

## ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 66.01:553.96

### КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАУСТОБИОЛИТОВ УГОЛЬНОГО РЯДА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА НА ОСНОВЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ УГЛЕХИМИИ

А. П. Сорокин<sup>1,2</sup>, И. Ф. Савченко<sup>2</sup>, Л. П. Носкова<sup>2</sup>, В. М. Кузьминых<sup>1</sup>,  
А. А. Коношок<sup>1,2</sup>, В. С. Римкевич<sup>2</sup>, В. В. Крапивенцева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Амурский научный центр ДВО РАН,

E-mail: amurnc@ascnet.ru, пер. Релочный, 1, 675000, г. Благовещенск, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии и природопользования ДВО РАН,

E-mail: igip@ascnet.ru, пер. Релочный, 1, 675000, г. Благовещенск, Россия

<sup>3</sup>Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН,

E-mail: ver.krap@yandex.ru, ул. Ким Ю Чен, 65, 680000, г. Хабаровск, Россия

Проведен анализ состояния мирового рынка технологий химической переработки каустобиолитов угольного ряда. Рассмотрены перспективы развития угольной базы Дальнего Востока, позволившие обозначить основные пути развития технологий в области переработки угля. Показана возможность сосредоточения работ по направлениям углехимии в Амурской области (термическая конверсия углей, получение монтан-воска и окисленных гуматов), в Хабаровском крае (создание базы подземной газификации) и в Приморье (производство моторного и жидкого топлива).

*Каустобиолиты угольного ряда, инновационные технологии, угольные брикеты, горный воск, металлоносность углей, удобрения*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180119

На территории России сосредоточено около 20 % общемировых запасов угля, которые размещены в 22 угольных бассейнах и 143 месторождениях. Более половины всех запасов (52.5 %) представлены бурыми углями, остальные — каменными (44 %) и антрацитами (3.5 %). Запасы угля в Европейской и Уральской частях России составляют 10 % от разведанных, в Сибири — около 80 %, на Дальнем Востоке — 10 % [1 – 6]. В настоящее время уголь в основном сжигается на тепловых электростанциях. На его основе вырабатывается свыше 20 % электрической энергии, производится 100 % металлургического кокса и удовлетворяется 50 % спроса коммунально-бытового хозяйства и населения. Сдерживает развитие отрасли техникой и технологиче-

Исследования выполнены при поддержке Программы “Дальний Восток” (проект № 18-02-019 “Геолого-технологическая оценка ресурсного потенциала каустобиолитов угольного ряда Дальнего Востока, разработка научных основ комплексного их использования с получением конкурентоспособной продукции многоцелевого назначения”).

ский уровень угольного производства, который значительно уступает мировому за счет высокой энергоемкости и морально устаревших технологий. До 75% инвестиций в отрасли расходуется на совершенствование технологий добычи углей.

В январе 2012 г. распоряжением Правительства РФ утверждена “Долгосрочная программа развития угольной промышленной России на период до 2030 г.” Ее реализация позволит нарастить добычу угля в стране в 1.4 раза — до 430 млн т. Ряд объективных факторов: нестабильность цен на уголь на мировых рынках, насыщенность внутреннего рынка, высокие транспортные издержки производителей угля, инфраструктурные ограничения, актуальность экологических вопросов в местах добычи угля и др. усложняют выполнение данной программы. Требуется внедрение технологий глубокой переработки и комплексного использования углей с получением конкурентоспособной продукции многоцелевого назначения, способствующей устойчивому развитию экономики и общества в России.

### ХАРАКТЕРИСТИКА УГОЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

На территории Дальнего Востока расположено 17 угольных бассейнов (рис. 1), в которых сосредоточено 120 месторождений [1–6]. В Приморье выделено 5 угленосных бассейнов (Партизанский, Раздольненский, Угловский, Бикино-Уссурийский, Ханкайский) и ряд месторождений каменных и бурых углей широкого возрастного диапазона (триас–неоген) и разнообразных технологических групп. В настоящее время в регионе эксплуатируются девять месторождений — шесть буроугольных (Бикинское, Зеркальное, Нежинское, Осиповское, Павловское и Раковское) и три каменноугольных (Алексее-Никольское, Константиновское, Липовецкое).

