
СВОБОДНАЯ ТРИБУНА

УДК 552.57: 54.02

DOI: 10.15372/KhUR2024623

EDN: FFGHIU

Перспективы развития природоподобных технологий термогидролитической переработки нетрадиционного углеводородного сырья

Ю. В. РОКОСОВ*Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
Кемерово, Россия**E-mail: iuhm@ficuuh.ru**(Поступила 07.12.2023; после доработки 12.12.2023; принята к печати 25.09.2024)*

Аннотация

Для развития многих регионов России, Казахстана, Китая, Монголии и других стран, заинтересованных в использовании своих нетрадиционных углеводородных ресурсов (сапропелитовые угли и горючие сланцы, микроводорослевые биомассы), рассматривается новая стратегия разработки природоподобных технологий их переработки, а также разведки и добычи трудноизвлекаемых сланцевых углеводородов посредством технологизации открытия закономерности гидротермального нафтоидогенеза. Главное в этом открытии – это то, что в гидротермальных флюидах (суб- и суперкритических водных средах) можно целенаправленно производить молекулярную “разборку” органического вещества сапропелитовых пород и обогащенных липидами микроводорослей на органические соединения, которые сохраняют структурные особенности исходных фрагментов органической массы и в значительной части относятся к соединениям-биомаркерам. Эти соединения-биомаркеры надежно идентифицируются современными хроматографическими и спектральными методами, поэтому появляется возможность мониторинга информации о взаимосвязи генезиса, состава и структуры органической массы осадочных пород с их свойствами. Такая информация важна при создании высокоэффективных способов добычи сланцевых углеводородов. Она же применима и для молекулярной диагностики углеводородогенерирующего потенциала осадочных бассейнов посредством оценки литогенетической зрелости органического вещества пород по составу и содержанию соединений-биомаркеров. Ожидается получение технологически значимых результатов повышения эффективности переработки нетрадиционного углеводородного сырья за счет возможности контролируемого селективного расщепления углерод-углеродных и углерод-гетероатомных кросс-связей в органической массе микроводорослей и горючих сланцев в окислительно-гидролитических условиях, аналогичных тем, которые имеют место в природных, экологически чистых процессах нафтоидогенеза. Обоснована необходимость расширения и углубления исследований по технологизации научного открытия закономерности гидротермального нафтоидогенеза, представляющего основу развития природоподобных технологий переработки нетрадиционного углеводородного сырья в ценные химические продукты (компоненты моторных топлив, поверхностно-активные вещества и др.) и материалы (дорожные и строительные битумы).

Ключевые слова: нетрадиционное углеводородное сырье, природоподобные технологии, закономерность гидротермального нафтоидогенеза, технологизация научного открытия

*Светлой памяти
Алексея Эмильевича Конторовича –
академика РАН, руководителя
Кемеровского научного центра СО РАН
(2009–2019 гг.) и организатора
Федерального исследовательского
центра угля и углекислоты СО РАН*

Хотя основой для понимания реакционной способности осадочного органического вещества в гидротермальных условиях первоначально служили именно геохимические модели [1], перспективы химико-технологических приложений открытия закономерности гидротермального нафтоидогенеза (ОЗГН) – теоретических и методических основ новых систем молекулярного анализа и переработки органического вещества осадочных пород и биомассы микроводорослей – потенциально велики, и они только начинают осознаваться. Суть этого научного открытия состоит в том, что установлена неизвестная ранее закономерность последовательных преобразований липидов микроорганизмов в осадочное органическое вещество и в первичные нафтоидные компоненты с участием гидротермальных процессов в земной коре. Закономерность заключается в преобразовании липидов микроорганизмов в макромолекулы, которые сохраняются в процессе диагенеза, составляют основную массу сапропелитового керогена и превращаются в условиях гидротермального разложения в первичные нафтоидные компоненты. Закономерность обусловлена тем, что происходит окислительная полимеризация и конденсация липидных компонентов клеточных мембран микроорганизмов с

образованием полимерлипидных молекул с пероксидными, простыми эфирными и углерод-углеродными поперечно-сшивающими связями, селективно расщепляющимися в окислительно-гидролитических условиях.

Замысел технологизации ОЗГН направлен на решение триединой проблемы развития природоподобных технологий наземной термогидролитической переработки нетрадиционного углеводородного сырья (сапропелитовые угли, горючие сланцы и микроводорослевые биомассы), а также разведки и подземной добычи сланцевых углеводородов как трудноизвлекаемых углеводородных ресурсов. Мировые запасы этих трудноизвлекаемых углеводородных ресурсов в переводе на нефтяной эквивалент примерно в десять раз превышают запасы традиционной нефти и природного газа. При создании и осуществлении новой стратегии разработки природоподобных технологий переработки сапропелитов и биомассы микроводорослей, а также разведки и добычи сланцевых углеводородов упор делается на взаимосвязанную совокупность теоретических и экспериментальных доказательств ОЗГН [2].

