

УДК 553.41: 552.11

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-5-91-103

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ НЕФТИ ПОРОДАМИ, ОБОГАЩЕННЫМИ ОРГАНИЧЕСКИМ ВЕЩЕСТВОМ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Мария Александровна Большакова¹, Игорь Владимирович Кувинов²,
Елена Юрьевна Макарова³, Полина Григорьевна Зотова⁴,
Андрей Юрьевич Бычков⁵, Наталия Владимировна Пронина⁶,
Елена Владимировна Козлова⁷, Ирина Мироновна Натитник⁸,
Виктор Васильевич Мальцев⁹, Елизавета Викторовна Савельева¹⁰,
Вячеслав Борисович Скорев¹¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.bolshakova@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9240-291X>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kuwin-igor@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lenamakarova87@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1324-9107>

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; polinalisiano@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; andrewbychkov66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2560-6423>

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nvproncl@mail.ru

⁷ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия; e.kozlova@skoltech.ru

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; inatitnik@yandex.ru

⁹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; 1950vvma@gmail.com

¹⁰ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nick.mormot@yandex.ru

¹¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; skorevip@mail.ru

Аннотация. Проведено экспериментальное моделирование генерации нефти различными породами, содержащими концентрированное органическое вещество континентального происхождения. Показано, что генерация нефти происходит при нагреве органического вещества вне зависимости от его мацерального состава. Показана сопоставимость изменений состава и свойств органического вещества при замкнутом пиролизе с естественными изменениями состава и свойств органического вещества пород при катагенезе. Приведено сравнение генерационного потенциала континентального органического вещества различного мацерального состава.

Ключевые слова: генерация, уголь, органическое вещество, пиролиз

Для цитирования: Большакова М.А., Кувинов И.В., Макарова Е.Ю., Зотова П.Г., Бычков А.Ю., Пронина Н.В., Козлова Е.В., Натитник И.М., Мальцев В.В., Савельева Е.В., Скорев В.Б. Экспериментальное моделирование генерации нефти породами, обогащенными органическим веществом континентального происхождения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 5. С. 91–103.

EXPERIMENTAL MODELING OF OIL GENERATION BY SOURCE ROCKS ENRICHED WITH CONTINENTAL ORGANIC MATTER

Maria A. Bolshakova¹, Igor V. Kuvinov², Elena Yu. Makarova³, Polina G. Zotova⁴,
Andrey Ju. Bychkov⁵, Natalia V. Pronina⁶, Elena V. Kozlova⁷, Irina M. Natitnik⁸,
Victor V. Maltsev⁹, Elizaveta V. Savelieva¹⁰, Vyacheslav B. Skorev¹¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; m.bolshakova@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9240-291X>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kuwin-igor@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lenamakarova87@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1324-9107>

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; polinalisiano@gmail.com

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; andrewbychkov66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2560-6423>

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nvproncl@mail.ru

⁷ Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia; e.kozlova@skoltech.ru

⁸ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; inatitnik@yandex.ru

⁹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; 1950vvma@gmail.com

¹⁰ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nick.mormot@yandex.ru

¹¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; skorevip@mail.ru

Abstract. Experimental modeling of oil generation processes by source rocks containing concentrated organic matter of continental origin is carried out. It is shown that oil was generated when organic matter is heated, regardless of its maceral composition. The comparability of changes in the composition and properties of organic matter during closed pyrolysis with natural changes in the composition and properties of organic matter of rocks during catagenesis is shown. A comparison of the generation potential of continental organic matter of different maceral composition is given.

Keywords: generation, coal, organic matter, pyrolysis

For citation: Bolshakova M.A., Kuvinov I.V., Makarova E.Yu., Zotova P.G., Bychkov A.Yu., Pronina N.V., Kozlova E.V., Natitnik I.M., Maltsev V.V., Savelieva E.V., Skorev V.B. Experimental Modeling of Oil Generation by Source Rocks Enriched with Continental Organic Matter. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 5: 91–103. (In Russ.).

Введение. Уголь — твердое горючее ископаемое, осадочная горная порода, содержащая высокие концентрации органического вещества, преимущественно из высших растений. В процессе литификации изменение углей от бурых вплоть до антрацитов связано с катагенетическим изменением органического вещества (ОВ), в результате чего образуются углеводородные соединения (нефть, газ), что позволяет рассматривать уголь в осадочно-порodном бассейне как нефтегазоматеринские породы. Традиционно генерационный потенциал углей считается относительно невысоким — до 300 мгУВ/гТОС [Tissot, Welte, 1984]. С органическим веществом углей связывают в первую очередь газогенерацию, хотя многие исследования демонстрировали и способность углей к генерации нефти [Snowdon, 1991].

Цель данной работы — исследовать генерационный потенциал органического вещества, предшественником которого являлось вещество высшей растительности.

Актуальность выполненных исследований связана с изучением влияния на генерационный потенциал мацерального состава углей, так как он отражает исходное вещество растительности. Предполагается исследовать разницу генерационного потенциала углей, и то, как будет протекать главная фаза нефтегазообразования в катагенезе.

Подобные исследования практически не проводились для российских углей, а такая информация является ключевой при прогнозе нефтегазоносности бассейнов, в которых распространены угленосные формации.

Для достижения поставленной цели авторы решали ряд задач (рис. 1):

1. Создание коллекции углей (и других пород с концентрированным органическим веществом (КОВ)) — низкой степени катагенетической преобразования, разного возраста и генезиса, для проведения исследований и экспериментов.



Рис. 1. Схема проведения экспериментальных и аналитических работ

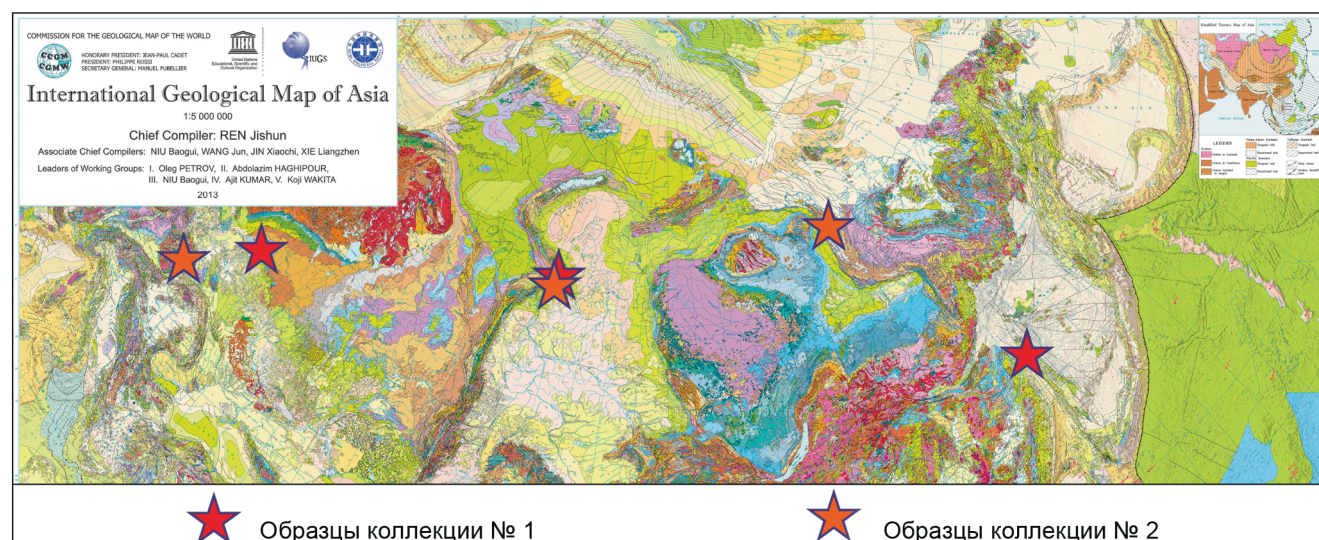


Рис. 2. Фрагмент геологической карты Азии масштаба 1:5 000 000 с точками отбора образцов [Jishun et al., 2013]

2. Углетрографические исследования для характеристики мацерального состава углей коллекции.

