

УДК 553.983

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-140-151

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА ОДНОЙ СКВАЖИНЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Григорий Геннадьевич Савостин^{1✉}, Мария Леонидовна Махнутина²,
Мария Олеговна Костышина³, Юлия Александровна Коточкова⁴,
Татьяна Витальевна Григоренко⁵, Дарья Андреевна Грязнова⁶,
Ольга Андреевна Емельяненко⁷, Антон Георгиевич Калмыков⁸,
Георгий Александрович Калмыков⁹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; g.savostin@oilmsu.ru[✉],
<https://orcid.org/0009-0009-1090-1842>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.mahnutina@oilmsu.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-3546-1512>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kostyshina99@mail.ru,
<https://orcid.org/0009-0004-3185-4145>

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; yu.kotochkova@oilmsu.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-5004-4832>

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; grigorenko.tanya@gmail.com,
<https://orcid.org/0009-0005-7598-3245>

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; d.ivanova@oilmsu.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-1225-4919>

⁷ ООО «БГТ», Москва, Россия; olga.emelianenko@bgtrus.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0417-3597>

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; a.kalmykov@oilmsu.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8862-8227>

⁹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; g.kalmykov@oilmsu.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-8274-3622>

Аннотация. В работе приведены результаты кинетического анализа образцов органического вещества баженовской свиты, отобранных из кернового материала одной скважины, находящейся в начале главной зоны нефтеобразования (стадия катагенеза МК₁). Показано, что кинетические характеристики керогена, такие как энергия активации деструкции, частотный фактор, температуры начала и окончания генерации, внутри разреза могут существенно различаться. Диапазон вариации пластовых температур, необходимых для трансформации 50% органического вещества в исследованных образцах, составляет до 27 °С. Полученная разница в моделировании при использовании различающихся кинетических спектров показывает, что представлять весь разрез баженовской свиты как единую однородную по характеристикам органического вещества толщу некорректно и существенно повлияет на точность получаемых бассейновых моделей.

Ключевые слова: кероген, кинетические исследования, пиролиз, баженовская свита, преобразование органического вещества, моделирование генерации углеводородов, Западная Сибирь

Для цитирования: Савостин Г.Г., Махнутина М.Л., Костышина М.О., Коточкова Ю.А., Григоренко Т.В., Грязнова Д.А., Емельяненко О.А., Калмыков А.Г., Калмыков Г.А. Изменчивость кинетических характеристик органического вещества баженовской свиты на примере исследования кернового материала одной скважины в центральной части Западной Сибири // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 140–151.

VARIABILITY OF THE KINETIC CHARACTERISTICS OF ORGANIC MATTER OF THE BAZHENOV FORMATION ON THE EXAMPLE OF CORE MATERIAL FROM ONE WELL IN THE CENTRAL PART OF WESTERN SIBERIA

Grigorii G. Savostin^{1✉}, Mariya L. Makhnutina², Mariya O. Kostyshina³, Yuliya A. Kotochkova⁴, Tatyana V. Grigorenko⁵, Darya A. Griaznova⁶, Olga A. Emelyanenko⁷, Anton G. Kalmykov⁸, Georgy A. Kalmykov⁹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; g.savostin@oilmsu.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0009-1090-1842>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; m.mahnutina@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3546-1512>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kostyshina99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3185-4145>

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; yu.kotochkova@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5004-4832>

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; grigorenko.tanya@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7598-3245>

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; d.ivanova@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1225-4919>

⁷ LLC «BGT», Moscow, Russia; olga.emelianenko@bgtrus.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0417-3597>

⁸ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; a.kalmykov@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8862-8227>

⁹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; g.kalmykov@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8274-3622>

Abstract. The paper presents the results of organic matter (OM) kinetic analysis of 41 the Bazhenov Formation rock samples from one well. The kerogen maturity of all the samples is low (early oil window). According to the results the kinetic characteristics of kerogen, such as activation energy of bonds destruction, frequency factor, generation beginning and end temperature, might vary significantly within one section. The range of temperature variation required to transform 50% of OM in the investigated samples is up to 27 °C. The difference in modeling with different kinetic spectra shows that representing the entire section of the Bazhenov Formation as a single homogeneous rock with same OM is incorrect and will significantly affect the accuracy of the resulting basin models.

Keywords: kerogen, kinetics investigations, pyrolysis, Bazhenov formation, organic matter transformation, hydrocarbons generation modeling, Western Siberia

For citation: Savostin G.G., Makhnutina M.L., Kostyshina M.O., Kotochkova Yu.A., Grigorenko T.V., Griaznova D.A., Emelyanenko O.A., Kalmykov A.G., Kalmykov G.A. Variability of the kinetic characteristics of organic matter of the Bazhenov Formation on the example of core material from one well in the central part of Western Siberia. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 6: 140–151. (In Russ.).

Введение. Изучение органического вещества нефтегазоматеринских толщ является важным аспектом направления геологии, посвященного горючим ископаемым. Понимание процессов накопления керогена и его преобразования помогает повысить эффективность поиска новых месторождений и увеличить точность подсчета запасов и ресурсов как на новых, так и на находящихся в разработке территориях. Под керогеном чаще всего понимают твердое органическое вещество (ОВ), нерастворимое в органических растворителях [Конторович и др., 2018]. Для изучения процессов его преобразования выделяют три группы методов: пиролиз в закрытых, полузакрытых и открытых системах [Burnham, 2017]. В рамках последнего метода разработана методология получения кинетического спектра деструкции керогена [Галушкин, 2007]. Кинетический спектр в данном контексте представляет собой распределение лабильной массы керогена по энергиям активации при определенном частотном факторе, полученном из уравнения Аррениуса. Таким образом, это набор кинетических характеристик керогена, который позволяет моделировать преобразование ОВ в ходе геологической термальной истории в специализированных программах по бассейновому моделированию [Peters, et al., 2018]. Бассейновое моделирование — один из наиболее распространенных методов ГРП, позволяющих проводить качественный прогноз зон накопления УВ и количественную оценку ресурсов [Галушкин, 2007; Морозов и др., 2016]. Достоверность прогнозов фазового состава и количества аккумулированных УВ во многом зависит от кинетики деструкции ОВ. Зачастую при бассейновом моделировании для всей нефтегазоматеринской толщи (НГМТ) используется единый кинетический спектр [Дешин, Бурштейн, 2018; Санникова и др., 2019]. Но более детальные геохимические исследования при бассейновом моделировании показывают, что кинетические спектры для одной НГМТ могут отличаться как по площади, так и по разрезу [Санникова, 2017]. И даже наличие

кинетического спектра, восстановленного по одному из образцов изучаемой площади, не гарантирует лучшей сходимости модели с фактическими результатами [Санникова и др., 2019].

Данное исследование посвящено изучению ОВ баженовской свиты (БС), которая является главной нефтегазоматеринской толщей на территории Западной Сибири. Изучению кинетических характеристик ОВ БС посвящен целый ряд работ [Волков и др., 2017; Кашапов и др., 2019, 2020, 2022; Санникова и др., 2019; Leushina, et al., 2021 и др.]. В этих работах достаточно подробно описывалось изменение кинетических характеристик керогена БС в зависимости от степени его катагентической зрелости, влияние кинетических спектров на результаты бассейнового моделирования, а также предлагались новые подходы по математической обработке пиролитических данных. Однако большая часть подобных исследований посвящена изменчивости характеристик керогена по территории. В то же время в работах, посвященных изучению мацерального состава БС, было показано, что состав ОВ может изменяться не только по латерали, но также имеет определенные вариации вдоль самого разреза [Топчий и др., 2019; Пронина и Вайтехович, 2021; Марунова и др., 2023 и др.]. При этом на форму кинетического спектра может влиять как тип керогена, так и разное соотношение отдельных мацералов [Pepper and Corvi, 1995; Sundararaman, et al., 1992].