В табл. 1 представлены теоретические и методические наработки, выступающие в качестве научного задела технологизации ОЗГН и служащие его доказательствами. В сфере разведки акцент делается на прогнозирование углеводородогенерирующего потенциала осадочных бассейнов по составу и содержанию нафтоидных компонентов-биомаркеров в продуктах экспериментального гидротермального разложения осадочного органического вещества. В сфере добычи – на эффективную подземную переработку

ТАБЛИЦА 1

Технологическое значение открытия закономерности гидротермального нафтоидогенеза (ОЗГН)

Методология исследований	Технологизация ОЗГН
Теоретические и методические основы	Результаты компьютерного синтеза и разложения структурных элементов органического вещества Результаты пиролизической обработки углеводородогенерирующих пород или биомассы микроводорослей в условиях термогидролиза
Структурно-молекулярная информация	Биогенетические представления о строении и свойствах органического вещества Молекулярный состав и содержание термогенетических продуктов
Сравнительный анализ данных и их использование	Для подбора способов “разборки” структурных элементов органического вещества на “мономеры” Для минимизации экологических рисков при переработке сапропелитов и биомассы микроводорослей и добыче углеводородов из горючих сланцев Для оценки степени катагенеза органического вещества по составу и содержанию молекул-биомаркеров
Результаты разработки природоподобных технологий	Технологии переработки сапропелитов и биомассы микроводорослей Технологии подземной добычи сланцевых углеводородов Технологии разведки углеводородогенерационного потенциала осадочных бассейнов

горючих сланцев и извлечение сланцевой нефти посредством природоподобных технологий в условиях, аналогичных тем, которые имеют место в природных, экологически чистых процессах нафтоидогенеза. В сфере переработки акцент делается на развитие природоподобных технологий наземного производства из нетрадиционного углеводородного сырья ценных химических продуктов (компоненты моторных топлив, поверхностно-активные вещества и др.) и материалов (дорожные и строительные битумы). Технологизация ОЗГН направлена на решение практических задач переработки сапропелитов, биомассы специально культивируемых микроводорослей, а также разведки и добычи сланцевой нефти для развития многих регионов России и других стран, заинтересованных в эффективном использовании своих нетрадиционных и трудноизвлекаемых углеводородных ресурсов. Цель перспективных разработок – посредством технологизации ОЗГН создать и внедрить новую стратегию разведки и добычи сланцевых углеводородов, а также обеспечить развитие природоподобных технологий наземной термогидролитической переработки сапропелитовых углей, горючих сланцев и микроводорослевой биомассы.

Значимость ОЗГН заключается в том, что оно делает возможной разработку как новых методов разведки углеводородогенерирующего потенциала осадочных бассейнов, так и природоподобных технологий подземной добычи сланцевой нефти, а также природоподобных технологий наземной переработки сапропелитовых углей, горючих сланцев и биомассы микроводорослей. Мировой масштаб этих научных разработок определяется действием не только в интересах развития регионов России, но и других стран, заинтересованных в эффективном использовании своих углеводородных ресурсов. Методология исследований состоит в том, что при создании и реализации новой стратегии разведки и добычи трудноизвлекаемых сланцевых углеводородов, также как и переработки сапропелитовых пород и микроводорослевой биомассы, упор делается на взаимосвязанную совокупность теоретических и экспериментальных доказательств ОЗГН (см. табл. 1).

Растущий объем потребления природных топливных ресурсов (нефть, газ) при сокращении их запасов ставит задачу поиска новых источников энергии. Одними из них являются горючие сланцы. Однако обладающими большим потенциалом могут оказаться возобновляемые экологически безопасные источники энергии, самые

перспективные среди которых – микроводоросли. Нарождающийся конкурентный рынок биотоплив, получаемых из биомассы микроводорослей, внесет существенные коррективы в перспективы расширения сырьевой базы углеводородов за счет горючих сланцев. Однако развитие теоретических и методических основ новых систем молекулярного анализа полимерлипидного органического вещества сланцев позволит одновременно занять лидирующие позиции и в разработке научных основ переработки липидной биомассы микроводорослей в компоненты моторных топлив и другие продукты для промышленного органического синтеза.

Совсем еще недавно в качестве возобновляемых источников энергии в основном рассматривались биомассы различных зерновых и масличных культур. Из них получали биоэтанол и биодизель [3–5]. Однако мир стоит на пороге значительной трансформации сельского хозяйства и масштабных вырубок лесов. Вырубка тропических лесов под посадки сахарного тростника и масличных культур ведет к изменению климата и серьезным экологическим проблемам. Одной из главных причин, определяющих в долгосрочной перспективе невозможность производства биотоплива из используемых “топливных культур” в количествах достаточных для существенной замены нефтяного топлива, является ограниченность имеющихся на Земле ресурсов пресной воды. Возобновляемой культурой, обладающей наибольшим потенциалом с точки зрения выработки энергии, для которой не нужны пахотные земли и которая в процессе жизнедеятельности потребляет CO_2 , а выделяет O_2 , являются микроводоросли. Научные основы процессов переработки горючих сланцев и липидной биомассы микроводорослей можно и, на наш взгляд, следует разрабатывать одновременно.

Использование термогидролиза при термическом разложении органических веществ относится к передовым энергосберегающим, экологически безопасным природоподобным технологиям не только в случае ископаемого и растительного сырья, но также в случае отработанных ресурсов животного происхождения. Речь может идти об утилизации тел животных целиком по эпидемиологическим соображениям или остатков тел после их использования в пищевой промышленности. Процесс представляет собой щелочной термогидролиз, под воздействием которого остатки животной биомассы превращаются в порошкообразный костный материал. Это – ускоренная версия естественного процесса де-

струкции животного тела (разложения), управляемого гидролизом. Природный процесс минерализации тел в захоронениях – не что иное, как щелочной гидролиз с участием бактерий почвы. В обычных условиях этот процесс занимает годы. Термогидролиз биомассы в автоклавах, работающих под давлением, – достаточно быстрый процесс для относительно небольшого количества ткани и веществ. После двух-трех часов в результате гидролитических реакций образуются растворы аминокислот, пептидов, сахара, мыла (соли жирных кислот), которые безопасны для дальнейшей утилизации.