3. Определение степени преобразованности органического вещества пород коллекции.

4. Проведение лабораторного моделирования катагенетического созревания ОВ исследуемых пород.

5. Характеристика генерационного потенциала пород коллекции.

Рабочая коллекция. Было собрано две разные коллекции образцов, с которыми были проведены различные экспериментальные исследования (рис. 2).

Коллекция 1. Коллекция образцов, содержащих концентрированное органическое вещество, предшественниками которого было вещество высшей растительности. Образцы подбирались таким образом, чтобы в их составе содержание группы мацералов липтинита варьировалось от максимальных до минимальных значений (таблица, рис. 3).

Коллекция 2. Рабочая коллекция второго этапа работы включает образцы углей с высоким содержанием мацералов группы липтинита для демонстрации возможности генерации жидких углеводородов (УВ) и охватывает возрастной диапазон от перми до неогена:

1) угленосные отложения пермского возраста (рис. 4, а) из Печорского УБ (возраст P_{2-3sl}), были отобраны в северо-восточной части бассейна из обнажений на р. Сырьяга. Для эксперимента выбирались угли с повышенным содержанием липтинита в составе (до 18%).

Выбор данных углей обоснован высокими значениями содержания липтинита в составе и зафиксированными случаями нефтепроявления в шахтах в пределах Воркутской мульды. К сожалению, угли несколько преобразованы — 437°C по показателю $T_{\max}$ (стадии $МК_2$ – $МК_3$) и характеризуются низкими

значениями НІ — 98 мгУВ/гТОС , в связи с чем в ходе работы будет изучена остаточная генерационная способность данных углей.

2) угли палеогенового возраста (рис. 4, б), отобранные из обнажений в пределах локального углепроявления в районе поселка городского типа Тикси. Угли представляют интерес из-за своего необычного состава — в структуре угля имеются включения янтаря (до 15% об.), достигающие в диаметре 2–3 мм. Угли бурые, со значением 411°C по показателю $T_{\max}$ и 274 мгУВ/гТОС по НІ.

3) угли неогенового возраста (рис. 4, в), отобранные из бурогоугольного карьера Билина в Северо-Чешском (Мостецком) бурогоугольном бассейне. Данные угли также имеют повышенное содержание липтинита в мацеральном составе (до 20%), что обуславливает их потенциал к генерации УВ. По пиролитическим показателям уголь имеет 411°C по показателю $T_{\max}$ и повышенные значения по НІ — 433 мгУВ/гТОС , что соответствует ОВ II типа.

Методы исследования. В рамках *первого этапа* данной работы решалась задача экспериментально доказать способность ОВ III типа генерировать жидкие УВ, а также оптическими и геохимическими методами оценить изменение ОВ в процессе катагенетического созревания, моделируемого в лабораторных условиях.

Для решения поставленных задач была разработана методика эксперимента, основой которой являются пиролитические методы исследования ОВ: пиролиз на установке Hawk с использованием метода Bulk Rock и гидропиролиз, методика которого будет подробно расписана далее. Вспомогательные методы исследования ОВ — углетрография, проводимая на приборе QD1302 — Craic Technologies согласно ГОСТу 12113-94 (ISO 7404-5) и газовая хроматография на базе газового хроматографа Agilent 6890В, снабженного масс-спектрометром Agilent 5977А MSD. Схема комплекса исследований описана далее:



Рис. 3. Образцы рабочей коллекции для первого этапа работ: а — угли из Печорского УБ, б — аргиллиты из Печорского УБ, в — гагат из обнажения на о. Сахалин, з — янтарь из обнажения Калининградской области

Коллекция образцов № 1

Таблица

№ п/п образца	Литология	Место отбора	Возраст	Мацеральный состав, %			
				Vt	SVt	Lt	I
1	уголь	Печорский угольный бассейн (УБ)	P ₁ kg	35	5	25	35
2	углистый аргиллит	Печорский угольный бассейн	P ₁ kg	2	20	0	78
3	гагат	обнажение на о. Сахалин	Pg	50	0	50	0
4	янтарь	обнажение Калининградская область	Pg	0	0	100	0

1. *Предварительные исследования.* По отобран-
ным образцам проводятся пиролиз и углепетрография, чтобы оценить непреобразованный образец.
2. *Водный пиролиз (гидропиролиз (hydrous pyrolysis)).* Это метод повышения катагенетической зрелости пород в лабораторных условиях при постоянных высоких температурах до 350 °С. Проведение гидропиролиза пород — один из вариантов экспериментального моделирования катагенетического преобразования ОБ [Гордадзе, 1994; Lewan, 1985].
В ходе эксперимента отбирается проба из одного или нескольких цельных кусочков общей массой 2 г

и помещается в титановый автоклав объемом 10 мл. Для создания давления, имитирующего пластовое, в автоклав добавляется 5 мл дистиллированной воды, после чего автоклав герметично закрывается и ставится в печь на 300 °С. Температура эксперимента выбрана оптимальная, так как при температурах 100–200 °С процессы генерации УВ идут медленно и не хватает энергии для разрушения прочных межмолекулярных связей [Гордадзе, 2002], а при температурах выше 350 °С начинаются процессы вторичного крекинга, о чем свидетельствует выделение углекислого газа [Гордадзе, 2002; Бычков и др., 2015].