Целью данной работы является изучение кинетических характеристик ОВ по разрезу БС на примере одной скважины, находящейся в начале главной зоны нефтеобразования (начало МК₁). Информация об изменении характеристик ОВ БС вдоль разреза и механизме его преобразования в зависимости от пластовой температуры покажет, правомерно ли использовать единый кинетический спектр для всего разреза, даст набор данных для проведения бассейнового моделирования с более высокой точностью и позволит рассмотреть подходы для корректного расчленения разреза и прогноза процессов генерации нефти и газа.

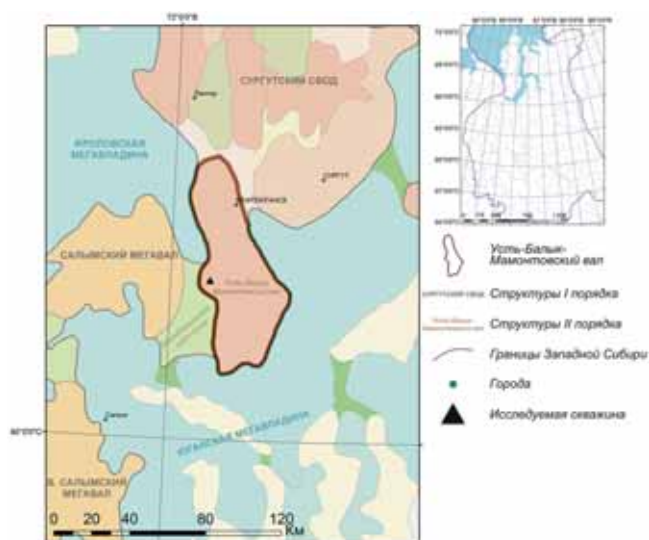


Рис. 1. Расположение участка на тектонической карте осадочного чехла Западной Сибири по [Атлас ..., 2004] с дополнениями

Объект исследования. Исследуемая скважина расположена в центральной части Западной Сибири и в тектоническом отношении приурочена к южному продолжению Сургутского свода — структуре II порядка Усть-Балык-Мамонтовскому валу (рис. 1) [Атлас ..., 2004].

Общая толщина отбора кернового материала составила 30,08 м. Сама БС охарактеризована керном не полностью — отсутствуют нижняя часть баженовских отложений. По всему разрезу отобран 41 образец с целью охарактеризовать различные органосодержащие интервалы, выделяющиеся по пиролитическим и литологическим характеристикам.

Методика. Сорок один образец истирали до состояния пудры, после чего методом горячей экстракции хлороформом в аппарате Сокслета из него удалили все биутумоиды [ASTM D5369-93(2008)e1]. На экстрагированных образцах выполнен пиролиз методом Rock-Eval [Espitalie and Bordenave, 1993] на пиролизаторе HAWK Resource Workstation (Wildcat Technologies, USA).

На всей коллекции образцов выполнены кинетические исследования на пиролизаторе HAWK Resource Workstation (Wildcat Technologies, USA). Каждый образец подвергался программированному пиролизу при пяти скоростях нагрева: 3, 5, 10, 30 и 50 °C/мин в диапазоне 300–650 °C [Burnham, 2017]. Полученные пиролитические кривые обрабатывались в программе KINETICS2015 (GeoIsoChem Corporation, USA) с использованием дискретного метода анализа. В результате получены данные о распределении лабильной массы керогена по энергиям активации (E_a) при расчетном предэкспоненциальном множителе (A) из уравнения Аррениуса:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}},$$

где k — скорость химической реакции (c^{-1}), E_a — энергия активации (кал/моль), R — универсальная

газовая постоянная ($1,987 \text{ кал} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$), A — предэкспоненциальный множитель (c^{-1}), а T — температура (К).

Для оценки преобразования керогена с полученными кинетическими характеристиками в процессе генерации в ПО TemisFlow™ для каждого образца смоделирована трансформация ОВ в условиях природных скоростей прогрева, составляющих 2 °C/млн лет, что соответствует нагреву от 10 (температура в основании баженовской толщи после ее накопления) до 300 °C (температура начала подстадии апокатагенеза [Фролов, 1992]) за 145 млн лет (от начала раннемелового периода до современного времени). Также была построена 1D модель скважины, представляющая сочетание структурно-литологической модели с ее изменениями в ходе геологического развития и геотермической модели. Структурной основой служат стратиграфические отбивки по скважине. Литологическая модель создана на основании стандартной библиотеки литотипов в программном обеспечении TemisFlow™, в соответствии с данными по скважине. «Кинематическая» модель определяет геометрические изменения разреза и учитывает изменения палеобатиметрии (в соответствии с литологическим составом пород и литературными данными по палеогеографии), уплотнение пород при погружении (принцип бэкстриппинга, реализованный в ПО) и наличие перерывов осадконакопления и эрозий (оценивались по наличию несогласий на керне и по литературным данным).

Для того, чтобы искусственно смоделировать повышенную катагенетическую преобразованность разреза скважины, были созданы дополнительные сценарии моделирования, где к настоящему времени тепловой поток в основании осадочного чехла повышался до 66–70 мВ/км².

Результаты и обсуждение. По результатам литологического описания установлено, что в разрезе БС присутствуют 3 пачки (3–5) в соответствии с работами И.В. Панченко [Панченко и др., 2013; 2016], Г.А. Калмыкова [2016], Н.С. Балускиной [2011] и других исследователей, а также верхняя переходная зона от баженовской к сортымской свите (рис. 2).

Начинается разрез с III пачки, сложенной кероген-глинисто-кремниевыми разностями с прослоями и линзами радиоляритов. Радиоляритовые прослои, как правило, неравномерно карбонатизированы и на некоторых участках перекристаллизованы до халцедонитов (рис. 3). Прослеживаются также костеносные горизонты, содержащие обилие ихтиодетрита, онихитов, фрагментов и цельных скелетов радиолярий, а также биокласты двустворчатых моллюсков.

III пачка согласно перекрывается отложениями IV пачки, представленными глинисто-кремниевыми разностями с многочисленными раковинами двустворок. Остатки двустворок формируют прослои толщиной 0,5–2 см, раковины как правило цельные (рис. 3).