Естественным продолжением работ по технологизации ОЗГН являются успешные эксперименты по автоклавной термогидролитической обработке горючих сланцев в тех же термобарических условиях (374.4 °C, 22.2 МПа), которые были определены как оптимальные в случае термогидролиза сапропелитовых углей [6, 7]. В этих условиях термолиз сланцев также приводил к высокому выходу алифатических карбоновых кислот и кетонов (до 40 % в расчете на органическую массу горючего сланца), что свидетельствовало о возможности инновационного решения проблемы использования горючих сланцев [8, 9] и тем самым наводило на мысль о еще большем расширении исследований. Так, с одной стороны, в исследовательский процесс помимо сапропелитовых углей были вовлечены горючие сланцы с органическим веществом сапропелитовой природы. С другой стороны, исследования были распространены на сапропелиты из месторождений других стран – Казахстана, Монголии и Китая. Таким образом, очередной научный вклад в решение проблемы технологизации ОЗГН был осуществлен путем выявления состава, содержания, структурных особенностей, молекулярного распределения основных органических компонентов в продуктах термогидролиза ранее не изученных сапропелитов – кушмурунского угля (Казахстан), хуутбулагского (Монголия) и майомингского (Китай) горючих сланцев [10–14].

По мере развертывания вышеупомянутых работ авторы [15, 16] пришли к единому мнению о том, что технологизация ОЗГН невозможна без оперативного решения задач мониторинга состава, содержания, структурных особенностей, молекулярного распределения термогидрогенетических нафтоидных компонентов, образующихся в условиях экспериментального гидро-термального разложения углеводородогенери-

рующих пород, а также задач установления закономерных связей между содержанием термогидрогенетических компонентов и литогенетической зрелостью органического вещества этих пород. В результате ими было предложено разработать единый комплекс методик, приборов и оборудования в виде опытно-демонстрационного стенда (рабочей станции [17, 18]) мониторинга реакционной способности нетрадиционного углеводородного сырья, продуктов и остатков его термогидролитической переработки. В лабораторном варианте реализации процедур так называемого геохимического, углехимического и экологического мониторинга было рекомендовано использовать систему R-401 (Южная Корея). Это система сверхкритической флюидной экстракции (SFE) и окисления в сверхкритической воде (SCWO), которая пригодна для осуществления селективного окислительно-гидролитического расщепления структурных элементов органического вещества в относительно низкомолекулярные соединения.

На наш взгляд, разработка и развитие природоподобных технологий добычи сланцевой нефти на основе идеи технологизации ОЗГН – это многообещающий план для обеспечения в ближайшем будущем устойчивой работы топливно-энергетического комплекса и развития социально-экономической сферы во многих регионах России, заинтересованных в эффективном использовании своих трудноизвлекаемых углеводородных ресурсов. Например, значительное распространение “доманикоидов” и “баженитов” по площади и в разрезе в пределах основных нефтегазоносных провинций Российской Федерации [19] свидетельствует в пользу высокой вероятности масштабной добычи углеводородов, основанной на применении результатов технологизации ОЗГН – новейших технологий глубокой переработки этих минеральных ресурсов в углеводородные продукты и сопутствующие органоминеральные материалы.

На территории России горючие сланцы довольно широко распространены в Европейской части (Предкавказье и Предуралье), Западной Сибири, Восточной Сибири и на Дальнем Востоке [20]. Наиболее известны куонамская (Восточная Сибирь, ранний кембрий), доманиковская (Предуралье, поздний девон) и баженовская (Западная Сибирь, поздняя юра-ранний мел) углеводородсодержащие свиты. Сланцевые толщи имеются также и в других регионах России, например: в Южном (худумская и кумская сви-

ты, а также сланцы пермо-триаса) и Дальневосточном федеральных округах (малгинская, нинканская и бияхская свиты).

Наиболее перспективными считаются куонамская свита (Западная и Восточная Сибирь, ранний кембрий) с прогнозными ресурсами углеводородов 700 млн т, доманиковская свита (Предуралье, поздний девон) – 898 млн т, баженевская свита (Западная Сибирь, поздняя юра-ранний мел) – 9671 млн т. Последние две свиты по прогнозным ресурсам представляются наиболее значимыми. Они же имеют лучшие перспективы в плане транспортной доступности и развитой нефтегазовой инфраструктуры [21].

Суть американских технологий добычи сланцевой нефти заключается в генерировании углеводородов непосредственно из пласта при бурении горизонтальных скважин с последующими множественными гидроразрывами пласта [22]. В породах пробиваются горизонтальные скважины, в них закачивают воду, песок и различные химикаты. В результате гидроудара пласт ломается, и нефть вместе с газом выходит на поверхность. Часто при этом необходимо предварительно проводить термический или химический разогрев пласта.