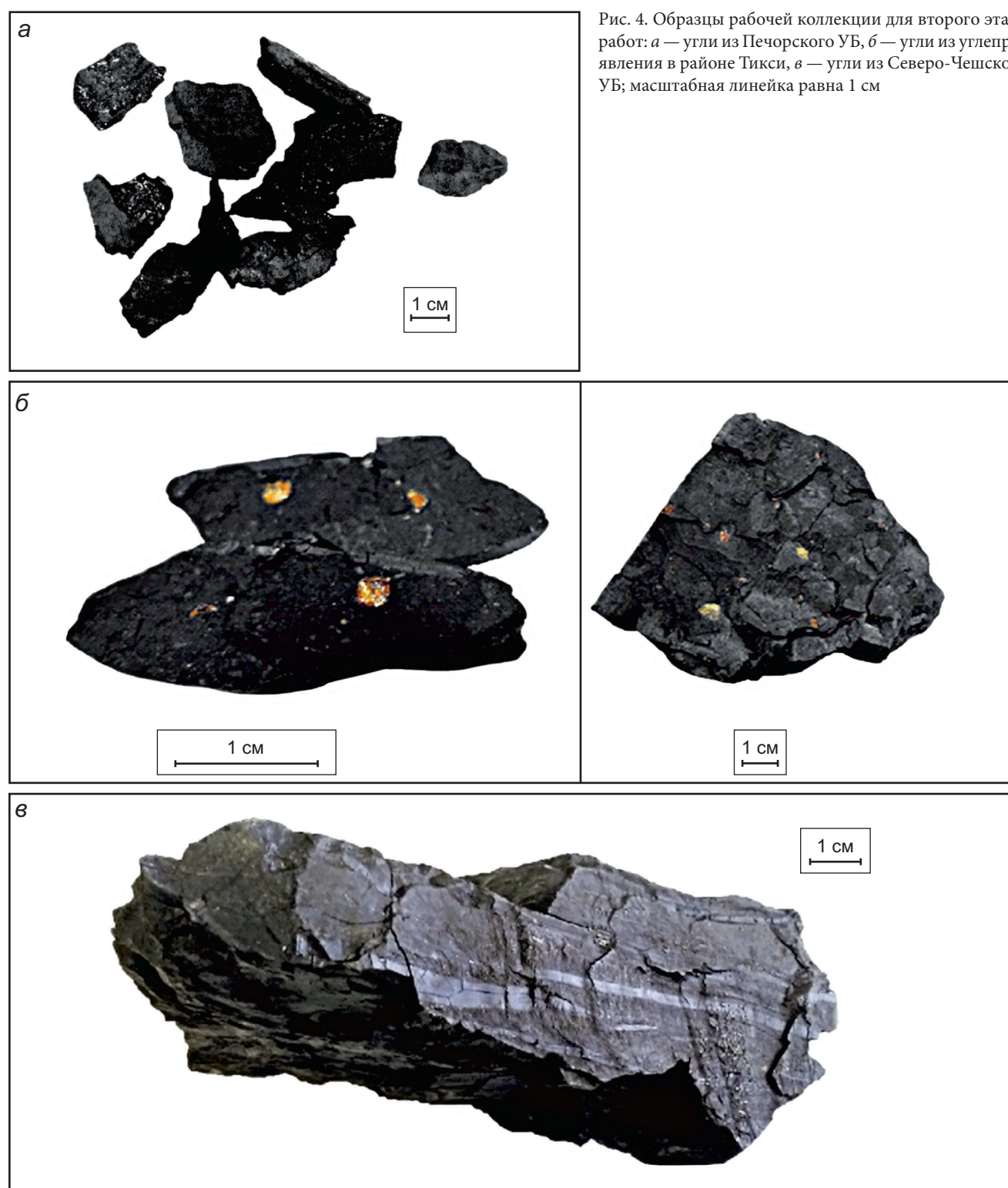


Рис. 4. Образцы рабочей коллекции для второго этапа работ: а — угли из Печорского УБ, б — угли из углепроявления в районе Тикси, в — угли из Северо-Чешского УБ; масштабная линейка равна 1 см

При температуре 300 °С в автоклаве устанавливаются условия, благоприятные для генерации УВ. По истечении 6 дней эксперимент прерывается.

Для отбора сгенерированных УВ автоклав вынимается из печи, резко остужается и открывается. Смесь воды со сгенерированными УВ сливается через край автоклава в специальную пробирку для дальнейшего разделения на УВ и воду.

Для разделения полученной смеси воды с УВ в пробирку добавляют избыточное количество рас-

творителя (гексана), после чего растворитель вытягивает из смеси все УВ, устанавливается двухфазная среда (растворитель с УВ и вода) и воду убирают при помощи делительной воронки. После выпаривания растворителя получают массу сгенерированных УВ.

3. *Заключительные исследования.* По сгенерированному флюиду проводится ГЖХ, а по преобразованному образцу — пиролиз и углепетрография, что позволяет оценить, как исследуемый образец преобразовался в процессе эксперимента.

Второй этап работы направлен на максимальную реализацию своего генерационного потенциала образцами углей с повышенным содержанием мацералов группы липтинита в процессе гидропиролиза. Для этого методика была модифицирована следующим образом.

1. Отбор образцов для исследований.

Для корректного составления рабочей коллекции было проведено макроописание и пиролиз Rock-Eval.

Критериями отбора были:

1) зрелость образца, так как для наиболее полного исследования генерационной способности необходимо наименее преобразованный образец;

2) ТОС (содержание органического углерода, масс.%) — отбирались образцы с наибольшим содержанием ОВ;

3) НІ (водородный индекс, мгУВ/гУВ) — по показателю водородного индекса отбирались наиболее перспективные для генерации УВ образцы (чем выше показатель НІ, тем выше перспективность);

4) ОІ (кислородный индекс, мгСО₂/гТОС) — так как в рабочей коллекции присутствовали образцы из обнажений, по кислородному индексу отбирались наименее окисленные образцы.

2. Гидропиролиз. Масса образца была увеличена до 15–20 г. Также образец дробится до фракции 2 мм и меньше для повышения активной площади поверхности и дальнейшего удобного забора части вещества в ходе эксперимента.

Образец помещается в титановый автоклав объемом 100 мл. Для создания давления, имитирующего пластовое, в автоклав добавляется 60 мл дистиллированной воды, после чего автоклав герметично закрывается и ставится в печь на 300 °С.

Далее эксперимент неоднократно прерывается для отбора сгенерированных УВ и небольшой части образца (не больше 0,5 г) для последующих исследований пиролитическими методами.

Для отбора сгенерированных УВ автоклав вынимается из печи, резко остужается и открывается. Смесь воды со сгенерированными УВ сливается через край автоклава в специальную пробирку для дальнейшего разделения на УВ и воду. После чего отбирается небольшая часть образца, в автоклав доливают 60 мл новой дистиллированной воды, герметично закрывают и продолжают эксперимент.

Эксперимент приостанавливался для того, чтобы отобрать сгенерированные флюиды по следующей схеме:

Начало — 3 ч — 3 ч — 6 ч — 12 ч — 24 ч — 24 ч — ... — 24 ч — 48 ч — ... — 48 ч — конец эксперимента.

Эксперимент заканчивается, когда выход сгенерированных УВ уменьшается до значений, соизмеримых с погрешностью весов (0,0001 г). обычно это занимает более 30 дней.

Разделение полученной смеси воды с УВ происходит так же, как и в первом этапе, но теперь

результатом является масса сгенерированных УВ за один этап эксперимента.

В конце эксперимента из автоклава полностью достается оставшийся образец, по которому проводятся также пиролитические исследования. Таким образом в ходе эксперимента мы получаем следующие данные:

– массу сгенерированных УВ за каждый цикл эксперимента;

– геохимические (пиролитические) показатели для образца на каждом цикле, по которым можно проанализировать геохимическое преобразование ОВ;

– сам сгенерированный флюид и образец после эксперимента, которые можно изучать дополнительными геохимическими методами.

Результаты исследования. Первый этап. Все образцы сгенерировали жидкие УВ в процессе эксперимента. Изменение ОВ можно геохимически проследить при помощи пиролитических показателей и модифицированной диаграммы Ван–Кревеллена (рис. 5).

Уголь (с исходным НІ — 78 мгУВ/гТОС) произвел 3,7 мгУВ/гТОС. $T_{\max}$ увеличился с 453 до 460 °С — органическое вещество угля было исходно преобразовано, что возможно объясняет слабую генерацию.

Аргиллит с самым низким исходным НІ — 34 мгУВ/гТОС произвел 24,8 мгУВ/гТОС. $T_{\max}$ увеличился с 470 до 514 °С. Малые объемы генерации могут быть связаны с большой долей инертинита в исходном веществе и высокой исходной зрелостью.