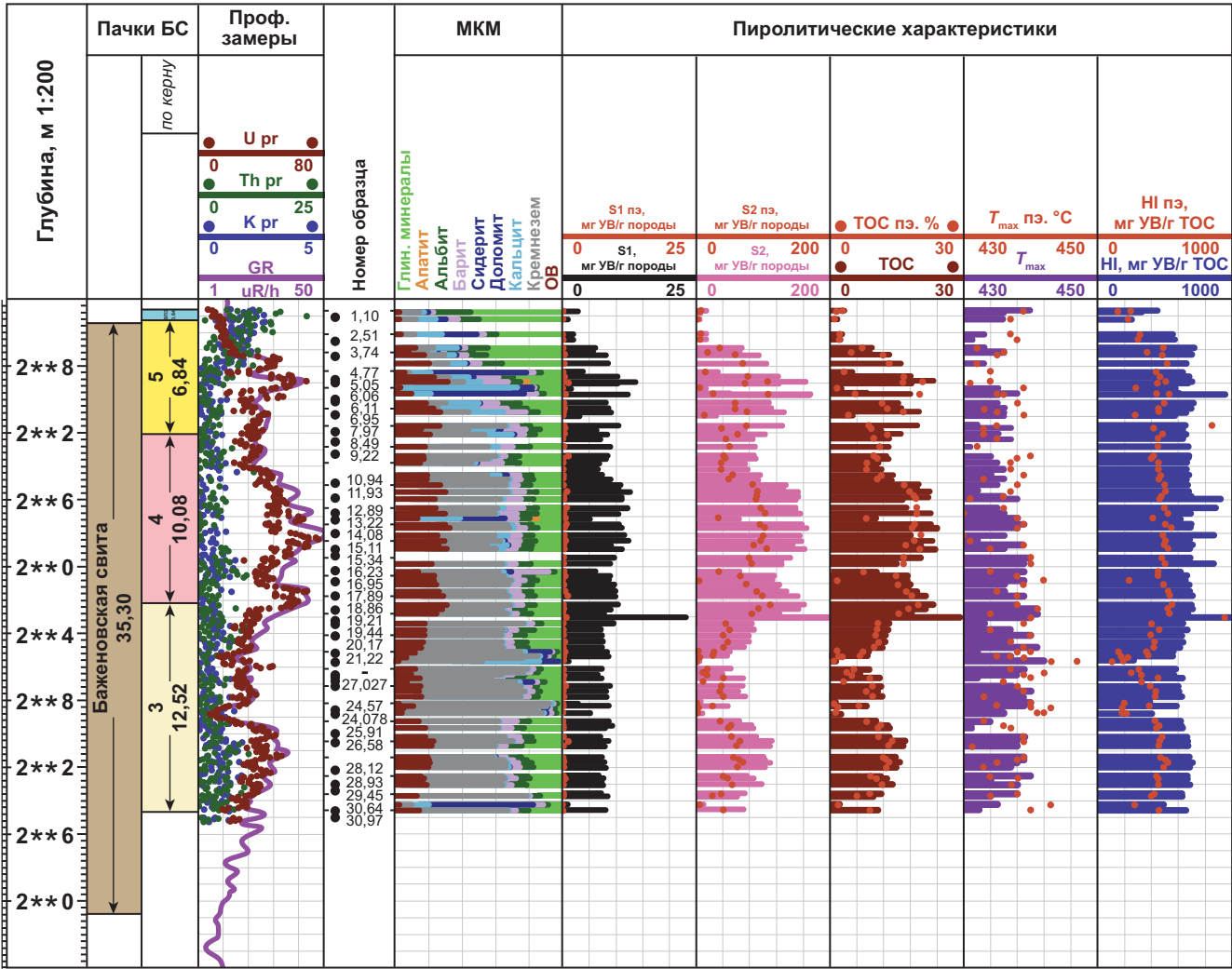


Рис. 2. Геолого-геохимический планшет с выбранными образцами для проведения кинетических исследований

Выше залегают породы V пачки — керогеново-кремнисто-глинистые разности с многочисленными карбонатными конкрециями и прослоями (рис. 3). По разрезу отмечается также карбонатизация, частично связанная с содержанием карбонатных скелетов кокколитофорид и кальцисфер в матриксе породы.

Выше разрез сложен кремнисто-глинистыми разностями с пониженными значениями ТОС относительно подстилающих пачек (1–2% против 11% в среднем по данным пиролиза) (рис. 3).

Отдельно отмечается изменение содержания бария вдоль изучаемого разреза. Наиболее низкие количества характерны для III пачки (около 2400 ppm), около границы с IV они начинают расти, среднее количество Ва в IV пачке составляет 3730 ppm. В V пачке содержание Ва варьирует от 740 до 7530 ppm, при этом максимальные количества зафиксированы для образцов со вторичной карбонатизацией. Главными минералами-концентра́тами данного элемента являются баритокальцит ($\text{Ba-Ca}(\text{CO}_3)_2$) и виттерит (BaCO_3), в меньшей степени встречаются барит (BaSO_4) и алюмосиликат бария, предположительно, относящиеся к цеолиту — гар-

мотому ($\text{Ba}_2(\text{Si}_{12}\text{Al}_4)\text{O}_{32} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$). Подобная минералогия может возникать за счет вторичных преобразований и растворения барита при повышении восстановительных условий [Юдович и Кёртис, 1988]. Вторая возможная причина образований карбонатов и цеолитов бария — это гидротермальные процессы [Gottardi and Galli, 1985; Tang, et al., 1998; Bish and Ming, 2001; Liu, et al., 2007]. Важно отметить, что гидротермальные процессы, которые могли определять вторичные преобразования барита, могут также влиять в том числе и на ОБ, содержащееся в породах, приводя к его частичному преобразованию и изменению структуры.

Таким образом, изучаемый разрез имеет близкое к описанным ранее разрезам БС строение [Панченко и др., 2013; 2016]. В то же время было установлено, что для него характерны вариации остатков ОБ: наличие двустворок, кокколитофорид, ихтиодетрита, онихитов, фрагментов и цельных скелетов радиолярий. При этом в нем также фиксируется минералогические изменения, образовавшиеся за счет вторичных процессов, что также могло повлиять на изменение ОБ.

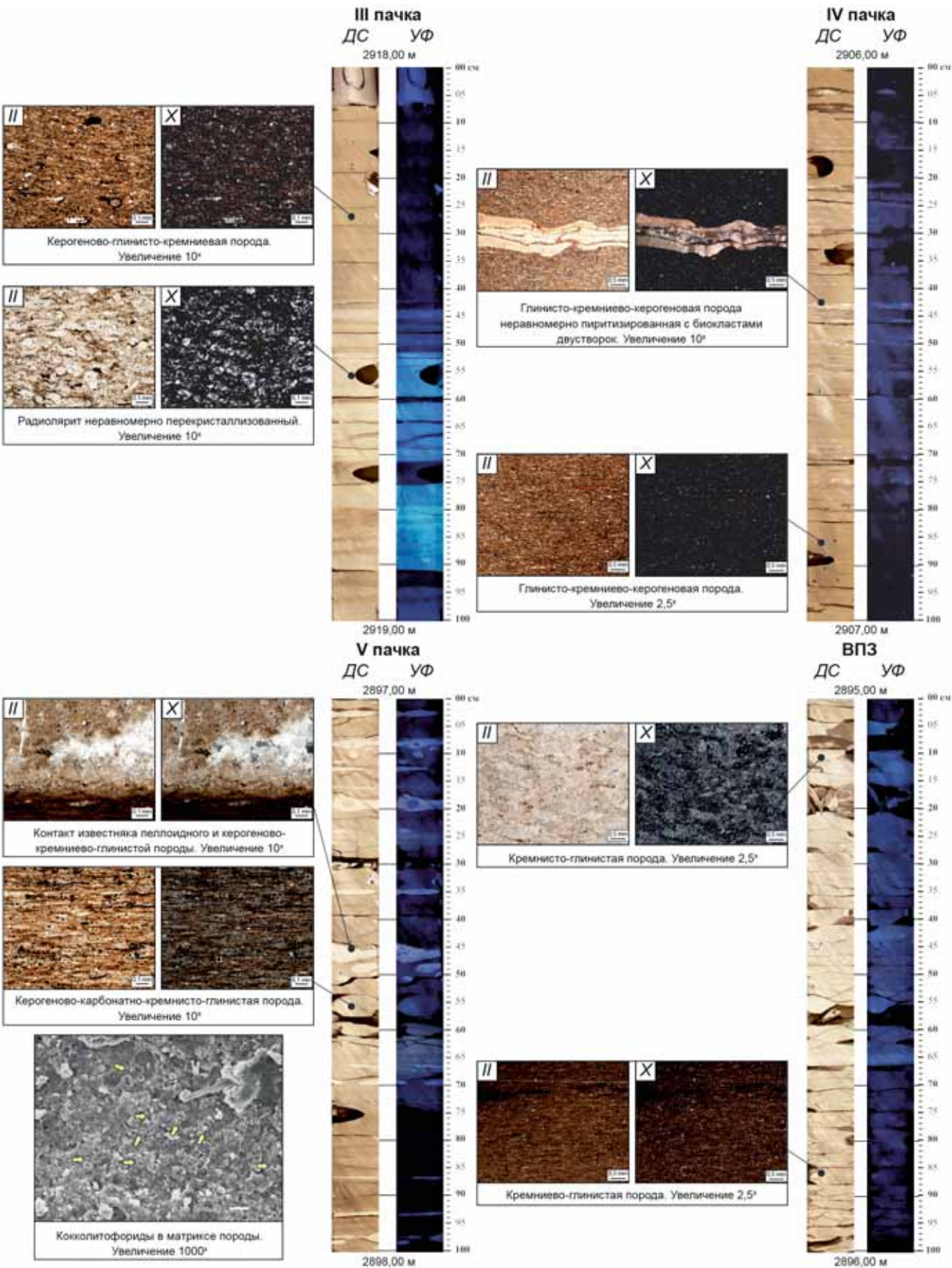


Рис. 3. Строение разреза исследуемой скважины с фотографиями керна и шлифов. ДС — дневной свет, УФ — ультрафиолетовый свет, ВПЗ — верхняя переходная зона от баженовской свиты к сортымской. Фотографии шлифов: // — параллельные николи, X — скрещенные николи; белый прямоугольник при увеличении 2,5х–0,5 мм, при увеличении 10х–0,1 мм. Фотография под растровым электронным микроскопом, желтые стрелки — кокколитофориды