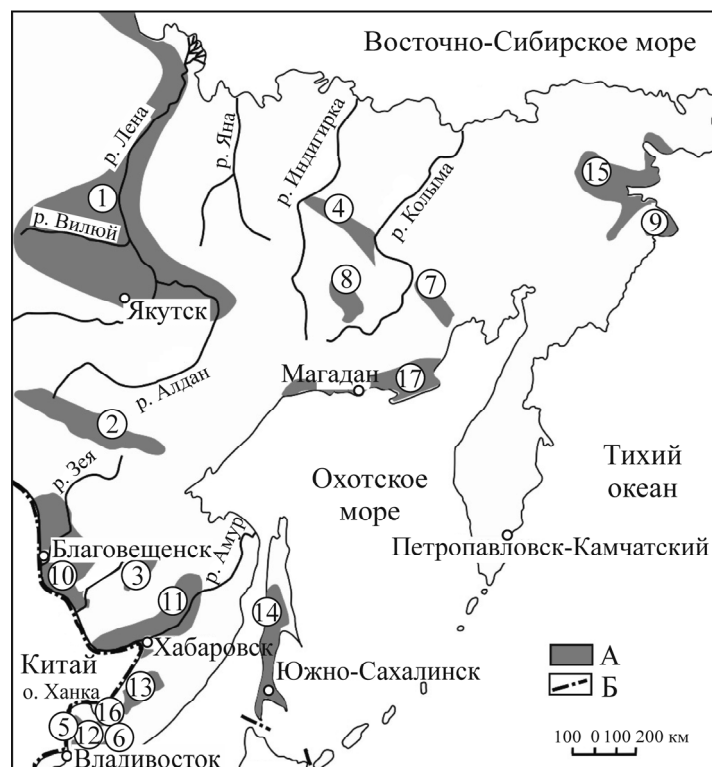


Рис. 1. Схема основных угольных бассейнов Востока России: А — основные угольные бассейны (1 — Ленский; 2 — Южно-Якутский; 3 — Буреинский; 4 — Зырянский; 5 — Раздольненский; 6 — Партизанский; 7 — Омсукчанский; 8 — Аркагалинский; 9 — Беринговский; 10 — Амуро-Зейский; 11 — Средне-Амурский; 12 — Угловский; 13 — Бикино-Уссурийский; 14 — Сахалинский; 15 — Анадырский; 16 — Ханкайский; 17 — Охотский); Б — государственная граница Российской Федерации проходит по р. Амур [3]

В Хабаровском крае известны два угольных бассейна: Буреинский и Средне-Амурский. В них открыты более 18 месторождений угля, из которых семь относятся к каменным и свыше одиннадцати к бурым. Первые из них связаны с породами позднеюрского и раннемелового возраста, вторые — с отложениями палеогена и неогена [2, 4]. В настоящее время эксплуатируется только Ургальское месторождение каменного угля. В Среднеамурском бассейне выявлены и прогнозируются ресурсы бурых углей свыше 14 млрд т, из которых 1.4 млрд т — для открытой добычи с углями технологической группы 2Б, среднезольными, малосернистыми, повышенной влажности [4].

Ресурсный потенциал Амурской области значительно превышает таковой Хабаровского края, Забайкальского края, Сахалина и Приморья. Общие прогнозные ресурсы бурых и каменных углей достигают 70 млрд т, из которых 43 млрд т сосредоточены в Зейско-Буреинском бассейне [3]. Балансовые запасы в бассейне в количестве 3.8 млрд т разведаны в семи месторождениях (Свободненское, Сергеевское, Тыгдинское, Ерковецкое, Райчихинское, Архаро-Богучанское, Огоджинское). Они представлены преимущественно бурыми углями — 99.1 %, остальные — приходятся на долю каменных углей. Все месторождения пригодны для открытой добычи. Отрабатываются Райчихинское и Ерковецкое месторождения бурых углей технологической группы 2Б, которые обладают запасами 1.3 млрд т. Преобладают угли группы 1Б (2.3 млрд т) — низкокачественное сырье, непригодное без обогащения как энергетическое топливо.

Бурые угли Дальнего Востока имеют общие характеристики в рамках одного месторождения, но существенно различаются в пределах бассейна даже в одновозрастных структурах в зависимости от геодинамического, геохимического и других условий, существовавших во время их формирования. Эти особенности лежат в основе различий их технологических свойств, которые определяются индивидуальными значениями параметров качества в промышленных классификациях, таких как влажность, выход летучих и количество золы (рис. 2). Дополнительно к характеристикам качества углей Востока России можно добавить следующие границы параметров: влажность 15–70 %, содержание минеральных примесей не более 2 %, зольность 2–30 %, теплота сгорания влажного топлива 4–18 Мдж/кг. В целом, угли Дальнего Востока обладают повышенной зольностью по сравнению с твердыми топливами большинства месторождений мира. Это накладывает определенные ограничения на химическую переработку: возможность использования углей для послойного сжигания и их непригодность для процессов коксования.

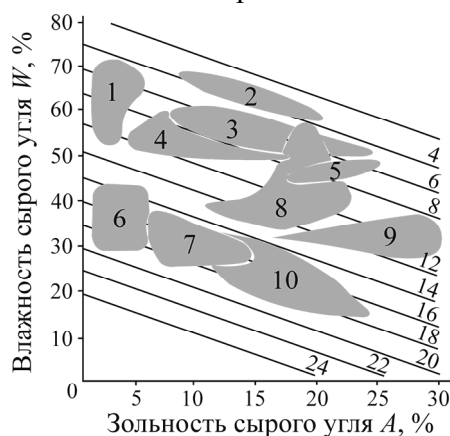


Рис. 2. Качественные характеристики свойств бурых углей в зависимости от места формирования угольного бассейна. Данные о теплотворной способности отражены косыми линиями. Цифрами обозначены свойства углей в регионах: 1 — Австралия, долина Латроб; 2 — Греция, Мегалополис; 3 — Греция, Птолемей; 4 — Германия, Нейрат; 5 — Испания, Пуэнтас; 6 — Индонезия; 7 — США, Дакота; 8 — Россия, Амурская область и Хабаровский край (Амуру-Зейский и Среднеамурский бассейны); 9 — Россия, Приморье (Бикино-Уссурийский бассейн); 10 — Россия, Чукотка (Анадырский бассейн)

На юге Дальнего Востока в составе буро- и каменноугольных бассейнов широко распространены битуминозные угли. На территории Хабаровского края и Амурской области они встречаются в основном в месторождениях олигоценового и миоценового возраста и относятся к группе гумолитов и сапрогумолитов, что соответствует классам липоидолитов и сапрогелитолитов [7].