Янтарь (исходный НІ > 900 мгУВ/гТОС) сгенерировал 596 мгУВ/гТОС. Органическое вещество реализовало свой потенциал не полностью — $T_{\max}$ увеличился с 399 до 422 °С.

Гагат (исходный НІ — 245 мгУВ/гТОС) сгенерировал 25,6 мгУВ/гТОС. $T_{\max}$ увеличился с 425 до 439 °С — преобразованность соответствует началу нефтяного окна.

Газовая хроматография полученного нефтеподобного вещества показала, что распределение алканов во всех образцах близко к распределению алканов, типичных для природной нефти. В «нефтях» из янтара и гагата среди н-алканов доминируют четные алканы высокомолекулярной части, что свойственно нефтям из нефтематеринских пород с низкой степенью зрелости; хроматограммы жидких УВ, сгенерированных углем и углистым аргиллитом, имеют вид, типичный для природных нефтей, сгенерированных зрелым органическим веществом II–III типа (максимум приходится на C₂₁), что соответствует типу и зрелости пород, из которых выделилась эта «нефть» при гидропиролизе (рис. 6).

Углететрографические исследования показали, что облик органического вещества в образцах изменился после эксперимента. В однородных прослоях витринита появляются трещины, заполненные сгенерированным флюидом. Трещины отмечены в аншлифах в двух направлениях (параллельно и по-

HI mg HC/g TOC

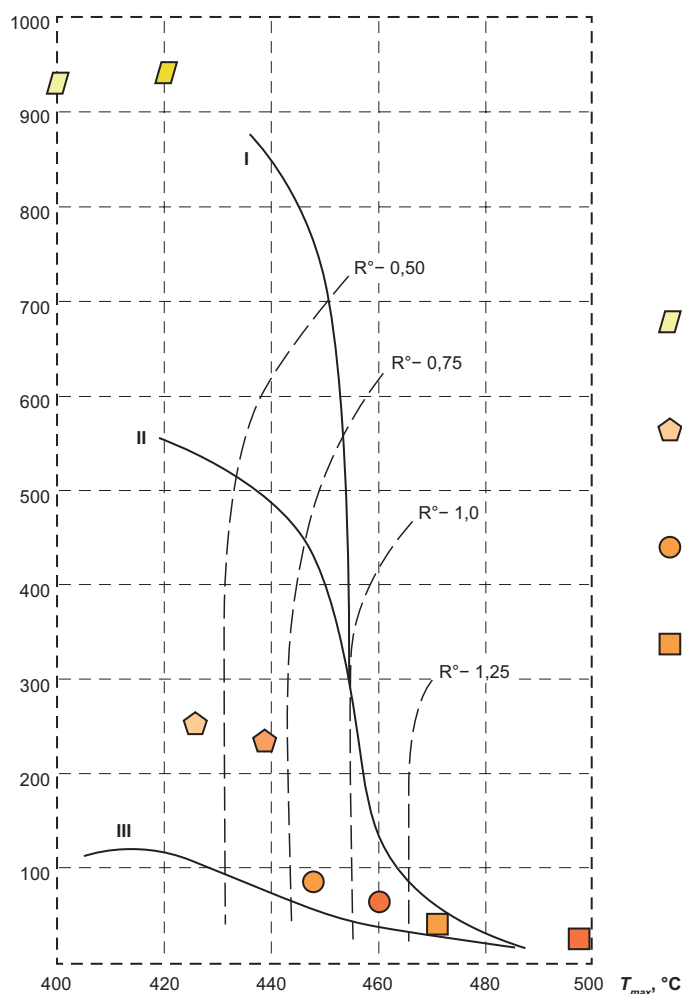


Рис. 5. Результат преобразования ОВ образцов после 6 дней гидропиролиза на модифицированной диаграмме HI– $T_{\max}$

перек напластования), затухают к краям прослоев витринита (рис. 7).

Результаты эксперимента показали, что 6 дней недостаточно для значительной реализации генерационного потенциала образцов, в связи с чем второй этап работы был проведен с более продолжительными сроками (до 34 дней).

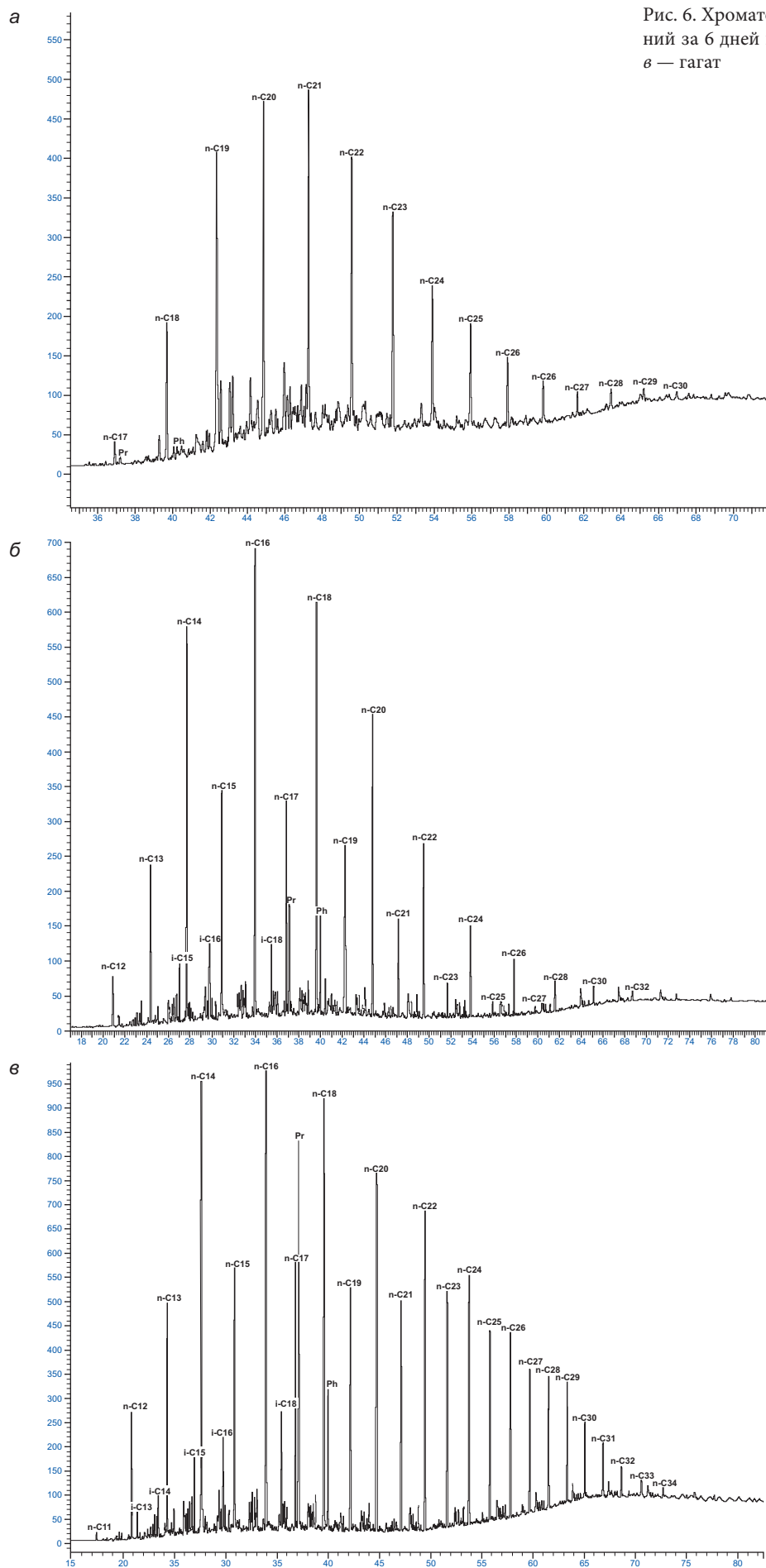
Второй этап. 1. Гидротермальное воздействие на образцы высоколигнитовых углей (пермь, Воркутская мульда, Печора).

