пород и нефтидов, геохимические предпосылки нефтегазоносности протерозойских и фанерозойских осадочных бассейнов Сибири и Республики Саха (Якутия), включая Арктическую зону».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Galimov E.M. Isotope organic geochemistry // Organic Geochemistry. – 2006. – V. 37 – №10. – P. 1200-1262.
2. Богородская Л.И., Конторович А.Э., Ларичев А.И. Кероген: Методы изучения, геохимическая интерпретация. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005. – 254 с.
3. Вышемирский В.С., Конторович А.Э., Трофимук А.А. Миграция рассеянных битумоидов. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1971. – 168 с.
4. Галимов Э.М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. – М.: Недра, 1973. – 384 с.
5. Галимов Э.М. Органическая геохимия изотопов // Вестник Российской академии наук. – 2006. – Т.76 – № 11. – С. 978-988.
6. Галимов Э.М. Природа биологического фракционирования изотопов. – М.: Наука, 1981. – 248 с.
7. Гольшев С.И. Применение стабильных изотопов углерода в геохимических исследованиях // Современные методы исследования нефтей. /Под ред. А.И. Богомоллова, М.Б. Телянко, Л.И. Хотынцевой. – Л.: Недра, 1984, с. 405-422.
8. Гольшев С.И., Верховская Н.А., Лебедева Л.В. Изотопно-корреляционный анализ нефтей и нефтепроизводящих отложений Западной Сибири. // Геохимия нефтегазоносных отложений Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1990, с. 123-130.
9. Конторович А.Э. Эволюция нефтидогенеза в истории Земли // Геология и геофизика. – 2004. – Т.45. – №7. – С. 784-802.
10. Конторович А.Э., Богородская Л.И., Гольшев С.И. Закономерности фракционирования изотопов углерода в седикахитах // Геология и геофизика. – 1985а. – Т.26 – № 9. – С. 34-42.
11. Конторович А.Э., Богородская Л.И., Гольшев С.И. Распределение стабильных изотопов углерода в седикахитах различной генетической природы // Геология и геофизика. – 1985. – Т.26 – № 7. – С. 3-11.

12.Конторович А.Э., Верховская Н.А., Тимошина И.Д., Фомичев А.С. Изотопный состав углерода рассеянного органического вещества и битумоидов и некоторые спорные вопросы теории образования нефти // Геология и геофизика. – 1986. – Т. 27 – № 5. – С. 3–12.

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

14.Сотнич И.С., Костырева Е.А. Особенности распределения фенантронов в аквагенном органическом веществе баженовской свиты Западной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2024. – Т.19 – №2. [https://www.ngtp.ru/rub/2024/9\\_2024.html](https://www.ngtp.ru/rub/2024/9_2024.html) EDN: NOAPCK.

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

16.Фурсенко Е.А., Бурухина А.И., Костырева Е.А., Сотнич И.С. Геохимия нефтей и конденсатов юрских залежей на юго-востоке Западной Сибири // Геология нефти и газа. – 2024. – № 6. – С. 67-83.

© *Е. А. Костырева, И. С. Сотнич, 2025*