Липоидолиты и сапрогелитолиты Свободного месторождения (Амурская область) характеризуются высокой калорийностью и битуминозностью, большим выходом смол и воска. Значительное их распространение по площади месторождения и химический потенциал свидетельствуют о перспективах использования данных углей в качестве сырья для химической промышленности.

### **СТРУКТУРА И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАУСТОБИОЛИТОВ УГОЛЬНОГО РЯДА И ПРОДУКТОВ СЖИГАНИЯ УГЛЯ**

Современные технологии позволяют производить из угля более 130 видов химических продуктов и полуфабрикатов, которые в дальнейшем используются для производства свыше 5 тыс. видов продукции [8, 9]. В хозяйственном комплексе России и ряда других стран каменные и бурые угли остаются основным источником тепловой и электрической энергии на ТЭЦ и ТЭС [10]. Одновременно с развитием технологий, повышающих качество бурого угля в виде топлива, в России и других странах мира ведутся исследования, внедряются технологии физической и химической переработки угля и его продуктов сжигания (ПСУ).

**Производство брикетов и гранулированного топлива.** Для получения высокоэффективного топлива и полуфабрикатов для дальнейшей химической переработки бурые угли подвергают высушиванию и брикетированию или гранулированию. Для удаления воды используют нагревание угля или высушивание на открытом воздухе. В процессе испарительной сушки она удаляется из угля в виде водяного пара, с которым уносятся также некоторые металлы и элементы [9, 11]. Одним из недостатков высушивания угля выпариванием при нагревании является высокое потребление электроэнергии. На это уходит до 25 % от общего объема энергии, которую необходимо затратить, чтобы получить из угля полезные компоненты, что является основным препятствием вовлечения низкокачественных бурых углей в хозяйственный оборот.

**Химическая переработка каустобиолитов угольного ряда.** Газификация является процессом конверсии твердого топлива в горючие газы. Современный интерес к газификации связан с переоборудованием угольных электростанций и развитием новых технологий. За последние годы в Китае построено более 20 заводов [12], превращающих уголь в газ, который используется для производства пластмассы, фармацевтических препаратов и других материалов. Извлечение попутных компонентов в значительной мере увеличивает экономическую ценность углей, но требует инновационных решений — разработки методов определения содержания полезных компонентов в углях и технологии их извлечения.

Высокая влажность бурых углей и вероятность спонтанного возгорания ограничивают возможности их транспортировки на большие расстояния. Прямое ожижение угля осуществляют методом гидрогенизации под давлением водорода, превращая высокомолекулярные вещества органической массы в жидкие и газообразные продукты при температуре 673–773 К в присутствии катализаторов и органических растворителей — пастообразователей. Максимальной каталитической активностью обладают соединения молибдена, вольфрама, олова, при использовании которых гидрогенизацию угля можно проводить при относительно низком давлении от 10 до 14 МПа.

Непрямое ожигание угля основано на методе Фишера–Тропша, который состоит из двух главных стадий: газификации угля с целью получения газообразных продуктов (смеси монооксида углерода и водорода) и их дальнейшей каталитической переработки в жидкие углеводороды.

Начало развитию технологии конверсии угля в жидкие виды топлива положено в начале XX в. с созданием метода прямого сжижения (метод Бергиуса) и непрямого сжижения (метод Фишера–Тропша). Основные варианты решения: конверсия угля в жидкие углеводороды (CTL), конверсия газа в жидкие углеводороды (GTL) [12, 13]. Современные технологии CTL дают сравнительно неплохой выход дизельного топлива. Соответственно виды жидкого топлива на основе угля могут быть конкурентными по отношению к видам, полученным из сырой нефти.

Производство химических продуктов из бурого угля на основе каталитического синтеза осуществляется с помощью пиролиза углеводородов. Этот процесс характеризуется сравнительно низкой энергоемкостью процесса; применением дешевого и доступного углеродсодержащего сырья; “мягкими” технологическими параметрами синтеза; простотой конструкций и технологичностью изготовления используемой аппаратуры; отсутствием необходимости дорогой очистки от примесей [13].

Одним из наиболее востребованных химических продуктов является монтан-воск, который извлекают из битуминозного лигнита. Это один из самых прочных естественных восков, который находит применение во многих отраслях промышленности, особенно в соединениях на основе инженерных пластмасс, таких как поливинилхлорид, полиамид, поликарбонат, термопластичный полиуретан и стирол-малеиновый ангидрид. Немецкие компании (Clariant GmbH, Völpker Spezialprodukte GmbH, BASF, Romonta) на основе монтан-воска, получаемого из бурого угля, производят более 60 продуктов. Экстракционная переработка месторождений бурого угля в Приамурье позволяет получать из них не менее 12 % сырого воска в пересчете на сухой уголь [14].

Самые простые углеродсодержащие материалы, получаемые химическими методами, — полукокс и активированный уголь. Активированный уголь используется для очистки горячих газов, которые образуются в процессе газификации угля. Он является необходимым материалом в процессах, где требуются большие количества катализатора или где процессы восстановления катализатора затруднительны. Кусковой уголь, чистый от золы (не более 3 %), с высокой реакционной способностью и хорошими адсорбционными характеристиками идет на производство ферросплавов и безуглеродистой стали. Проводятся исследования обогащенных углеродсодержащих материалов из бурого угля для хранения метана и производства анодов в литий-ионных батарейках.