Гидропиролиз пермских углей из Печорского угольного бассейна (P_{2-3sl}) длился 32 дня. За это время генерационная способность образца составила 1,24 мгУВ/г породы — хороший показатель, учитывая, что порода уже была довольно зрелой. На графике генерации УВ соединений от времени видно, что закономерность генерации носит сложный характер — выход лабораторно сгенерированной нефти колеблется в диапазоне 0,01 до 0,1 мгУВ/г породы и период колебания составляет 1–2 дня (рис. 8). Пик генерации приходится на 12 день эксперимента и составляет 0,24 мг УВ/г породы. На 20 и 28 день наблюдается отсутствие выхода УВ, свидетельствующее о практически полном истощении генерационного потенциала образца.

Угли продемонстрировали относительно хорошую генерационную способность. В процессе искусственного созревания порода преобразовалась со значения 437 до 452 °C по $T_{\max}$ (конец МК₃), но водородный индекс практически не изменился — 98–89 мгУВ/гТОС (рис 9). Тренд, наблюдаемый на диаграмме плохо выражен, но соответствует тренду характерному для III типа ОВ. Из-за исходно низких показателей HI и значительной исходной степени зрелости широкого диапазона изменения параметров HI и $T_{\max}$ на графике (рис. 9) не наблюдается.

2. Гидротермальное воздействие на угли с янтарем (палеоген, Тикси).

По углям из района Тикси (Pg) длительность эксперимента составила 34 дня. За это время генерационная способность образца составила 6,2 мгУВ/г породы, что является очень высоким показателем для ОВ III типа. Диаграмма генерации УВ в течение эксперимента показывает, что пик генерации распространяется практически на все время эксперимента и заканчивается только к 30–34 дню (рис. 10), но при этом имеет малые объемы генерации. Наибольший временной промежуток генерации и малые объемы выхода УВ соответствуют ОВ III типа. Максимумы генерации наблюдаются на 6 и 9 день эксперимента



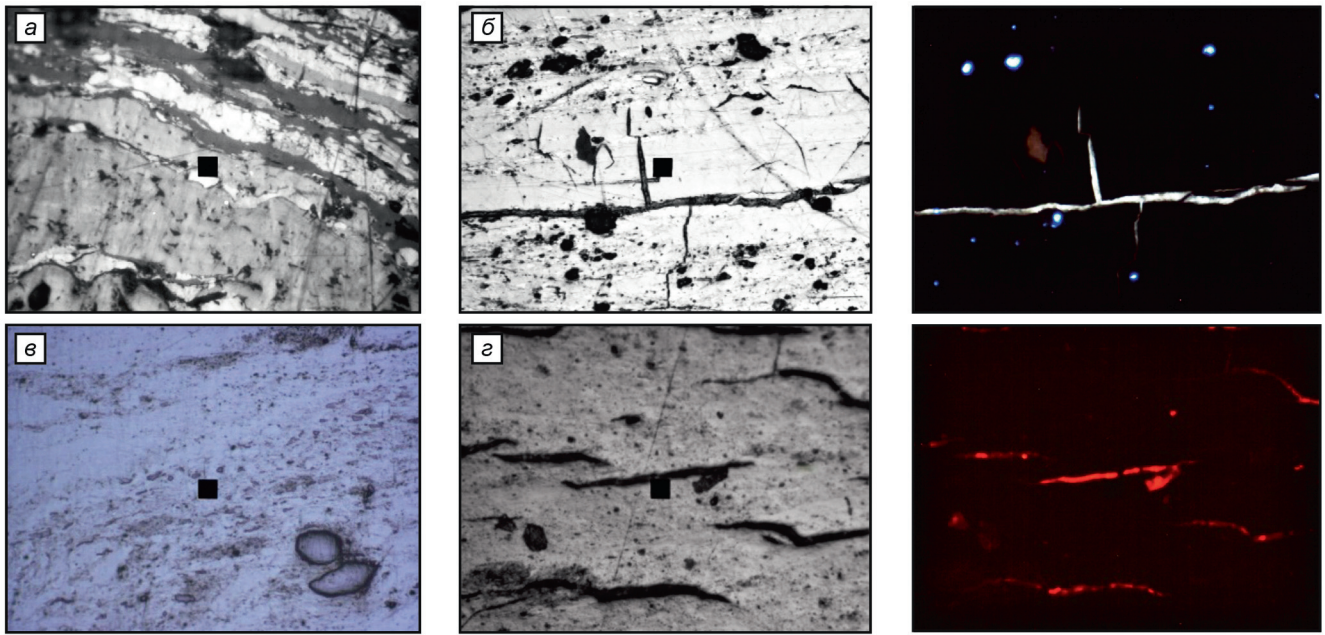


Рис. 7. Изменение внешнего вида ОВ в процессе гидропиролиза. Уголь (а) и гагат (в) — до гидропиролиза и уголь (б) и гагат (г) — после гидропиролиза в обычном (фото слева) и УФ (фото справа) свете