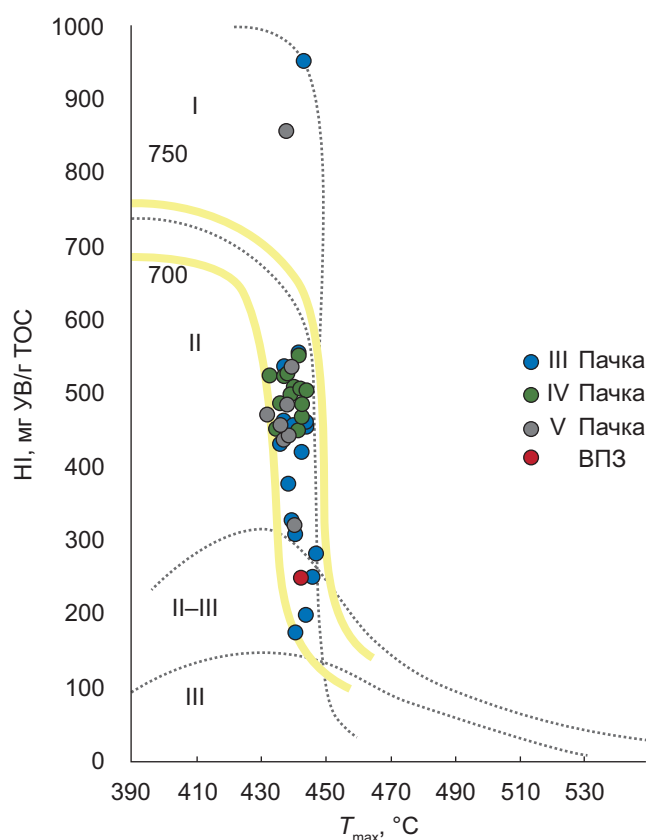


Рис. 4. Модифицированная диаграмма Ван-Кревелена ([Козлова и др., 2015] с изменениями) со значениями пиролизических исследований после экстракции

Пиролитические характеристики ОВ исследуемых образцов после экстракции представлены в табл. 1. Тридцать изучаемых образцов характеризуются водородным индексом от 420 до 556 мг УВ/г ТОС, а параметр $T_{\max}$ — от 429 до 440 °С, при средних величинах 485 мг УВ/г ТОС и 436 °С соответственно (рис. 4). При этом генерационный потенциал керогена (S2) в них варьирует от 14,2 до 110,8 мг УВ/г породы, а ТОС — от 3,2 до 20,2 мас.%, при средних значениях 62,3 мг УВ/г породы и 13,6 мас.% (рис. 5). Образцы, для которых был зафиксирован более высокий HI в 950 и 856 мг УВ/г ТОС, согласно литологическому описанию, содержат твердый битум. Более низкие пиролитические параметры характерны для образца из ВПЗ, одиночного образца из V пачки и отдельных образцов из III пачки, которые были отобраны из различных костеносных прослоев.

Согласно углепетрографическим исследованиям ОВ в образцах, попавших в главную группу по пиролитическим параметрам, представлено смесью битуминита и фрагментов онихит в разных пропорциях. Среди других мацералов также зафиксированы единичные фрагменты альгинита и различные биокласты, что согласуется с литологическим описанием изучаемых пород.

Большая часть изучаемых образцов имеет схожие пиролитические параметры. Некоторые вариации значений будут объясняться разным соотношением отдельных мацералов, в первую очередь битуминита

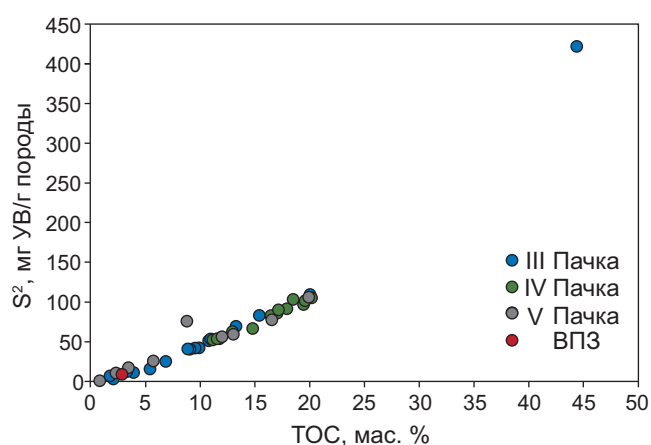


Рис. 5. Отношение параметров S2-ТОС в исследуемых образцах. Цветом показаны пачки, из которых был произведен отбор образцов

и фрагментов онихит. При этом варьирует и параметр Тmax, что может свидетельствовать о различной преобразованности данных образцов. Наличие твердого битума приводит к повышению НI, а образцы, отобранные из разных костеносных горизонтов, показывают более низкие пиролитические параметры. Таким образом, наблюдается вариация параметров по разрезу и внутри отдельных пачек.

Кинетические характеристики исследуемых образцов также показывают широкий диапазон вариаций. Так, предэкспоненциальный множитель (A), полученный для ОБ III пачки, варьирует от $7,75 \times 10^{12}$ до $3,49 \times 10^{14} \text{ с}^{-1}$, а средняя энергия активации (E_a) — от 51 до 56 ккал/моль. Предэкспоненциальный множитель, полученный для ОБ IV пачки, варьирует от 5×10^{12} до $2,98 \times 10^{14} \text{ с}^{-1}$, а средняя E_a — от 53 до 56 ккал/моль. Для ОБ V пачки вариации A составили $2,68 \times 10^{13}$ – $2,34 \times 10^{15} \text{ с}^{-1}$, а E_a — от 52 до 58 ккал/моль. Кинетический спектр образца из ВПЗ характеризуется $A = 1,73 \times 10^{13} \text{ с}^{-1}$ и $E_a = 52$ ккал/моль. Большая часть полученных спектров имеет ярко выраженную асимметричную форму с отсутствием низкоэнергетических связей. Выделяется образец твердого битума под номером 19,44, где 84% связей приходится на единую энергию активации (рис. 6). При этом наибольшие значения средней E_a и A получены для образца 5,05, который содержит наибольшее количество карбонатов в своем составе, значения составили 58 ккал/моль и $2,34 \times 10^{15} \text{ с}^{-1}$ соответственно.

Для оценки влияния пластовой температуры на преобразование ОВ образцы с полученными кинетическими спектрами были заложены в 1D модель в условиях природных скоростей нагрева ($2^{\circ}\text{C}/\text{млн лет}$). Наиболее активное преобразование ОВ в большей части образцов происходит в температурном диапазоне от 135 до 150°C . В единичных образцах отмечается как более низкотемпературная, так и более высокотемпературная генерация УВ. Полученные типичные группы кинетических схем представлены в табл. 2. Некоторые из полученных кинетических