Высокопористые характеристики бурого угля делают его пригодным также для производства недорогих адсорбентов для очистки питьевой воды от растворимых летучих и органических соединений.

Недавно появилось еще одно направление использования чистых продуктов из бурого угля в нанотехнологиях. Одной из наиболее перспективных областей нанотехнологий является синтез углеродных наноматериалов (мелкодисперсной сажи) — фуллереноподобных структур, представляющих собой новую аллотропную форму углерода [15, 16]. Среди этих материалов особое место занимают углеродные нанотрубки, которые обладают рядом уникальных свойств: хорошей электропроводностью и адсорбционными свойствами, способностью к холодной эмиссии электронов и аккумулярованию газов, диамагнитными характеристиками, химической и термической стабильностью, большой прочностью в сочетании с высокими значениями упругой деформации.

**Производство удобрений и стимуляторов роста растений.** Бурые угли нашли широкое применение для сельскохозяйственных и садоводческих целей. Гуминовые кислоты, полученные из углей, используются как почвенный кондиционер или удобрение. Бурый уголь хорошо сорбирует на своей поверхности аммоний, что превращает его в азотное удобрение. Добавление бурых углей в почву влияет на ее состав и рост корнеплодов в изначально кислотных почвах. Самодифицированные гуматы и фульваты из углей снижают кислотность почв. Из углей также получают нитрогуминовые кислоты и их аммониевые соли [17]. Обзор опубликованных материалов по исследованию и применению методов углехимии показывает, что бурый уголь эффективен в различных сферах экономической деятельности. Наибольшим потенциалом для химической переработки обладают бурые угли технологической группы 1Б и торф.

### **БУРЫЙ УГОЛЬ КАК КОМПЛЕКСНОЕ МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ**

Металлоносность углей известна уже более ста лет. Благороднометалльная (БМ) минерализация установлена в ряде угленосных бассейнов Сибири, Забайкалья, Дальнего Востока, Великобритании, США, Узбекистана, Китая и других стран [3, 18–21, 23]. Кроме БМ, угли концентрируют редкие металлы (РМ) и редкоземельные элементы (РЗЭ), которые, как правило ассоциируют с Au и Pt в месторождениях угля Сибири (Назаровское, Бородинское), Приамурья (Райчихинское, Ерковецкое, Дармаканское и др.), Приморья (Павловское, Бикинское, Хасанское, Шкотовское) [18, 19, 21, 24–28]. В последние годы проводятся системные работы с целью экономической оценки редкометалльного оруденения и платиноидов угленосных месторождений. Установлено, что основные месторождения угля Дальнего Востока содержат значительные ресурсы Sc, Ga, Ge, Rb, Sr, Cs, ZrO<sub>2</sub>, TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и платиноидов (по категории P2 и P3). Попытка определить рентабельность подобных месторождений, содержащих Au и Ga, предприняты в Китае. Ориентировочно эти концентрации установлены на уровне 0.2 г/т для Au и 60 г/т для Ga [29]. В то же время для большинства рассматриваемых металлоносных угольных месторождений отсутствует надежная база оценки содержаний ценных элементов-примесей, не изучены условия и механизмы их концентрирования, формы нахождения, не разработана технология извлечения. Совершенствование технологий извлечения РМ и РЗЭ из углей позволяет значительно повысить рентабельность угледобывающих предприятий, разрабатывающих подобные месторождения.

Наличие в углях благородных, редких металлов, серы и других минеральных веществ определяет направление исследований, связанных с разработкой технологий улавливания этих компонентов и извлечения их из шлаков и золы во время или после сжигания угля в котлах. Учитывая прогнозы, только в США производство золошлаковых отходов вырастет с 104.1 млн т в 2013 г. до 109.4 млн т в 2033 г. [30]. В настоящее время технологические решения, существующие в мире по извлечению металлов из золы и попутных дымовых газов, находятся в стадии разработки. Китайская компания China Senhua Group построила пилотный завод, производящий 10 000 т алюминия и концентраты, содержащие Ga и Si, из угольной золы уноса. Британская компания RockTrop отрабатывает процессы извлечения РЗЭ из обогащенных фракций угольной золы. Компания Latrobe Magnesium строит в Австралии завод по извлечению Mg из угольной золы. Израильская компания создала установку на основе использования мокрого скруббера Вентури для очистки угольных дымовых газов от ртути и ее соединений [31]. При этом следует учитывать, что существуют прогнозы сохранения объемов производства отходов (шлака и золы) на текущем уровне, а использование золы уноса в течение следующих 20 лет увеличится на 53 % до 32.4 млн т [30].

## ИННОВАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ УГЛЕХИМИИ КАУСТОБИОЛИТОВ УГОЛЬНОГО РЯДА НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ

Наиболее эффективным путем вовлечения дальневосточных углей в хозяйственный оборот является комплексное использование их на основе разработки инновационных технологий с целью получения из бурых углей энергетических брикетов, горного воска, гранулированного твердого топлива и других экономически полезных продуктов. В течение последних 20 лет выполнен ряд фундаментальных исследований, направленных на выявление геологических особенностей формирования, минерального и химического состава углей и продуктов их сжигания с целью получения продуктов многоцелевого назначения. Многие результаты экспериментальных и технологических исследований защищены патентами, технологические решения опубликованы в ведущих журналах России и за рубежом [3, 15, 17, 32–38]. Основная цель инновационных исследований — получение и изучение продуктов топливного и нетопливного назначения.