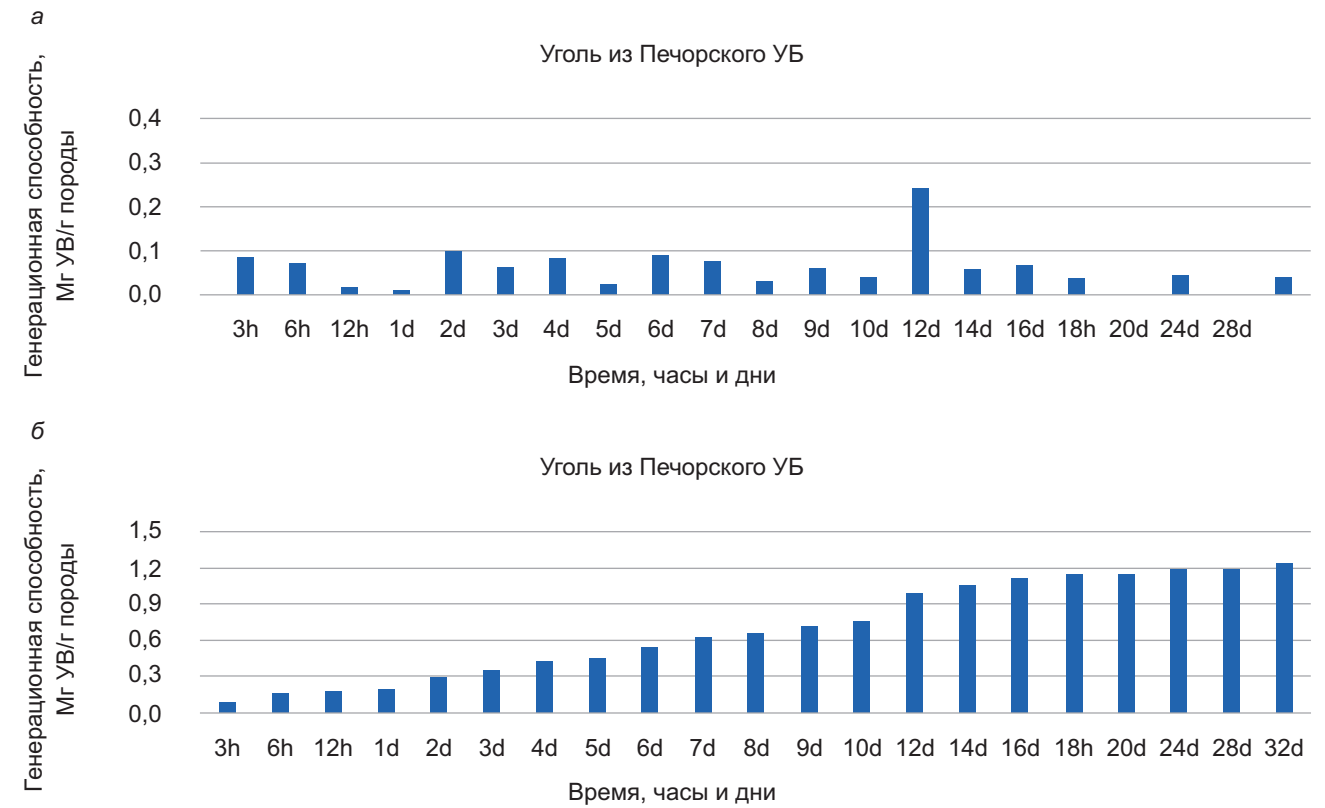


Рис. 8. Диаграмма генерации УВ соединений образцами углей Воркутского района: а — по циклам, б — кумулятивная

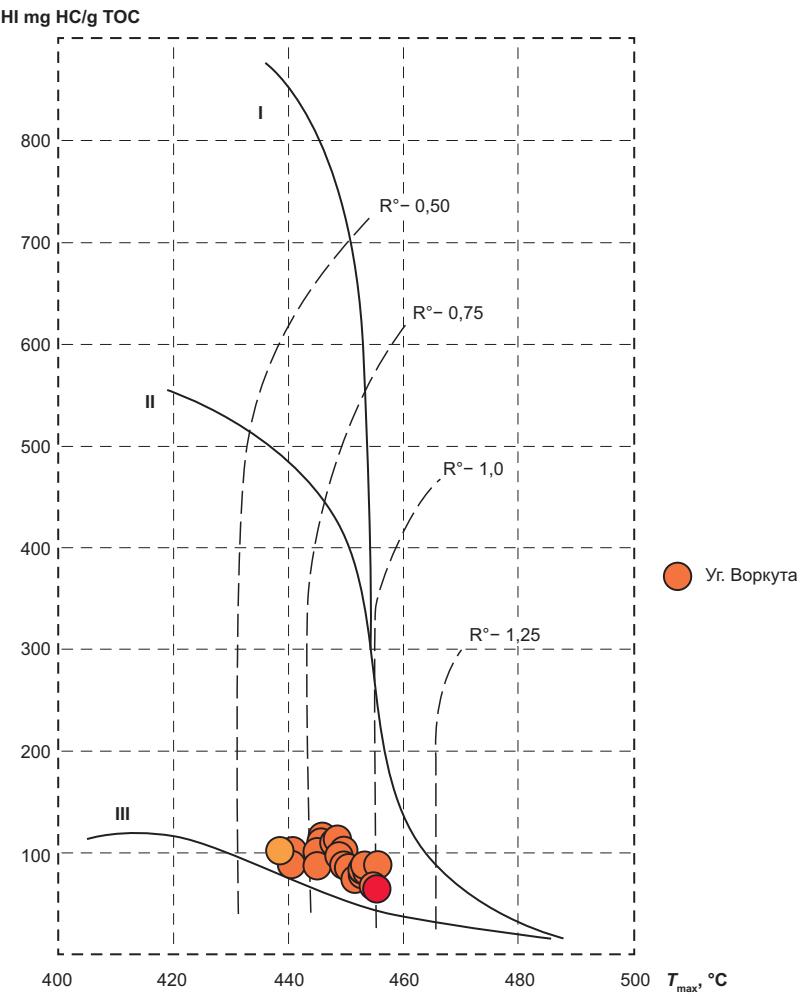


Рис. 9. Изменения пиролитических характеристик ОВ угля из Печорского УБ в процессе гидропиролиза (за 32 дня) на модифицированной диаграмме Ван-Кревелена

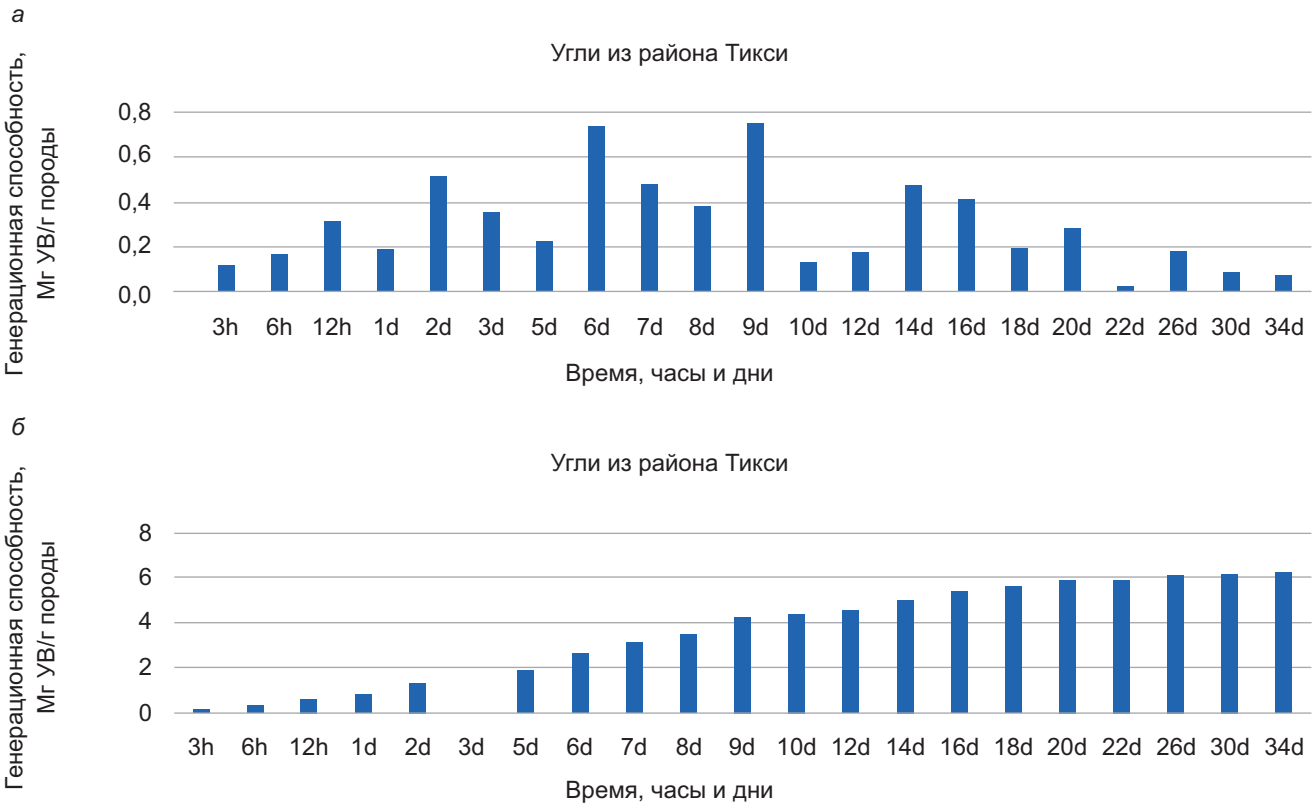


Рис. 10. Диаграмма генерации УВ образцами углей района Тикси: а — по циклам, б — кумулятивная