Горючие сланцы в России отличаются от пород, в которых залегает сланцевая нефть в США. По мнению академика Алексея Эмилевича Конторовича [23], просто копировать американские технологии нельзя. Необходимо создавать отечественные технологии. В этом смысле представляется важным то обстоятельство, что теоретические и экспериментальные результаты ОЗГН позволяют предсказывать выход и состав получаемых сланцевых углеводородов при термогидролитической переработке сланцевых пород с органическим веществом сапропелитовой природы. Термогидролиз горючих сланцев всегда приводит к образованию с высокими выходами сложных смесей кислых, нейтральных и слабокислых кислородсодержащих соединений, которые представляют собой готовые к применению поверхностно-активные вещества (карбоновые кислоты) и полупродукты (алкилкетоны, арилалкилкетоны, алкилфенолы, инданолы, амининданолы, алкилхинолины) для синтеза поверхностно-активных веществ, компонентов моторных топлив и лекарственных препаратов.

Под добычей сланцевых углеводородов в нашем случае подразумевается подземная термогидролитическая переработка горючих сланцев непосредственно в местах их залегания с последующим извлечением жидких продуктов на по-

верхность. Продукты подземного техногенного нафтоидогенеза – те же органические соединения, которые образуются при наземной термогидролитической переработке сапропелитовых углей в соответствии с принципиальной технологической схемой, ранее разработанной в Институте углехимии и химического материаловедения Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН (Кемерово) [24].

Для наземного получения сланцевой нефти горючие сланцы подвергают термической обработке. Способы такой термообработки давно известны – это пиролиз, гидрирование или термическое растворение [25–28]. Существующие принципиальные технологические схемы переработки горючих сланцев основываются на этих методах пиролиза, гидрирования и термического воздействия. Метод пиролиза предполагает увеличение температуры пласта до 900 °С. Суть метода гидрирования заключается в реакции присоединения водорода к структурным элементам осадочного органического вещества при температуре 400 °С с использованием какого-либо катализатора (медь, никель, платина). При термическом воздействии пласт нагревают до 80 °С и далее осуществляют его отстаивание, в результате чего и получают необходимую смолу. Предложение в русле технологизации ОЗГН основано на принципиально другом методе – методе термогидролиза. В этом случае происходит гидротермальное разложение органического вещества (керогена) с образованием первичной гидротермальной нефти (продуктов техногенного нафтоидогенеза). Реакции термогидролиза протекают при температуре 400 °С в водной среде.

К настоящему времени накоплен небольшой опыт в области лабораторной термогидролитической переработки некоторых горючих сланцев, в том числе сланцевой породы из баженевской свиты [29]. Но можно полагать, что в течение нескольких лет станет возможным переход от лабораторных опытов наземного производства сланцевых углеводородов к полевым испытаниям подземной (непосредственно в слое сланца) термогидролитической их добычи.

Извлекаемые ресурсы углеводородов баженевской свиты, по мнению академика А.Э. Конторовича, составляют от 18 до 60 млрд т, т. е. он считал, что это “навверняка” 18 млрд т, а 60 млрд т – это “если помечтать” [30]. Но понятно, что нужно не мечтать, а разрабатывать технологии, которые позволят существенно повысить производительность добычи этих так называемых трудноизвлекаемых углеводород-

ных ресурсов. Извлекаемость органической массы из баженовских отложений при подземной переработке составляет пока 5 %, т. е. 95 % органического вещества остается в залежах горючих сланцев.

Первая часть плана исследований по-прежнему включает поиск закономерных связей между составом и содержанием основных продуктов гидротермальной обработки осадочных пород и литогенетической зрелостью их органической массы. Пока наличие таких закономерных связей установлено только для некоторых образцов сапропелитовых углей и горючих сланцев из небольших месторождений России, Казахстана, Китая и Монголии [31–34]. Предстоит провести термогидролитические исследования по прогнозированию углеводородогенерирующего потенциала юрских и триасовых отложений Западно-Сибирского мегабассейна. Первые прогнозы могут исходить из оценок степени литогенетической зрелости осадочного органического вещества по составу и содержанию биомаркеров в продуктах термогидролиза нескольких десятков образцов из баженовской свиты (Западная Сибирь). В дальнейшем эти исследования необходимо распространить на такое же количество образцов из куонамской свиты (Западная и Восточная Сибирь) и доманиковой свиты (Предуралье).

Вторая часть плана исследований включает разработку природоподобных термогидролитических технологий добычи сланцевой нефти из углеводородогенерирующих пород баженовской свиты (в дальнейшем эти исследования следует распространить на углеводородогенерирующие породы из куонамской и доманиковой свит). Таким образом, основными изученными углеводородными ресурсами должны стать ранее не исследованные породы, связанные с осадочными отложениями, являющимися наиболее перспективными для прогнозируемых ресурсов.

В ходе реализации дальнейших проектов необходимо постоянно мониторить состав, содержание, структурные особенности, молекулярное распределение углеводородов, нейтральных и кислых кислородсодержащих компонентов в продуктах термогидролиза этих осадочных пород. Эти результаты должны стать основой электронной базы спектральных и структурных данных, сформированных по итогам хроматографических и спектральных анализов сложных смесей соединений, генерируемых органической массой пород в условиях их термогидролиза.

Необходимо также устанавливать и постоянно контролировать состав минеральной состав-

ляющей в остатках термогидролиза осадочных пород и оценивать возможности их использования при производстве дорожно-строительных материалов.