**Продукты топливного назначения.** Авторами подготовлен проект освоения миоценовых углей Сергеевского месторождения (Амурская область), который предусматривает строительство углехимического комбината по добыче и термохимической переработке 1 млн т угля в год с получением угольных брикетов, синтетической нефти, газа, бензина и полукокса. Разработаны технико-экономическое обоснование и инновационная программа по глубокой переработке высоковлажных бурых углей технологической группы 1Б [17]. В Приморье термическая переработка углей уже проводилась в пилотных и опытно-промышленных установках на Липовецком месторождении при низкотемпературном режиме 820–920 К. Установлено, что выход смолы составил 8.8 % на сухое топливо. При полукоксовании угли дают от 17 до 30 % смолы в расчете на горючую массу. Брикетированием при термической обработке этих углей получены механически стойкие и влагостойкие брикеты, а на Артемовском месторождении с помощью термического разложения — полукокк (56.2 %), смолы (4.83 %), сухой газ (7 %), газовый бензин (0.17 %) и органические вещества (0.3 %) [4].

Метод глубокой переработки угля в моторное и жидкое топливо имеет благоприятные условия для внедрения в Дальневосточном регионе, обладающем крупными ресурсами угля и накопленным опытом в стране и за рубежом. По оценкам [13], эта задача может быть решена за счет использования бурых углей Павловского и Бикинского месторождений Приморского края и Сахалинской области. Угли первого из них имеют относительно низкую теплоту сгорания — 11 и 10.8 МДж/кг, второго — характеризуются более высокой теплотворной способностью — 18.2 МДж/кг и по существу являются переходными от бурых углей к каменным, поэтому в них выше содержание углерода по сравнению с бурыми углями Приморского края.

Исследованиями, проведенными в ИГиГ ДВО РАН [7], ряд угольных месторождений Хабаровского края признаны пригодными для подземной газификации угля (ПГУ). В качестве первоочередного объекта для ПГУ выбрано Хабаровское месторождение, которое имеет выгодное расположение и рентабельные показатели экономической эффективности. Потенциальные ресурсы газа этого месторождения оцениваются в 600–850 млрд м<sup>3</sup>. Газ ПГУ характеризуется теплотворной способностью 3.77 МДж/м<sup>3</sup>, которая может быть увеличена по меньшей мере в 2 раза. Кроме Хабаровского, пригодными для ПГУ считаются Ушумунское, Литовское и другие месторождения края, располагающиеся не более чем в 30 км от потребителя [7].

**Продукты нетопливного назначения.** Одним из дефицитных и наиболее востребованных продуктов переработки бурых углей является монтан-воск, имеющий разнообразные сферы использования. Для получения модифицированного буроугольного воска из низкокалорийных топлив Амурской области в ИГиП ДВО РАН осуществляется разработка технологии жидкофазно-

го каталитического алкилирования угля алифатическими спиртами. Применение данного метода способствует не только значительному углублению процесса экстракции и росту извлечения битумов и восков (рис. 3), но и получению модифицированного сырого воска, обогащенного высокомолекулярными сложноэфирными фракциями [39, 40]. При этом удается исключить из производственного процесса трудоемкую, но недостаточно эффективную стадию обессмоливания воска. Основные физико-химические характеристики модифицированного воска сопоставимы с аналогичными показателями этерифицированных восков, для получения которых применяют многостадийные технологии, значительно повышающие себестоимость конечного продукта. В результате модифицированный уголь обогащается высокомолекулярными компонентами, а извлекаемый из него воск с содержанием смолы не более 2.5% не требует многостадийной технологии переработки.

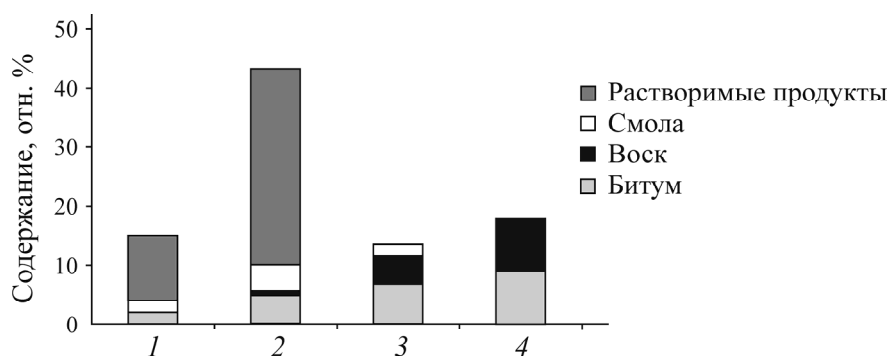


Рис. 3. Содержание продуктов: в исходном (1) и в модифицированном экстракте (2); в исходном (3) и в модифицированном (4) угле

Кроме воска, экономическую ценность имеют другие продукты, извлекаемые из бурого угля в процессе его обработки: смолы, гуматы, карбоновые кислоты, эфиры и твердый остаток в качестве сырья для процессов сжигания, получения недорогих адсорбентов, ионообменных материалов и др. Изобретение защищено патентом. Проект входит в реестр инновационного Фонда “Сколково”.