Таблица 1

Пиролитические параметры исследуемых образцов

Номер образца	Расположение	S2, мг УВ/г породы	ТОС, мас. %	T_{max} , °C	НІ, мг УВ/г ТОС
1,1	ВПЗ	6,7	2,7	439	249
2,51	V пачка	7,0	2,2	437	320
3,74	V пачка	57,9	11,9	435	485
4,77	V пачка	14,2	3,2	434	439
5,05	V пачка	77,9	16,6	429	470
6,06	V пачка	25,4	5,7	435	444
6,11	V пачка	108,0	20,1	436	537
6,95	V пачка	59,1	12,9	433	457
7,97	V пачка	75,3	8,8	435	856
8,49	IV пачка	62,8	12,9	433	486
9,22	IV пачка	50,5	11,2	432	452
10,94	IV пачка	54,2	11,6	439	469
11,93	IV пачка	91,6	17,9	437	511
12,89	IV пачка	97,5	19,5	436	500
13,22	IV пачка	103,1	19,6	430	525
14,00	IV пачка	102,4	18,5	438	552
15,11	IV пачка	86,3	17,0	439	506
15,34	IV пачка	105,9	20,2	434	524
16,23	IV пачка	83,3	16,5	440	505
16,95	IV пачка	66,8	14,8	438	450
17,89	IV пачка	90,8	17,2	435	528
18,68	III пачка	110,8	19,9	438	556
19,21	III пачка	83,2	15,5	434	537
20,17	III пачка	49,7	10,7	434	464
19,44	III пачка	421,7	44,4	440	950
21,22	III пачка	42,	10,0	439	421
21,73	III пачка	25,6	6,8	435	377
21,077	III пачка	3,6	2,0	437	176
22,055	III пачка	16,87	5,4	437	309
22,075	III пачка	9,7	3,9	442	251
23,07	III пачка	41,3	9,1	440	455
23,027	III пачка	10,4	3,2	436	329
24,57	III пачка	41,5	9,6	433	432
24,078	III пачка	1,8	0,9	440	199
25,91	III пачка	51,5	11,3	436	457
26,58	III пачка	52,8	10,9	439	485
28,12	III пачка	69,4	13,2	435	525
28,93	III пачка	40,7	9,2	434	443
29,45	III пачка	53,8	11,7	437	458
30,64	III пачка	5,1	1,8	443	282
30,97	III пачка	41,2	8,9	440	461

схем были объединены на основе сходства распределения энергий активации (одинаковые энергии активации, при которых реализуется максимальная доля исходного генерационного потенциала $maxE_a$, близкие формы спектров), частотных факторов, кривых трансформации ОВ и расходования НІ с ростом температуры (рис. 7). В различных образцах БС исследуемой скважины общий диапазон вариации температур, необходимых для преобразования ОВ до равной степени трансформации в интервале наиболее интенсивной генерации (TR от 10 до 90%), лежит в диапазоне значений 24–29 °C (рис. 8).

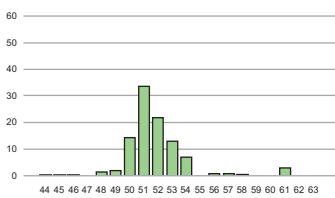
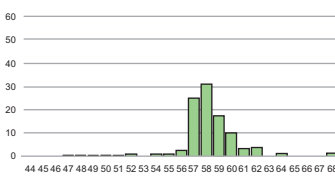
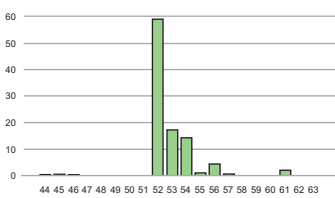
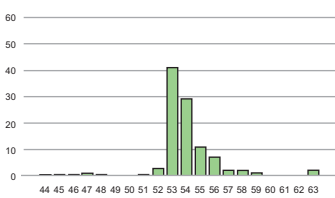
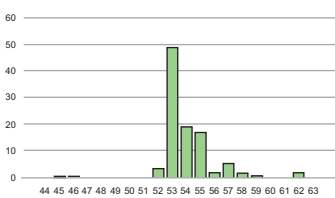
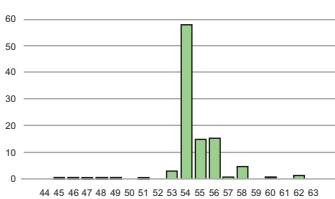
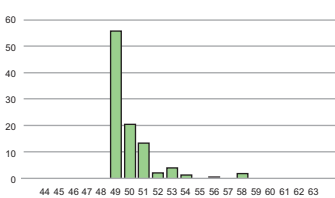
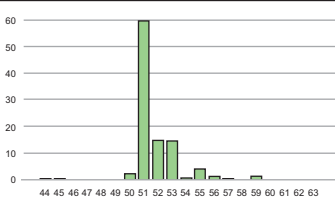
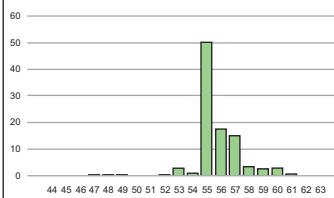
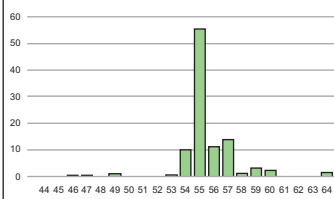
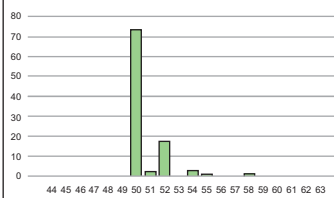
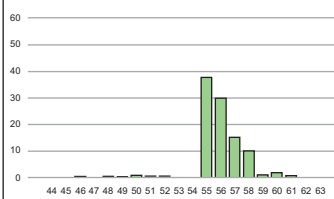
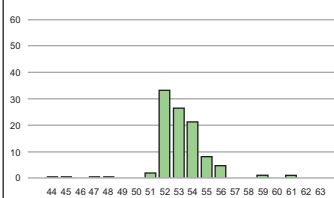
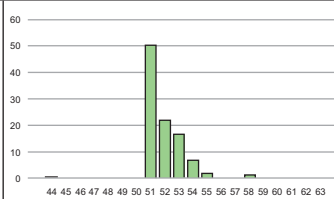
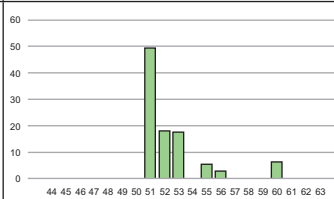
По результатам 1D моделирования в реально существующих термодинамических условиях, откалиброванных по фактическим замерам пластовых температур и давлений в скважине, а также по пересчитанному показателю отражения витринита вдоль всего разреза скважины, катагенетическая преобразованность баженовских отложения соответствует отражательной способности витринита $R_o = 0,64\%$, что по шкале Н.Б. Вассоевича соответствует градации МК₁. При этом ОВ на текущий момент преобразовались не более чем на 4–6%. Однако на территории Западно-Сибирского бассейна многими исследователями достоверно установлены зоны, где баженовские отложения преобразованы до стадий катагенеза МК₃ и выше [Фомин, 2011; Калмыков и др., 2019]. Поэтому для оценки процесса преобразования ОВ с различными кинетическими характеристиками были просчитаны 1D модели с большей степенью прогрева осадочного чехла.

В этой серии сценариев было сделано допущение, что к современному моменту отражательная способность витринита в кровле баженовских отложений составляет $R_o = 1\%$, что соответствует середине градации катагенеза МК₃. Такая степень преобразованности достигается путем повышения теплового потока в основании осадочного чехла от момента накопления баженовских отложений до современности (от 145 до 0 млн лет) до значения 66,6 мВт/м². Результаты моделирования показывают, что степень преобразования баженовского ОВ к середине градации катагенеза МК₃ варьирует от 15,4 до 84,1%. 5 из 15 моделируемых типов преобразуются менее чем на 50%, для преобразования половины исходного органического вещества в них тепловой поток должен достигать 70–74 мВт/м².