Инновационный потенциал ожидаемых результатов состоит в том, что за счет контролируемого селективного расщепления углерод-углеродных и углерод-гетероатомных кросс-связей в органической массе углеродистых пород в условиях, аналогичных тем, которые имеют место в природных процессах нафтоидогенеза, можно будет получать с высокими выходами смеси алифатических кислородсодержащих соединений и попутно – углеводородные компоненты моторных топлив. Другая часть плана исследований предусматривает переход от лабораторных опытов наземного производства сланцевых углеводородов к полевым испытаниям подземной (непосредственно в слое сланца) термогидролитической их добычи, т. е. к переработке горючих сланцев непосредственно в местах залегания и последующего извлечения термогенетических продуктов на поверхность.

В заключение следует, на наш взгляд, отметить некоторые работы других авторов по исследованию горючих сланцев методами гидротермального воздействия. Количество работ с применением методов гидротермального воздействия (водного пиролиза) на породы с высоким содержанием органического вещества для преобразования керогена в гидротермальную нефть стало заметно возрастать в 2000-е и особенно в 2010-е годы [35–38]. В последнее время появились публикации, в которых затрагиваются вопросы, связанные по существу со значением технологизации ОЗГН, и содержится фактический материал для нее.

Например, одна из таких публикаций [39] содержит данные о влиянии температурного воздействия в интервале 300–480 °С на образцы пород баженовской свиты в закрытых автоклавах в присутствии воды при пластовых значениях давления. Знаменательно, что авторами этой работы отмечен тот факт, что в итоге температурного воздействия при 400 °С генерационный потенциал пород практически полностью реализован (пиролитический пик S₂ снижается на 90–95 %).

В другой публикации [40] сообщается об аналогичных экспериментах на кернах баженовской свиты, но в ином интервале температур (250–400 °С). Было установлено, что синтез масел начинается при 300 °С, хотя существенный выход жидких продуктов начинался при темпе-

ратуре выше 350 °С, при этом фиксировались и процессы вторичного крекинга. По-видимому, авторы считают, что им удалось установить оптимальную температуру конверсии керогена. Существенными фактами, отмеченными в этой работе, следует также признать данные об увеличении пористости и проницаемости породы в процессе гидротермальной обработки.

Исследователи из Китая [41] сообщали об экспериментах по водному пиролизу керогенсодержащих сланцевых пород в широком интервале температур (250, 300, 350, 400, 450, 500 и 550 °С при скорости нагрева 10 °С/ч с выдержкой в пределах ± 1 °С от заданной температуры в течение 24 ч). Для изучения влияния типа керогена на нефтеобразование при высокой температуре исследованные ими породы содержали различные типы керогена (I и II). Оказалось, что при температурах ниже 350 °С составы биомаркеров были схожими с незначительными вариациями для разных типов керогена. Однако при высокой температуре (выше 400 °С) значительно изменялось относительное содержание стеранов C_{27} , C_{28} и C_{29} и проявлялась хорошая корреляция между параметрами зрелости стеранов и термической зрелостью, особенно для керогена I типа.

По данным российских исследователей [42], генерационный потенциал керогена можно выработать до 80 % при гидротермальном воздействии на образцы баженовской свиты в температурном диапазоне 250–350 °С с относительно максимальным выходом жидких продуктов при 300 °С. Отмеченные авторами факты существенного влияния степени катагенетической зрелости органического вещества на скорость генерации синтезированной нефти можно считать вполне ожидаемыми результатами. К неоднозначным или спорным выводам можно отнести их утверждения о том, что “вода не оказывает участия в процессе, но играет важную роль, влияя на изменения в породе и отводя продукты синтезированной нефти. В то же время порода играет роль активатора и катализатора процесса, без нее жидкие продукты не формируются”. Вода в области указанного температурного диапазона скорее всего уже выступает в качестве катализатора из-за достижения заметных концентраций ионов H^+ и OH^- , что позволяет предполагать кислотный и основной катализ, а опыты с модельными органическими соединениями однозначно свидетельствуют об образовании жидких продуктов и в отсутствии неорганических и органо-минеральных составляющих породы.

Материалы недавно проведенной в Сыктывкаре конференции по геохимии нефти, газа, нефтематеринских пород, угля и горючих сланцев содержат сообщения об экспериментах по гидротермальному воздействию на образцы пород, включающих органическое вещество с различной степенью катагенетической преобразованности [43–45]. Для лабораторного моделирования процессов генерации синтетической нефти авторы [43] использовали не только породы с незрелым органическим веществом (стадии катагенеза ПК3–МК1), но и породы, находящиеся по стадии зрелости органического вещества в середине-конце нефтяного окна (МК2–МК4). Оказалось, что в результате “модельного катагенеза” по сути гидротермального воздействия первично происходит генерация высокомолекулярных соединений, а затем они преобразуются в более легкие жидкие и газообразные компоненты, состав которых близок к составу природной нефти. Очевидно, эти результаты не противоречат вышеизложенной совокупности теоретических и экспериментальных доказательств ОЗГН.

Бесспорно, упомянутыми работами не исчерпывается тот фактический материал, который к настоящему времени опубликован в научных изданиях и может быть рассмотрен как имеющий прямое или косвенное отношение к теме технологизации ОЗГН. Приобщение к данной актуальной теме ученых из смежных областей науки может быть очень продуктивным. Желательно при этом избежать терминологических неточностей. К примеру, в некоторых работах процессы водного пиролиза иногда именуются гидропиролизом [44, 45], что противоречит давно устоявшемуся в научной литературе определению процесса гидропиролиза как происходящего в присутствии водорода, а не воды. Согласно традиции основательного подхода к вопросам терминологии, заложенной одной из отечественных научных школ в геологии и геохимии [46], следует, наверное, призвать всех коллег-исследователей придерживаться общепринятых научных определений.