В бурых углях ряда месторождений Сибири (Канско-Ачинского бассейна), Приморья (Павловского), Еврейской автономной области (Ушумунского) и Амурской области установлены повышенные концентрации Au в пределах 0.5–5.0 г/т (среднее 1.3), Ag, Pt и других металлов. Доказано, что при сжигании Au уносится с дымовыми газами и золой в виде летучих соединений [41]. Учитывая особенности форм нахождения Au в дымовых газах и условия формирования его наночастиц из водного раствора, в АмурНЦ ДВО РАН разработана и испытана опытно-лабораторная установка для его извлечения из дыма (рис. 4). За основу взят способ, изложенный в [33]. Сущность технологического процесса заключается в смешивании дымовых газов от сжигания угля с распыленной форсунками водой в присутствии катализатора в виде трех слоев медной сетки [42]. В результате продуктом данного процесса является насыщенный водный концентрат, собирающий в себя из дыма частицы тяжелых, цветных и благородных металлов. В конденсате преобладают Cu, Mn, Pb, Zn, что свидетельствует также об экологической направленности данной технологии.

Установка служит дополнительным устройством к промышленному отопительному котлу. Дым из котла попадает в зону завихрения в мокром скруббере Вентури со встроенными сетками из латуни и меди 4 и подвергается орошению водой с помощью специальных форсунок 5. Из скруббера вода, насыщенная компонентами дыма, попадает в фильтровальный блок с системой фильтров, наполненных различными по составу адсорбентами 6. На первом фильтре от



раствора отделяется сажа и угольная зола. В фильтровальном блоке вода очищается полностью от компонентов дыма и насосом 8 подается опять на орошение угольного дыма в скруббере. Необходимо отметить, что в данной технологической схеме используется один и тот же объем воды. С помощью специальной насадки на выходную трубу собирается остаточная влага, которая также содержит незначительные количества металлов, находящихся в углях. Влагоунос составляет не более 5 %.

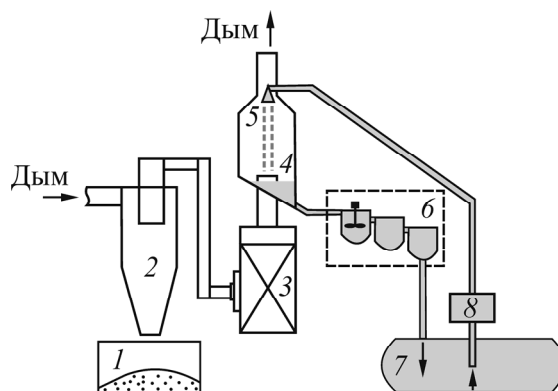


Рис. 4. Схема технологической установки для извлечения летучих компонентов и металлов из угольных дымов методом увлажнения: 1 — бункер с золой; 2 — циклон; 3 — дымосос; 4 — пустотелый скруббер с тарелками; 5 — форсунки; 6 — фильтры с адсорбентами; 7 — вода; 8 — насос-станция

Указанная технология дает возможность аккумулировать Au и другие элементы, содержащиеся в углях, в процессе орошения дымовых газов в специально сконструированной установке непрерывного действия. Количество металлов, осажденных на сорбенте в фильтрах, напрямую зависит от исходной концентрации металлов в сжигаемых углях и времени пропускания конденсированного водного раствора дыма через фильтры. С помощью установки аналогичной конструкции в Израиле удалось извлечь до 90 % ртути, находящейся в угольном дыме [31].

Одновременно решается и экологическая проблема — очистка дыма от выброса вредных и токсичных веществ в атмосферу. Проект защищен патентами и включен в реестр инновационного Фонда “Сколково”.

Технология получения окисленных гуматов разработана на углях месторождений “Свободное”, “Сергеевское”, “Сианчик”, “Ерковецкое”. Установлено, что гуматы эффективнее всего экстрагируются 0.5–1.0 % раствором NaOH; 55–65 % выхода гуматов на органическую массу получено из угля 1Б и 35 % и более — из низинного торфа высокой степени разложения. Лучшие показатели выхода дают малозольные угли и торф. Полученный продукт испытан в 2006–2007 гг. на посевах сои, пшеницы, ячменя на опытных полях. Доза 1 кг сухих гуматов на гектар дает статистически достоверную прибавку урожая соответственно 120, 200 и 380 кг/га. Гуматы являются питательной средой для синтеза кормовых дрожжей, для получения которых используют также верховой торф бескислотного и слабокислотного гидролиза (осахаренный торф) [17].

Технология получения товарных продуктов из золоугольного шлака на основе метода фторидного обогащения силикатов и алюмосиликатов, содержащихся в техногенных золошлаковых отвалах, разработана в ИГиП и АмурНЦ ДВО РАН. Основными коммерческими продуктами, получаемыми из шлаков, являются аморфный кремнезем, глинозем, гексафторосиликат аммония, обладающий сильными огнестойкими и биоцидными свойствами, и красный железнооксидный пигмент, необходимый для получения высококачественных красок, бумаги, резины, пластмасс и других продуктов [37].

## ВЫВОДЫ

В Дальневосточном регионе остро стоят вопросы, связанные с реструктуризацией и диверсификацией угледобывающих предприятий, решением социально-экономических задач в отдельных его районах, созданием новых высокоэффективных и рентабельных промышленных предприятий на основе применения наукоемких технологий по добыче и комплексной переработке угольного минерального сырья. Разведанные запасы бурых и каменных углей позволяют обеспечить устойчивое функционирование предприятий ТЭК и вновь создаваемых предприятий по комплексной химической переработке угля на многие десятилетия.