При отсутствии измерения кинетических характеристик на незрелых образцах исследуемых НГМТ для бассейнового моделирования используются библиотечные кинетические спектры пород-аналогов, исходя из схожести типа керогена и/или обстановок осадконакопления. В сравнении с библиотечными кинетическими спектрами Menil-2002 ТП(В), модифицированный IFP [Behar, et al., 1997] и ТП(В) [Perrier and Corvi, 1995], часто используемые для моделирования преобразования ОВ БС [Дешин, Бурштейн, 2018; Санникова и др., 2019], полученные кинетические спектры отличаются пониженной

Таблица 2

Характеристика выделенных по кинетическим характеристикам типов ОБ

№	Образец	Кинетическая схема	Частотный фактор A (c^{-1})	$max E_a$ ккал/моль	TR (%) при $R_0 = 1\%$
1	1,1		1,73E+13	51	72,6
2	5,05		2,34E+15	58	15,4
3	6,95		3,83E+13	52	68,5
4	7,97		9,02E+13	53	52,9
5	8,49		7,71E+13	53	52,3
6	9,22		1,54E+14	54	43,8
7	11,93		5,01E+12	49	87,1
8	13,22		1,81E+13	51	78,0
9	15,34		2,98E+14	55	28,1
10	17,89		2,72E+14	55	32,1
11	20,17		7,75E+12	50	84,1
12	21,73		3,49E+14	55	24,8
13	22,075		4,28E+13	52	56,4
14	23,027		1,82E+13	51	72,6
15	24,57		1,54E+13	51	65,7

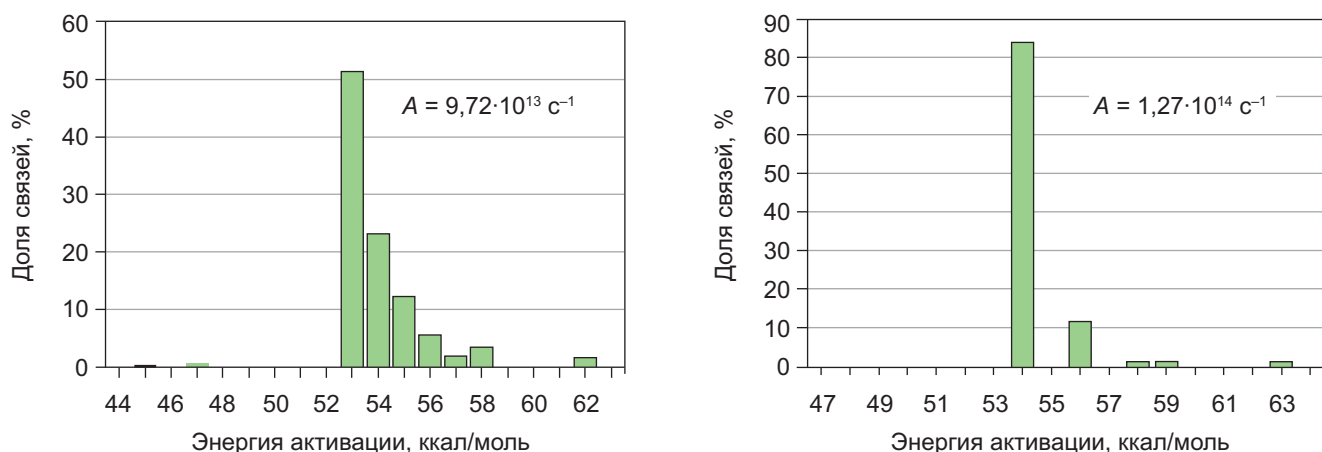


Рис. 6. Примеры полученных кинетических спектров для образца 3,74 (слева) и 19,44 (справа)

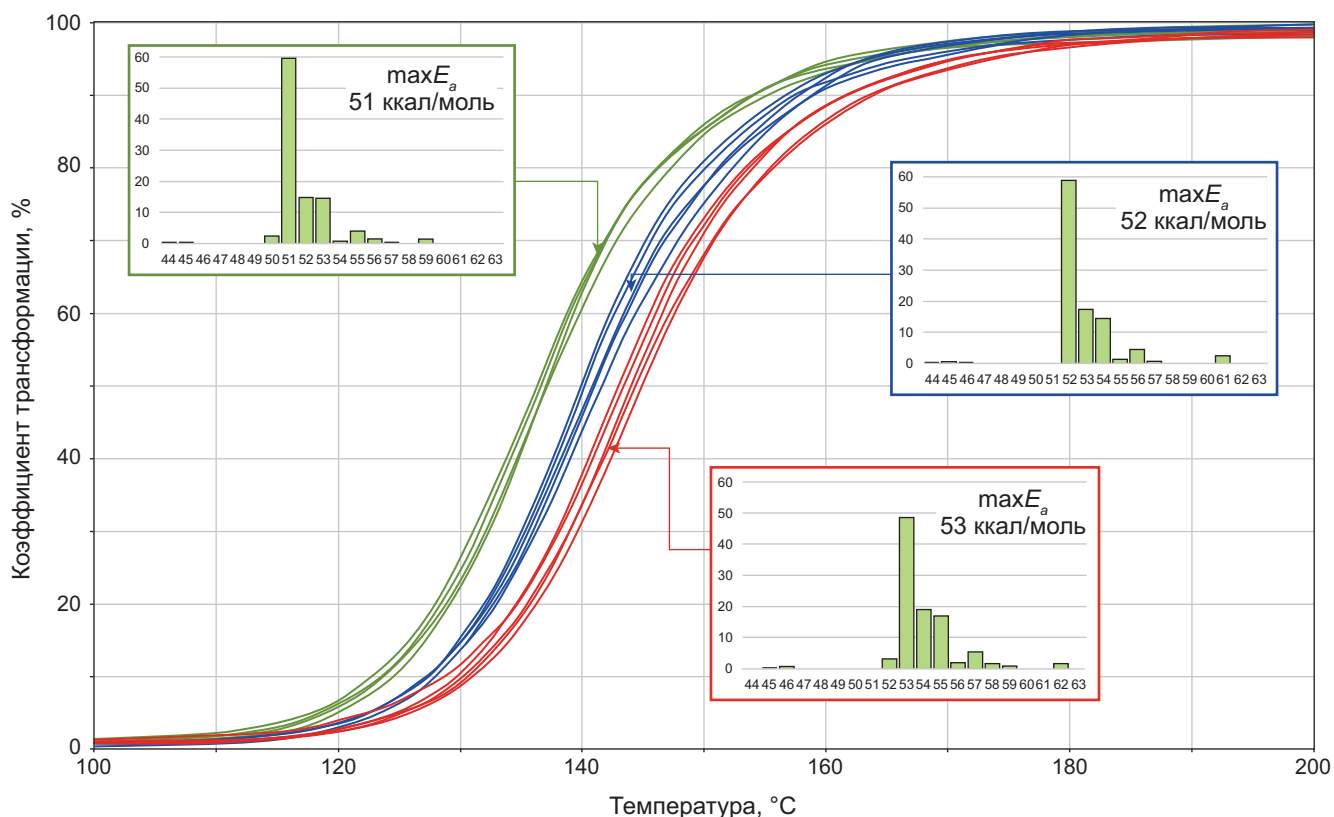


Рис. 7. Примеры объединения образцов в группы

долей низкотемпературных реакций и более узким температурным диапазоном трансформации ОВ. Вероятно, это связано с частичным преобразованием ОВ исследуемого разреза. В пользу этого также свидетельствует то, что средний НИ для выбранных образцов составляет 460 мг УВ/г ТОС, а $T_{\max}$ равен 436°C. Таким образом, частичное преобразование привело к уменьшению низкоэнергетических связей, что привело к видимой асимметрии кинетических спектров.

Результаты исследований кинетических характеристик 29 образцов НГМТ из различных нефтегазоносных бассейнов и стратиграфических интервалов, содержащих кероген преимущественно II типа, показали, что температурный интервал достижения

трансформации половины исходного ОВ ($TR = 50\%$) составляет порядка 30°C [Peters, et al., 2006]. Проведенное моделирование баженских отложений показывает, что аналогичный интервал вариации температур может наблюдаться даже в разрезе одной скважины, указывая на сильное влияние кинетических характеристик трансформации ОВ на протекание процессов генерации. Так, к середине градации катагенеза МК₃ четверть из всех исследованных образцов не расходует половины исходного генерационного потенциала, в то время как ряд образцов вырабатывает свой генерационный потенциал на >80–85%. Для разных образцов также отличается и водородный индекс, что в сочетании с различной кинетикой преобразования может приводить к су-