Итак, проанализированы и обобщены результаты работ, которые прямо или косвенно касаются технологизации ОЗГН. Взаимосвязанная совокупность теоретических и экспериментальных доказательств ОЗГН рассмотрена в качестве фундаментальной основы создания и осуществления новой стратегии развития природоподобных технологий наземной термогидролитической переработки нетрадиционного углеводородного сырья (сапропелитовые угли, горючие сланцы и

микроводорослевые биомассы), а также разведки и подземной добычи сланцевых углеводородов как трудноизвлекаемых углеводородных ресурсов. При этом учтены результаты работ отечественных и зарубежных авторов по исследованию горючих сланцев методами гидротермального воздействия.

Исходя из современных политических и экономических реалий в стране и мире, развитие и инновационное применение природоподобных технологий переработки нетрадиционного углеводородного сырья должно, во-первых, быть связано с опорой на современное, преимущественно отечественное оборудование и, во-вторых, сопровождаться услугами наукоемкого характера, обеспечивающими высокую эффективность производственных процессов и минимизирующих экологические риски как при переработке сапропелитов и биомассы микроводорослей, так и при подземной добыче углеводородов из горючих сланцев. Текущие изменения в государственной научно-технической политике, связанные с Указом Президента Российской Федерации № 818 от 2 ноября 2023 года “О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации”, вселяют в нас надежду на возможность получения достаточной ресурсной поддержки на развитие природоподобных технологий термогидролитической переработки нетрадиционного углеводородного сырья.

Нынешние и будущие результаты технологизации ОЗГН направлены на преодоление тех больших вызовов, которые сформулированы в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Это вызовы, связанные с необходимостью эффективного освоения и использования пространства (в том числе путем преодоления диспропорций в социально-экономическом развитии территории страны, перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, к повышению эффективности глубокой переработки углеводородного сырья), с проведением исследований в области понимания процессов, происходящих в природе, с развитием природоподобных технологий, а также с уменьшением возможностей экономического роста России, основанного на экстенсивной эксплуатации традиционных сырьевых ресурсов, на фоне появления дружественных к России стран, также ориентированных на развитие природоподобных технологий переработки собственных нетрадиционных и (или) трудноизвлекаемых углеводородных ресурсов.

При выполнении теоретических, экспериментальных и полевых работ, частично упомянутых в списке литературы, автор пользовался поддержкой и доброжелательным содействием в виде конструктивных обсуждений результатов со стороны д. х. н., профессора Н. В. Бодоева; членов-корреспондентов РАН Г. И. Грицко и В. А. Каширцева; д. х. н., профессора А. К. Головки и д. г.-м. н., профессора С. Л. Шварцева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Рокосов Ю. В. Геохимия процессов образования и гидротермального разложения сапропелитового керогена: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Кемерово, 2004. 334 с.
- 2 Рокосов Ю. В., Горюнова П. В., Рокосова Н. Н., Рокосова В. Ю. Технологизация открытия закономерности гидротермального нафтоидогенеза в интересах развития регионов Российской Федерации за счет глубокой переработки нетрадиционного углеводородного сырья // *Естеств. и техн. науки*. 2019. № 9 (135). С. 158–164.
- 3 Васильев Р. Г. Перспективы развития производства биотоплива в России. Сообщение 1: Биодизель // *Вестн. биотехнологии и физико-хим. биологии им. Ю. А. Овчинникова*. 2007. Т. 3, № 1. С. 47–54.
- 4 Чернова Н. И., Киселева С. В., Коробкова Т. П., Зайцев С. И. Микроводоросли в качестве сырья для получения биотоплива // *Альтернатив. энергетика и экология*. 2008. № 9 (65). С. 68–74.
- 5 Чернова Н. И., Киселева С. В., Попель О. С. Эффективность производства биодизеля из микроводорослей // *Теплоэнергетика*. 2014. № 6. С. 14–21.
- 6 Бодоев Н. В., Рокосов Ю. В., Коптюг В. А. Сапропелитовые угли – альтернативное сырье для получения алифатических карбоновых кислот, кетонов, алканов и олефинов нормального строения // *Создание высокоэффективных процессов переработки и использования твердых горючих ископаемых, получение альтернативных моторных топлив и нефтехимических продуктов из угля: тез. докл. Всесоюз. науч.-практ. конф., Донецк, 22–25 мая 1989 г. Донецк, 1989. С. 92–93.*
- 7 Бодоев Н. В., Рокосов Ю. В., Коптюг В. А. Химизм образования и свойства сапропелитовых углей. III. Получение алифатических карбоновых кислот и кетонов нормального строения // *Изв. Сибирского отделения Акад. наук СССР. Сер. хим. наук*. 1989. № 3. С. 139–145.
- 8 Рокосов Ю. В., Рокосова В. Ю. Наука о сапропелитовых углях для развития инновационных процессов в регионе // *Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 20–23 сент. 2011 г. Кемерово, 2011. С. 394–397.*
- 9 Рокосова В. Ю. Перспективы инновационного применения процессов гидротермального разложения сапропелитов // *Инновационный конвент “Кузбасс: Образование, наука, инновации”, Кемерово, 24–25 нояб. 2011 г. Т. 2. Кемерово, 2011. С. 137–140.*
- 10 Рокосова Н. Н., Рокосова В. Ю., Нефедов А. А., Исмаилов З. Р., Рокосов Ю. В. Жидкие продукты гидротермального разложения горючих сланцев и битуминозных пород Монголии // *Материалы II Междунар. казахстанско-российской конф. по химии и хим. технологии, посвящ. 40-летию КарГУ им. акад. Е. А. Букетова, Караганда, 28 февр. – 2 марта 2012 г. Т. 1. Караганда: Изд-во КарГУ, 2012. С. 431–435.*