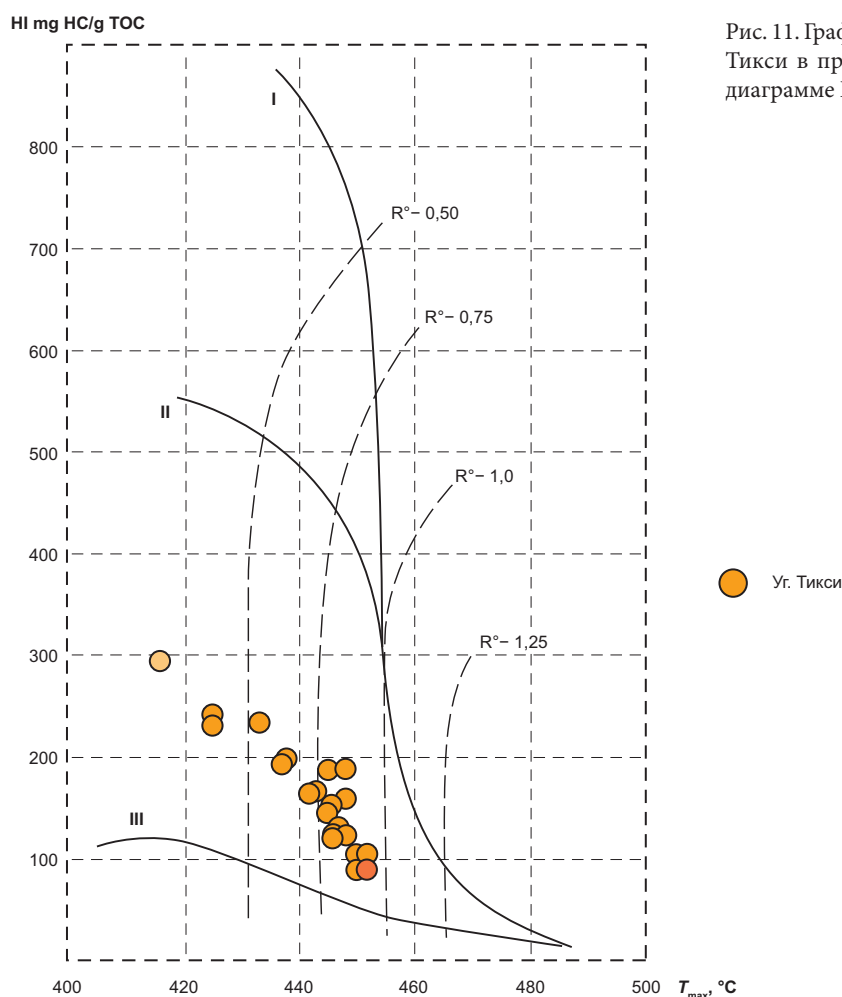


Рис. 11. График изменения ОВ палеогеновых углей из района Тикси в процессе гидропиролиза на модифицированной диаграмме Ван-Кревеллена

и составляют всего лишь 0,74 мгУВ/г породы. Общая закономерность генерации с колебаниями с периодом 1–2 дня наблюдается и в данном эксперименте.

Угли продемонстрировали прекрасную генерационную способность для ОВ III типа. В процессе эксперимента порода значительно преобразовалась, значения T_{max} изменились с 415 по 450 °C (ПК — начало МК₃), водородный индекс также изменился сильно — с 246 до 89 мгУВ/гТОС. Тренд преобразования, наблюдаемый на диаграмме выражен хорошо и соответствует тренду III типа ОВ с небольшим отклонением к тренду, типичному для II типа ОВ, что объясняется наличием включений янтаря (рис. 11).

3. Гидротермальное воздействие на бурые угли (неоген, Северо-Чешский УБ).

Эксперимент по углям Билинского района длился 34 дня. Генерационная способность образца высокая для углистого ОВ — 5,56 мгУВ/г породы. На диаграмме генерации УВ отчетливо выделяются 2 пика генерации (рис. 12), первый из которых отмечается с 6 часов по 7 день эксперимента, а второй — с 10 дня по 22. Наличие 2 пиков генерации связано с различным ОВ, которое начинает генерировать УВ в разное время. Максимум генерации в 1 пике приходится на 12 часов эксперимента (0,6 мгУВ/г породы), а во втором пике — на 14 день (0,36 мгУВ/г породы). Общие объемы генерации низкие, характерные для

ОВ III типа. Общая закономерность генерации колебаниями с периодом 1–2 дня наблюдается и в данном эксперименте, но не так выражено, как в остальных.

Угли продемонстрировали хорошую генерационную способность для углистого ОВ. Катагенетические изменения угля Билины являются самыми широкими, значения T_{max} изменились с 411 до 500 °C (ПК — начало МК₃), изменения в водородном индексе говорят о том, что уголь практически исчерпал свои генерационные возможности в ходе эксперимента: HI снизился с 433 до 44 мгУВ/гТОС. Тренд преобразования, наблюдаемый на диаграмме выражен плохо и является переходным между трендами для ОВ III и II типа, что объясняется смешанным составом ОВ угля (рис. 13). Возможно и влияние на пиролитические параметры (HI) присутствие растворимой части ОВ в некоторых образцах.

Выводы. Органическое вещество, предшественником которого являлась высшая растительность, способно преобразовываться с выделением нефти, даже если в мацеральном составе отсутствует группа липтинита. Однако, чем выше доля этой группы мацералов, тем выше объемы генерации жидких углеводородов.