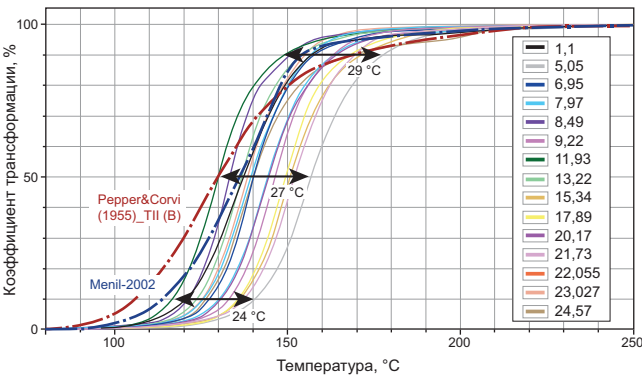


Рис. 8. Изменение TR с ростом температуры

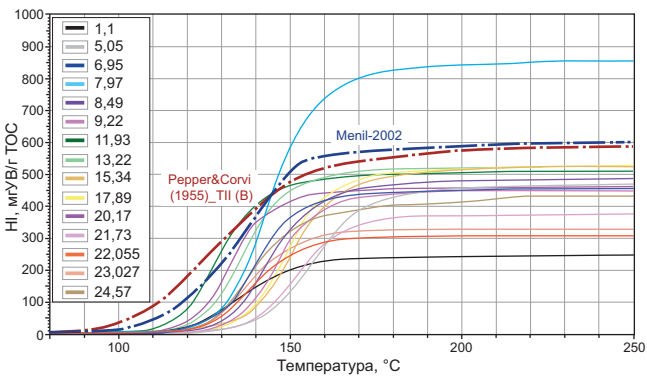


Рис. 9. Расхождение HI с ростом температуры

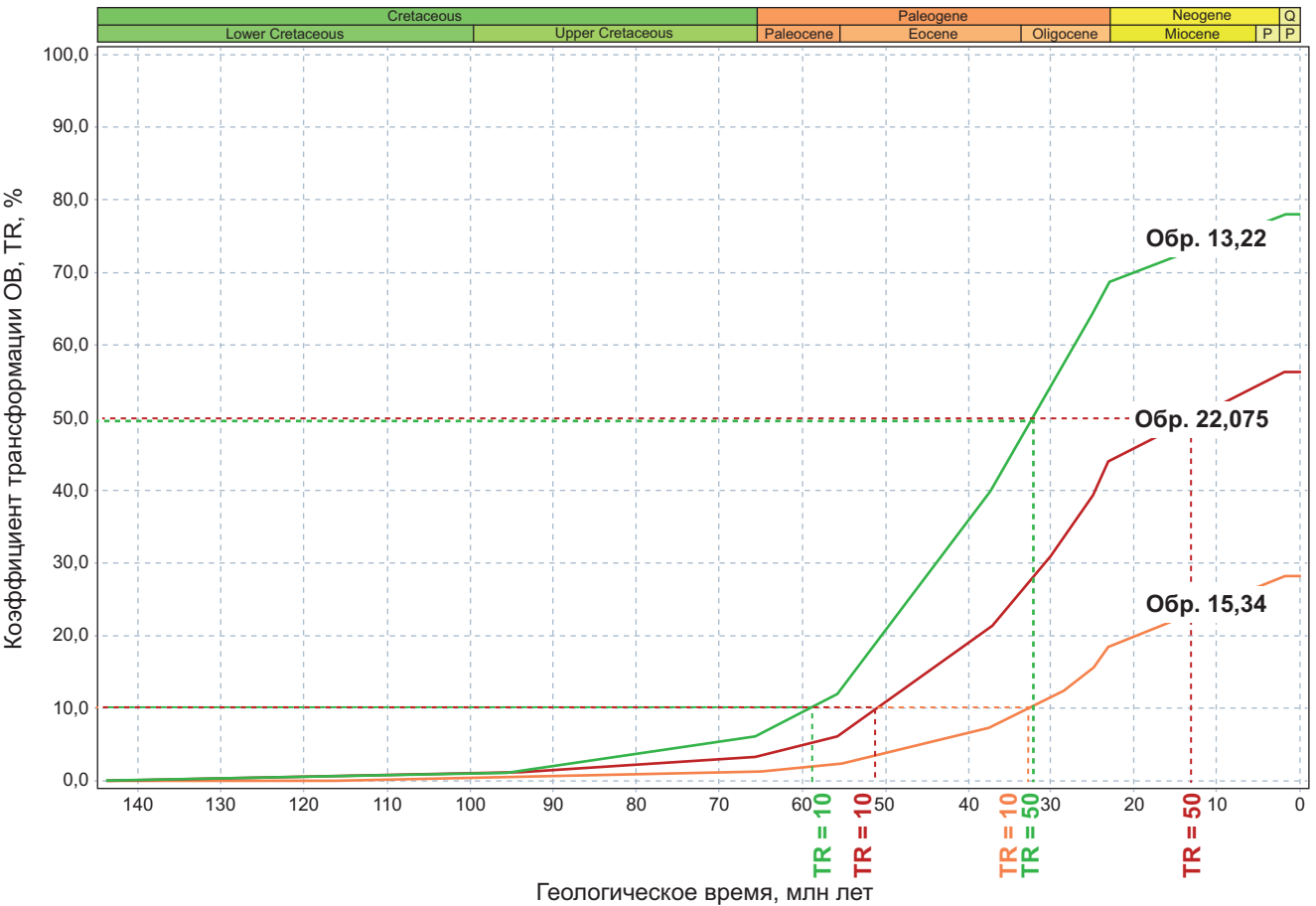


Рис. 10. Примеры графиков погружения для образцов с различными кинетическими характеристиками

щественной разнице в количественной оценке масс образовавшихся УВ на различных этапах трансформации (рис. 9). Кроме того, на графиках погружения видно, что активная трансформация для образцов с различными кинетическими характеристиками начинается в различное время (рис. 10). Этот факт крайне важно учитывать при дальнейшей оценке возможности формирования залежей, была ли сформирована ловушка к моменту начала эмиграции УВ. А также при оценке их дальнейшей сохранности, так как наличие структурных перестроек после начала активной генерации и эмиграции может привести к расформированию образовавшихся скоплений и потере части образованных УВ.

Исходя из того, что большая часть ОВ в исследуемых образцах представлена смесью фрагментов онихитов и битуминита в разных пропорциях, это может влиять на полученные спектры. Однако наличие иных мацералов также приводит к изменению формы спектра и вариаций энергий активаций, что наблюдается для образцов, содержащих твердый битум, или тех, где ОВ отбиралось из костеносных горизонтов. Также, по всей видимости, иной минеральный состав пород оказывает влияние на результаты кинетических исследований. Так, в образцах V пачки для карбонатсодержащих образцов наблюдаются более низкие содержания ОВ и более высокие энергии активации.

Заключение. Вскрытый разрез баженовской свиты сложен керогеново-глинисто-кремневыми разностями. В нижней части отмечаются прослои радиоляритов карбонатизированных, в средней части наиболее повышенное содержание ОВ (ТОС до 20%) с многочисленными прослоями двустворчатых моллюсков. Выше отмечаются керогеново-карбонатно-кремнево-глинистые породы с остатками кокколитофорид и многочисленными карбонатными конкрециями. Перекрывается свита глинистыми и кремнисто-глинистыми отложениями верхней переходной зоны. Вдоль всего разреза варьирует содержание ОВ и отдельных мацералов, что наблюдается по результатам литологических, углепетрографических и пиролитических исследований.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что кинетические характеристики ОВ изучаемого разреза БС в исследуемой скважине неодинаковы. В первую очередь на это, по всей видимости, влияет разное соотношение главных мацералов — битуминита и фрагментов онихит. При этом наличие другого ОВ (альгинита, ихтиодетрита, твердого битума и остатков радиолярий) также приводит к вариациям кинетических параметров. Одна из проблем видится в том, что ОВ по своей природе преобразуется неравномерно и с разной скоростью. Так, альгинит и битуминит будут преобразовываться раньше фрагментов онихит [Марунова и др., 2023]. При этом используемый дискретный метод хоть и является наиболее распространенным в кинетическом анализе, дает усредненный результат и не позволит разделить в смеси ОВ, характеризующееся

разными кинетическими параметрами [Burnham, 2017; Sundararaman, et al., 1992].