Эффективный путь комплексного использования углей Дальнего Востока должен основываться на качестве, изученности технологических свойств сырья. Учитывая подготовленный проект освоения Сергеевского буроугольного месторождения (Амурская область), он может стать типовым объектом углехимического комбината с получением угольных брикетов, синтетической нефти, газа, бензина и полукокса. На базе его и Свободного месторождения могут быть продолжены технологические исследования по совершенствованию получения модифицированного горного воска (монтан-воска) и окисленных гуматов, а также по разработке методов, обеспечивающих максимальный перевод продуктов сжигания (шлаков, золы, шламов, конденсатов) в состояние высокой обогатимости для последующего высокоэффективного извлечения из них благородных и других ценных металлов, силикатов и алюмосиликатов.

В Хабаровском крае представляется перспективным вовлечение месторождений угля, погребенных под верхнемиоцен-четвертичным чехлом осадков, в освоение методом подземной газификации. Они обладают крупными ресурсами и расположены вблизи основных потребителей. В Приморском крае имеются благоприятные условия для внедрения методов глубокой переработки угля в моторное и жидко топливо. Главным положительным фактором для края является наличие значительных запасов угля, что позволяет уверенно рассчитывать на длительную перспективу обеспеченности сырьем горно-химических производств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варнавский В. Г., Малышев Ю. Ф. Восточно-Азиатский грабенный пояс // Тихоокеан. геология. — 1986. — № 3. — С. 3–13.
2. Среднеамурский осадочный бассейн: геологическое строение, геодинамика, топливо, топливно-энергетические ресурсы / отв. ред. Г. Л. Кириллова. Сер. “Осадочные бассейны Востока России”. Т. 3. — Владивосток: ДВО РАН, 2009. — 429 с.
3. Молодые платформы восточной окраины Евразии (глубинное строение, условия формирования и металлогения) / науч. ред. А. П. Сорокин. — Владивосток: Дальнаука, 2013. — 366 с.
4. Угольная база России. Т. 5. Кн. 1. Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока (Хабаровский край, Амурская область, Приморский край, Еврейская АО). — М.: Геоинформмарк, 1997. — Т. 5. — Кн. 1. — 371 с.
5. Фандюшкин Г. А., Пензин Ю. П. Беринговский угольный бассейн. Т. 5. Кн. 2. Угольная база России. — М.: Геоинформмарк, 1999. — С. 333–354.
6. Фандюшкин Г. А. Уголь Северо-Востока России // Горн. журн. — 2005. — № 3. — С. 7–11.
7. Крапивенцева В. В., Варнавский В. Г., Кузнецов В. Е. Битуминозные угли и сланцы юга Дальнего Востока // Тихоокеан. геология. — 1999. — Т. 18. — № 6. — С. 104–113.
8. Speight J. G. The chemistry and technology of coal, Boca Raton, CRC Press, 2013, XXVI. — P. 809–819.
9. Zhu Li. Advances in the science of victorian brown coal Chun, Technology & Engineering, 2004. — 484 p.

10. **Lucinda Tolhurst.** Commercial recovery of metals from coal Ash., Global Review, Lucid Insight Ltd, 2015. — <http://cornerstonemag.net/commercial-recovery-of-metals-from-coal-fly-ash/>.
11. **Кузьминых В. М., Сорокин А. П.** Миграция и накопление золота при гипергенных процессах // Вестн. ДВО РАН. — 2004. — № 2. — С. 113–119.
12. **Qiwen Sun.** Indirect coal liquefaction, Beijing, Chemical Industry Press, 2012. — 486 p.
13. **Обоснование перспектив** применения инновационных технологий комплексной переработки углей в Приморском крае. АНО “Центр стратегических исследований топливно-энергетического комплекса Дальнего Востока”, 2013. — 81 с.
14. **Noskova L. P., Sorokin A. P., Rokhin A. V.** Preparation of waxes and humic acids from brown coal from the Sergeevskoe deposit, Solid Fuel Chemistry, 2007, Vol. 41, Issue 3. — P. 134–139.
15. **Марченко Л. Г.** Микро-наноминералогия золота и платиноидов в черных сланцах. — Алматы: Интерпресс-Казахстан, 2010. — 146 с.
16. **Мищенко С. В., Ткачев А. Г.** Углеродные наноматериалы. производство, свойства, применение. — М.: Машиностроение, 2008. — 172 с.
17. **Инновационные и инвестиционные аспекты** технологий комплексного использования минерально-сырьевых ресурсов Амурской области / науч. ред. А. П. Сорокин. — Благовещенск, 2012. — 112 с.
18. **Вялов В. И., Ларичев А. И., Кузеванова Е. В. и др.** Редкие металлы в бурогольных месторождениях Приморья и их ресурсный потенциал // Региональная геология и металлогения. — 2012. — № 51. — С. 96–105.
19. **Голицын М. В., Вялов В. И., Богомолов А. Х., Пронина Н. В., Макарова Е. Ю., Митронов Д. В., Кузеванова Е. В., Макаров Д. В.** Перспективы развития технологического использования углей в России // Георесурсы. — 2015. — Т. 61. — № 2. — С. 41–53.
20. **Лаврик Н. А.** благородные металлы в бурых углях Сутарского проявления // ГИАБ. — 2009. — Т. 5. — № 12. — С. 70–78.
21. **Середин В. В.** Распределение и условия формирования благороднометалльного оруденения в угленосных впадинах // Геология рудных месторождений. — 2007. — Т. 49. — № 1. — С. 3–36.
22. **Рождествина В. И., Сорокин А. П.** Первые находки самородных палладия, платины, золота и серебра в бурых углях Ерковецкого месторождения (Верхнее Приамурье) // Тихоокеан. геология. — 2010. — Т. 29. — № 6. — С. 26–38.
23. **Кузьминых В. М., Сорокин А. П.** Миграция и накопление золота при гипергенных процессах // Вестн. ДВО РАН. — 2004. — № 2. — С. 113–119.
24. **Неженский И. А., Вялов В. И., Мирхалевская Н. В. и др.** Геолого-экономическая оценка редкометалльной составляющей бурогольных месторождений Приморского края // Региональная геология и металлогения. — 2013. — № 54. — С. 99–108.
25. **Lakatos J., Brown S. D., Snape C. E.** Unexpectedly high uptake of palladium by bituminous coals, Proceed, ICCS'97, Essen, DGMK, 1997, Vol. 1. — P. 1051–1066.
26. **Сорокин А. П., Чантурия В. А., Рождествина В. И., Кузьминых В. М., Жмодик С. М.** Нетрадиционные типы благороднометалльного, редкометалльного и редкоземельного оруденения в угленосных бассейнах Дальнего Востока // ДАН. — 2012. — Т. 446. — № 6. — С. 672–676.
27. **Сорокин А. П., Рождествина В. И., Кузьминых В. М., Жмодик С. М., Анохин Г. Н., Митькин В. Н.** Закономерности формирования благородно- и редкометалльного оруденения в кайнозойских угленосных отложениях Дальнего Востока // Геология и геофизика. — 2013. — Т. 54. — № 7. — С. 876–893.
28. **Сорокин А. П., Рождествина В. И., Кузьминых В. М.** Благородно- и редкометалльное оруденение в кайнозойских угленосных отложениях юга Дальнего Востока // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2014. — № 3с. — Ч. 2. — С. 58–61.