Газо-жидкостная хроматография полученного нефтеподобного вещества показала, что сгенерированный в лабораторных условиях флюид соответ-

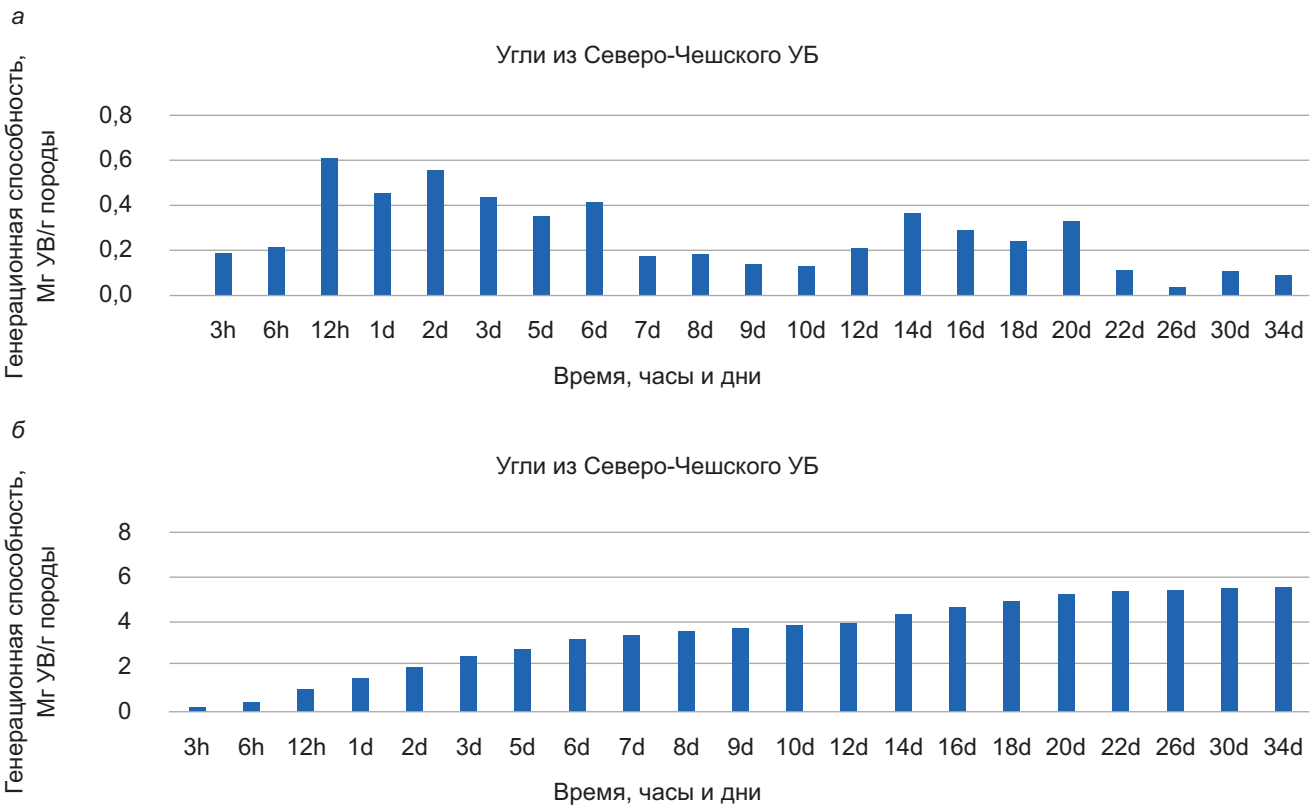


Рис. 12. Диаграмма генерации УВ образцами углей из Северо-Чешского УБ: а — по циклам, б — кумулятивная

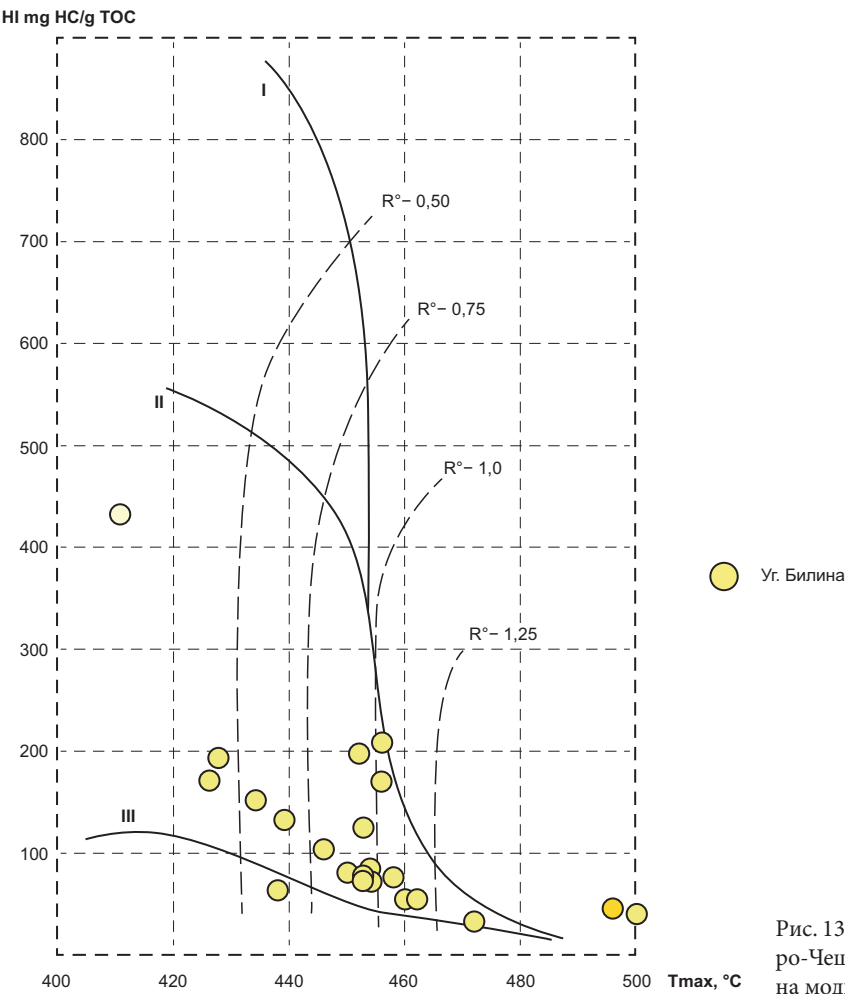


Рис. 13. График изменения ОВ неогеновых углей Северо-Чешского УБ (уг. Билина) в процессе гидропиролиза на модифицированной диаграмме Ван-Кревеллена

ствует флюиду, генерирующемуся в естественных условиях в земной коре.

С помощью углепетрографии было продемонстрировано изменение ОВ в процессе катагенетического преобразования — в однородных прослоях витринита появляются трещины, заполненные сгенерированным флюидом. Трещины однонаправлены напластованию и затухают к краям прослоев витринита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бычков А.Ю., Калмыков Г.А., Бугаев И.А. и др. Экспериментальные исследования получения углеводородных флюидов из пород баженской свиты при гидротермальном воздействии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 4. С. 34–39.

Гордадзе Г.Н., Соломатина И.П. Термолиз керогена как метод исследования нефтематеринских толщ // Геология нефти и газа. 1994. № 8. С. 41–48.

Гордадзе Г.Н. Термолиз органического вещества в нефтегазопоисковой геохимии. М.: ИГиРГИ, 2002. 336 с.

Jishun Ren, Baogui Niu, Jun Wang, et al. Advances in research of Asian geology — A summary of 1:5 M Interna-

тional Geological Map of Asia project // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. Vol. 72. P. 3–11.

Lewan M.D., MacKenzie A.S., Durand Brenda, et al. Evaluation of Petroleum Generation by Hydrous Pyrolysis Experimentation: Discussion // Philosophical Transactions A. 1985. Vol. 315. N 1531. P. 132–134.

Tissot B.P., Welte D.H. Petroleum formation and occurrence // Springer-Verlag. 1984. 720 p.

Snowdon L.R. Oil from type III organic matter; resinite revisited // Organic Geochemistry. 1991. Vol. 17. P. 743–747.

Статья поступила в редакцию 02.06.2024, одобрена после рецензирования 03.06.2024, принята к публикации 25.10.2024