Полученная разница в моделировании при использовании различающихся кинетических спектров показывает, что попытка представить весь разрез БС как единую однородную породу с большой долей вероятности приведет к погрешностям. Наиболее активное преобразование ОВ в большей части образцов происходит в температурном диапазоне от 135 до 150 °С, при этом наименьшие температуры, необходимые для преобразования, составляют около 120 °С. Отчасти это связано с частичной преобразованностью ОВ, однако, достаточно высокие значения водородного индекса, свидетельствуют о том, что большая часть генерационной способности керогена еще не была реализована.

Подробные литологические, пиролитические и углепетрографические исследования могут способствовать уменьшению необходимой выборки для кинетических исследований ОВ БВУФ. Понимание кинетики преобразования разных мацералов является важной целью будущих работ, так как они смогут сильно способствовать уточнению новых и уже существующих бассейновых моделей.

Финансирование. Литологические исследования выполнены в рамках проекта «Оценка ресурсов трудноизвлекаемых углеводородов и разработка инновационных методов их освоения» АААА-А16-116033010113-2. Изучение органического вещества выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-13-00197.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас «Геология и нефтегазоносность Ханты-Мансийского автономного округа» / Под ред. Э.А. Ахпатовой, В.А. Волкова, В.Н. Гончарова и др. Екатеринбург: ИздатНаукаСервис, 2004. 148 с.

Балушкина Н.С. Литофизическая типизация и нефтеносность пород баженовского горизонта в зоне сочленения Сургутского и Красноленинского сводов: Автореф. дисс. ... д. г.-м. н. М.: МГУ, 2011. 27 с.

Волков В.А., Сидоров А.А., Алейникова Е.А. О кинетических характеристиках органического вещества баженовской свиты // Недропользование XXI век. 2017. № 5. С. 30–38.

Галушкин Ю.И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. М.: Научный мир, 2007. 457 с.

Дешин А.А., Буриштейн Л.М. Оценка масштабов генерации углеводородов в средне-верхнеюрских отложениях севера Западной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2018. Т. 13, № 3. С. 1–17.

Калмыков Г.А. Строение баженовского нефтегазоносного комплекса как основа прогноза дифференцированной нефтепродуктивности: Дисс. ... канд. геол.-минер. н. М.: МГУ, 2016. 391 с.

Калмыков А.Г., Карпов Ю.А., Топчий М.С. и др. Влияние катагенетической зрелости на формирование коллекторов с органической пористостью в баженовской свите

и особенности их распространения // Георесурсы, 2019. Т. 21, № 2. С. 159–171.

Кашапов Р.С., Гончаров И.В., Обласов Н.В. и др. Новый подход к кинетическим исследованиям органического вещества баженовской свиты // Геология нефти и газа. 2020. № 3. С. 51–59.

Кашапов Р.С., Гончаров И.В., Обласов Н.В. и др. Кинетические исследования органического вещества баженовской свиты // Успехи органической геохимии. 2022. С. 105–107.

Кашапов Р.С., Обласов Н.В., Гончаров И.В. и др. Определение кинетических параметров пиролитической деструкции органического вещества нефтегазоматеринских пород // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2019. Т. 14, № 1. С. 1–20.

Козлова Е.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А. и др. Технология исследования геохимических параметров органического вещества керогенонасыщенных отложений (на примере баженовской свиты, Западная Сибирь) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 5. С. 44–53.

Конторович А.Э., Пономарева Е.В., Буриштейн Л.В. и др. Распределение органического вещества в породах баженовского горизонта (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 3. С. 357–371.

Марунова Д.А., Пронина Н.В., Калмыков А.Г. и др. Эволюция биокластов при катагенезе в породах баже-

новского горизонта на территории фроловской нефтегазоносной области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. Т. 1, № 5. С. 87–95.

Морозов Н.В., Беленькая И.Ю., Жуков В.В. 3D моделирование углеводородных систем баженновской свиты: детализация прогноза физико-химических свойств углеводородов // Геология и геолого-разведочные работы. Вып. 01. 2016. С. 38–45.

Панченко И.В., Вишневецкая В.С., Калмыков Г.А. и др. Новые данные по биостратиграфии абалакской и баженновской свит Широкого Приобья, полученные на основе комплексного изучения макро- и микрофаунистических остатков // Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. VII Всероссийское Собрание. 2013. С. 162–165.

Панченко И.В., Немова В.Д., Смирнова М.Е. и др. Стратификация и детальная корреляция баженновского горизонта в центральной части Западной Сибири по данным литолого-палеонтологического изучения керн и ГИС // Геология нефти и газа. 2016. № 6. С. 22–34.

Пронина Н.В., Вайтхович А.П. Прямые признаки нефтеобразования в породах баженновской свиты // Георесурсы. 2021. Т. 23, № 2. С. 152–157.

Санникова И.А., Большакова М.А., Ступакова А.В. и др. Моделирование масштабов генерации углеводородных флюидов доманиковой нефтематеринской толщи Тимано-Печорского бассейна с использованием различных кинетических спектров деструкции органического вещества // Георесурсы. 2017. Спецвыпуск. Ч. 1. С. 65–79.

Санникова И.А., Ступакова А.В., Большакова М.А. и др. Региональное моделирование углеводородных систем баженновской свиты в Западно-Сибирском бассейне // Георесурсы. 2019. Т. 21, № 2. С. 203–212.

Топчий М.С., Пронина Н.В., Калмыков А.Г. и др. Распределение органического вещества в породах баженновской высокоуглеродистой формации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 2. С. 46–56.

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

Фролов В.Т. Литология. Кн. 1: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1992. 336 с.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.

ASTM D5369-93(2008)e1. Standard Practice for Extraction of Solid Waste Samples for Chemical Analysis Using Soxhlet Extraction. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International. 2016. 7 p.

Behar F., Vandenbroucke M., Tang Y., et al. Thermal cracking of kerogen in open and closed systems: determination of kinetic parameters and stoichiometric coefficients for oil and gas generation // Organic geochemistry. 1997. Vol. 26. № 5–6. P. 321–339.

Bish D.L., Ming D.W. (ed). Natural zeolites: occurrence, properties, applications // De Gruyter. 2001. Vol. 45. 668 p.

Burnham A.K. Global Chemical Kinetics of Fossil Fuels. Springer International Publishing, 2017. 315 p.

Espitalie J., Bordenave M.L. Rock-Eval pyrolysis // Applied Petroleum Geochemistry. P: Technip ed., 1993. P. 237–361.

Gottardi G., Galli E. General information on zeolites // Natural Zeolites. Springer International Publishing, 1985. P. 1–34.

Leushina E., Mikhaylova P., Kozlova E., et al. The effect of organic matter maturity on kinetics and product distribution during kerogen thermal decomposition: the Bazhenov Formation case study // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 204. № 108751. P. 1–11.

Liu J.J., Liu Z.J., Yan Y., et al. Research on the organic geochemistry and biomarkers of the large-scale barium metallogenic belt in the southern Qinling Mountains, China // J. Mineral. Petrol. 2007. Vol. 27. P. 39–48.

Pepper A.S., Corvi P.J. Simple kinetic models of petroleum formation. Part I: oil and gas generation from kerogen // Marine and petroleum geology. 1995. Vol. 12. № 3. P. 291–319.

Peters K.E., Burnham A.K., Walters C.C., et al. Guidelines for kinetic input to petroleum system models from open-system pyrolysis // Marine and Petroleum Geology. 2018. Vol. 92. P. 979–986.

Peters K.E., Walters C.C., Mankiewicz P.J. Evaluation of kinetic uncertainty in numerical models of petroleum generation // AAPG bulletin. 2006. Vol. 90. № 3. P. 387–403.

Sundararaman P., Merz P.H., Mann R.G. Determination of kerogen activation energy distribution // Energy & fuels. 1992. Vol. 6. № 6. P. 793–803.

Tang J.X., Lin W.D., Gao D.R., et al. The genesis of the Miaozhi witherite–barytocalcite–barytodelomite deposit in WanYuan city, Sichuan Province // Mineral Deposits. 1998. Vol. 17. P. 264–276.

Статья поступила в редакцию 28.05.2024,
одобрена после рецензирования 03.06.2024,
принята к публикации 25.01.2025