29. **Wengfeng W., Shuxun S., Weiduo H., Ran W., Jiefang Z., Piaopiao D., Yong Q., Shaochun X.** A cut-off grade for gold and gallium in coal, *Fuel*, 2015, Vol. 147. — P. 62–66.
30. **Production** and use of coal combustion products in the U. S. Market forecast through, 2033, ARTBA, 2015. — 48 p.
31. **MercuRemoval's** Technology demonstrates unparalleled success in mercury removal from flue gas emissions, *Free Pollution Online Newsletter*, 2017, Feb. 6. [www.pollutiononline.com](http://www.pollutiononline.com).
32. **Пат. 2245931 РФ.** Способ определения содержания золота в золотосодержащем сырье / В. М. Кузьминых, Л. А. Чурсина // *Опубл. в БИ.* — 2005. — № 4.
33. **Пат. 155764 РФ.** Устройство для извлечения золота из дымовых газов при сгорании природных углей / В. М. Кузьминых, А. П. Сорокин, В. Н. Борисов, Л. А. Чурсина // *Опубл. в БИ.* — 2015. — № 29.
34. **Сорокин А. П., Рождествина В. И., Савченко И. Ф.** Инновационно-технологический подход к эффективному использованию низкокалорийных углей Приамурья // *Энергетика России в XXI в. Инновационное развитие и управление: сб. всерос. конф., 1–3 сентября 2015 г., Иркутск.* — С. 539–546.
35. **Сорокин А. П., Кузьминых В. М., Рождествина В. И.** Золото в бурых углях: условия локализации, формы нахождения, методы извлечения // *ДАН.* — 2009. — Т. 424. — № 2. — С. 239–243.
36. **Сорокин А. П., Савченко И. Ф., Межаков В. З., Артеменко Т. В.** Инновационно-технологические разработки эффективного использования низкокалорийных бурых углей Западного Приамурья // *ФТПРПИ.* — 2012. — № 4. — С. 165–171.
37. **Сорокин А. П., Римкевич В. С., Демьянова Л. П., Артеменко Т. В.** Эффективные технологии извлечения полезных компонентов из минерального сырья Верхнего и Среднего Приамурья // *ФТПРПИ.* — 2009. — № 3. — С. 110–120.
38. **Hower J. C., Groppo J. G., Joshi P., Dai S., Moecher D. P., Johnston M. N.** Location of cerium in coal-combustion fly ashes: Implications for Recovery of Lanthanides, *Coal Combustion & Gasification Products*, 2013, Vol. 5. — P. 73–78.
39. **Noskova L. P., Sorokin A. P.** Methylation as a method for the deep extraction processing of coal, *Solid Fuel Chemistry*, 2014, Vol. 48, Issue 5. — P. 275–280.
40. **Носкова Л. П., Савченко И. Ф.** Модификация угля Сергеевского месторождения методом жидкофазного каталитического алкилирования изопропиловым спиртом // *Химия в интересах устойчивого развития.* — 2012. — Т. 20. — № 5. — С. 581–587.
41. **Рождествина В. И., Сорокин А. П., Кузьминых В. М., Киселева А. А.** Содержание золота в буром угле и в продуктах его горения // *ФТПРПИ.* — 2011. — № 6. — С. 148–155.
42. **Сорокин А. П., Конюшок А. А., Агеев О. А.** Перспективы промышленного освоения продуктов сгорания угля в условиях Приамурья // *Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии.* — Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2016. — Т. 2. — С. 39–243.

*Поступила в редакцию 10/1 2018*