- 11 Рокосова В. Ю., Рокосова Н. Н. Углеводороды в продуктах гидропиролиза сапропелитового угля Кушмурунского месторождения Казахстана // Материалы II Междунар. казахстанско-российской конф. по химии и хим. технологии, посвящ. 40-летию КарГУ им. акад. Е. А. Букетова, Караганда, 28 февр. – 2 марта 2012. Т. 1. Караганда: Изд-во КарГУ, 2012. С. 435–438.
- 12 Рокосова Н. Н., Рокосова В. Ю., Рокосов Ю. В. Углеводороды в продуктах водного пиролиза горючих сланцев и битуминозных пород Монголии // Кокс и химия. 2014. № 12. С. 38–41.
- 13 Рокосова В. Ю. Нейтральные гетероатомные компоненты в продуктах окислительно-гидролитической деструкции кушмурунских сапропелитов // V Научные чтения, посвящ. памяти акад. А. Е. Фаворского: тез. докл. Школы-конф. молодых ученых с междунар. участием, Иркутск, 20–24 февр. 2017 г. Иркутск, 2017. С. 125.
- 14 Рокосова В. Ю. Нефтегенерирующие свойства сапропелитов. Исследование углеводородогенерирующих пород методами гидропиролиза, термогидролиза и спектрального анализа. Mauritius, Beau Bassin: LAP Lambert Acad. Publ., 2018. 180 p.
- 15 Рокосов Ю. В., Рокосова Н. Н. Гидротермальное разложение как метод оценки степени катагенетической преобразованности органической массы сапропелитов // Естеств. и техн. науки. 2009. № 1 (39). С. 134–137.
- 16 Рокосова Н. Н., Рокосов Ю. В. Состав и содержание основных продуктов высокотемпературного щелочного гидролиза сапропелитов в связи с катагенетической зрелостью их органической массы // Кокс и химия. 2009. № 6. С. 10–13.
- 17 Рокосов Ю. В., Рокосова Н. Н. Гидротермальное разложение сапропелитов и перспективы создания рабочих станций углехимического и геохимического мониторинга // Естеств. и техн. науки. 2008. № 4 (36). С. 151–155.
- 18 Рокосов Ю. В., Горюнова П. В., Рокосова Н. Н., Рокосова В. Ю. Рабочие станции углехимического, геохимического и экологического мониторинга для управления исследованиями, инновациями и компетенциями в научно-образовательном центре Кузбасса // Углехимия и экология Кузбасса: сб. тез. докл. VIII Междунар. российско-казахстанского симпозиума, Кемерово, 6–10 окт. 2019 г. Кемерово, 2019. С. 50.
- 19 Жарков А. М. Концептуальные модели формирования и методика поисков углеводородов в наиболее значимых “сланцевых” формациях России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2015. Т. 10, № 4. Ст. 10.
- 20 Цветков Л. Д., Киселева Н. Л., Цветков Д. Л. Нефтегазо-материнские сланцевые толщи мира. Ярославль: Аверс Плюс, 2015. 492 с.
- 21 Жарков А. М. Оценка потенциала сланцевых углеводородов России // Минерал. ресурсы России. Экономика и управление. 2011. № 3. С. 16–21.
- 22 Сидорова Л. П., Султанбекова Е. Е., Стригунова Е. Е. Сланцевый газ и сланцевая нефть. Получение и экологический ущерб: учеб. электрон. текст. изд. Екатеринбург, 2016. 173 с. URL: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13530/1/Sidorova_3_SN.pdf (дата обращения: 04.12.2023).
- 23 Конторович А. Э. Стране нужна мощная программа реиндустриализации на новом технологическом уровне // Бурение и нефть. 2017. № 7–8. С. 4–11.
- 24 Рокосов Ю. В., Горюнова П. В., Рокосова Н. Н., Рокосова В. Ю. Исходные данные для разработки технологии переработки сапропелитов с получением жирных кислот // Естеств. и техн. науки. 2018. № 5 (119). С. 294–298.
- 25 Стрижакова Ю. А. Пути переработки горючих сланцев в химические продукты // Химия твердого топлива. 2006. № 2. С. 86–90.
- 26 Стрижакова Ю. А. Горючие сланцы. Генезис, составы, ресурсы. М.: Недра, 2008. 190 с.
- 27 Стрижакова Ю. А., Усова Т. В. Процессы переработки горючих сланцев. История развития. Технологии. М.: Недра, 2008. 119 с.
- 28 Стрижакова Ю. А. Развитие и совершенствование переработки горючих сланцев с получением химических продуктов и компонентов моторных топлив: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2011. 48 с.
- 29 Rokosov Yu. V., Bodoev N. V., Sidel'nikov V. N., Rokosova N. N. Hydrothermal alteration of bazhenite to aliphatic hydrocarbons, carboxylic acids and other oxygen-containing compounds // Fuel. 1996. Vol. 75, No. 2. P. 249–251.
- 30 Конторович А. Э. Феномен баженовской свиты: литология, органическая биохимия, палеогеография, постседиментационная эволюция, потенциал генерации аккумуляции нефти и газа: VIII Всероссийское литолог. совещ., Москва, 27.10.2015 // Первый Геологический интернет-канал. URL: <https://youtu.be/nPoVWKZmeVw> (дата обращения: 04.12.2023).
- 31 Рокосов Ю. В., Рокосова Н. Н., Рокосова В. Ю. Содержание кислых кислородсодержащих соединений в продуктах термогидролитического растворения сапропелитов в связи с литогенетической зрелостью их органической массы // Естеств. и техн. науки. 2015. № 9 (87). С. 65–70.
- 32 Рокосов Ю. В., Рокосова Н. Н., Рокосова В. Ю. Содержание нейтральных кислородсодержащих соединений в продуктах термогидролиза сапропелитов в связи с литогенетической зрелостью их органической массы // Естеств. и техн. науки. 2016. № 7 (97). С. 23–27.
- 33 Рокосов Ю. В., Горюнова П. В., Рокосова Н. Н., Рокосова В. Ю. Методические аспекты мониторинга реакционной способности сапропелитов при термогидролизе: оценка стадии карбонизации органического вещества // Естеств. и техн. науки. 2020. № 9 (147). С. 181–186.
- 34 Рокосов Ю. В., Рокосова Н. Н., Горюнова П. В., Рокосова В. Ю., Романова Т. А. Оценка стадии карбонизации органического вещества сапромикситов Кузбасса // Естеств. и техн. науки. 2022. № 5 (168). С. 280–284.
- 35 Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Шанина С. Н., Макарова Е. С. Генерация углеводородных и гетероатомных соединений высокосернистым горючим сланцем в процессе водного пиролиза // Нефтехимия. 2004. Т. 44, № 6. С. 449–458.
- 36 Pan C., Geng A., Zhong N., Liu J. Kerogen pyrolysis in the presence and absence of water and minerals: steranes and triterpenoids // Fuel. 2010. Vol. 89, No. 2. P. 336–345.
- 37 Rushdi A. I., Simoneit B. R. T. Hydrothermal alteration of sedimentary organic matter in the presence and absence of hydrogen to tar then oil // Fuel. 2011. Vol. 90, No. 5. P. 1703–1716.
- 38 Бычков А. Ю., Калмыков Г. А., Бугаев И. А., Калмыков А. Г., Козлова Е. В. Экспериментальные исследования получения углеводородных флюидов из пород баженовской свиты при гидротермальном воздействии // Вестн. Московского ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 4. С. 34–39.
- 39 Ерофеев А. А., Пачежерцев А. А., Карпов И. А., Морозов Н. В., Калмыков А. Г., Черемисин А. Н., Козлова Е. В., Бычков А. Ю. Оценка потенциала теплового воздействия для стимулирования разработки залежей баженовской свиты по результатам экспериментальных исследований // Вестн. Московского ун-та. Сер. 4. Геология. 2017. № 4. С. 39–47.
- 40 Popov E., Kalmykov A., Cheremisin A., Bychkov A., Bondarenko T., Morozov N., Karpov I. Laboratory investigations of hydrous pyrolysis as ternary enhanced oil recovery

- method for Bazhenov Formation // J. Pet. Sci. Eng. 2017. Vol. 156. P. 852–857.
- 41 Liang M., Wang Z., Zheng J., Li X., Wang X., Gao Z., Luo H., Li Z., Qian Y. Hydrous pyrolysis of different kerogen types of source rock at high temperature-bulk results and biomarkers // J. Pet. Sci. Eng. 2015. Vol. 125. P. 209–217.
- 42 Калмыков А. Г., Бычков А. Ю., Калмыков Г. А., Бугаев И. А., Козлова Е. В. Генерационный потенциал керогена баженовской свиты и возможность его реализации // Георесурсы. 2017. № 5. С. 165–172.
- 43 Калмыков А. Г., Гафурова Д. Р., Стенников А. В., Топчий М. С., Тихонова М. С., Бычков А. Ю., Калмыков Г. А. Гидротермальное воздействие на породы баженовской свиты: лабораторное моделирование преобразования органического вещества // Геохимия нефти и газа, нефтематеринских пород, угля и горючих сланцев: материалы Всероссийской науч. конф., 14–16 окт. 2019 г. Сыктывкар: Геопринт, 2019. С. 42–43.
- 44 Кувинов И. В., Большакова М. А., Макарова Е. Ю., Бычков А. Ю., Козлова Е. В., Пронина Н. В. Результаты гидропиролиза осадочных пород, содержащих органическое вещество различного генезиса // Геохимия нефти и газа, нефтематеринских пород, угля и горючих сланцев: материалы Всероссийской науч. конф., 14–16 окт. 2019 г. Сыктывкар: Геопринт, 2019. С. 62–63.
- 45 Санникова И. А., Большакова М. А., Бычков А. Ю., Стенников А. В., Пронина Н. В. Применение водного пиролиза для моделирования процессов нефтегазогенерации доманиковых отложений Тимано-Печорского бассейна // Геохимия нефти и газа, нефтематеринских пород, угля и горючих сланцев: материалы Всероссийской науч. конф., 14–16 окт. 2019 г. Сыктывкар: Геопринт, 2019. С. 97–98.
- 46 Вассоевич А. Л. Проблемы нефтяной терминологии в исследованиях Н. Б. Вассоевича // Георесурсы. 2022. Т. 24, № 2. С. 12–15.