

УДК 620.91(571.53) «312/313»

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Такайшвили Людмила Николаевна¹,
luci@isem.irk.ru

Агафонов Глеб Владимирович¹,
gleb@isem.irk.ru

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Актуальность. Балансовые запасы энергетических углей Восточной Сибири уникальны по объемам, возможностям освоения и использования.

Цель: оценка доступных ресурсов энергетических углей региона при выделении ресурсов низкокачественных и местных углей и перспектив и возможностей их использования для нужд энергетики.

Объекты: месторождения угля, балансовые запасы, местные угли, тенденции поставок и перспективы использования углей, проекты сооружения объектов энергетики на угле.

Методы: методы системного анализа: классификация, структурирование и реструктурирование, анализ, формализация и конкретизация.

Результаты. Выполнена оценка ресурсов энергетических углей Восточной Сибири. Анализ тенденций потребления энергетических углей региона показал незначительный рост поставок на электростанции при относительно стабильных поставках прочим потребителям. Рассчитан потенциально возможный уровень доступных в перспективе ресурсов углей для нужд энергетики, составляющий около 400 млн т/год. В перспективе наиболее востребованным направлением использования углей останется энергетика. При анализе балансовых запасов энергетических углей выделена категория местных, особенностью которых является их удаленность от населенных пунктов и транспортных коммуникаций. Оценка перспективы вовлечения местных углей в хозяйственный оборот показала возможность их использования только в котельных и мелких ТЭС при минимальной конкуренции с другими видами топлива. Возможный коридор поставок восточносибирского угля определяется вариантом развития экономики. Минимальные уровни поставок соответствуют незначительному их росту, а максимальные – росту более чем в два раза за счет ввода в эксплуатацию ТЭС для экспорта электроэнергии. Расчетные объемы потребления углей экспортными ТЭС могут составить от 35 до 50 млн т. Потенциальные возможности добычи энергетических углей региона значительно превышают их востребованность. Результаты анализа ресурсов энергетического угля Восточной Сибири показывают их надежность на длительную перспективу как источника топлива для объектов энергетики.

Ключевые слова:

Энергетический уголь, балансовые запасы, Восточная Сибирь, потребление, добыча, развитие угледобычи, проекты, обеспеченность добычи запасами, тенденции.

Введение

Восточная Сибирь как экономический район включает Республики Бурятия, Хакасия и Тыва, Красноярский и Забайкальский край и Иркутскую область. Обширные территории Восточной Сибири простираются от южных районов Сибири до побережья Северного Ледовитого океана. На районы, отнесенные к Арктической зоне и районам крайнего севера, и районы, приравненные к районам крайнего Севера, приходится более половины территории Восточной Сибири [1]. Это, как правило, районы инфраструктурно-разреженные, с малой плотностью населения и низкой энергообеспеченностью. Восточная Сибирь располагает значительными запасами энергетических углей. Угледобывающие предприятия района снабжают углем объекты энергетики, в основном теплоэлектростанции (ТЭС) Восточной Сибири и за ее пределами. На территории Восточной Сибири находятся пять самых крупных гидроэлектростанций (ГЭС) России. Снижение выработки электроэнергии на ГЭС при изменениях водности рек компенсируют угольные ТЭС. В России в последние годы угольные электростанции стали значительно уступать газовым электростанциям

и гидроэлектростанциям, как и в большинстве развитых стран мира [2]. Сокращение доли угольной генерации в России связано с переводом на газ ТЭС в Европейской части, на Урале и частично на Дальнем Востоке. В Сибири же, и Восточной Сибири в частности, доля угольной генерации в основном сохранилась. Для Восточной Сибири угольные электростанции всегда играли важную роль, снабжая электроэнергией и теплом население и промышленность. По потреблению электроэнергии на душу населения Иркутская область и Красноярский край на третьем и четвертом месте в России за счет потребления электроэнергии промышленностью. Угледобывающие предприятия и объекты энергетики в Восточной Сибири играют градообразующую роль. Программой Развития угольной промышленности России на период до 2035 года основное развитие угледобычи планируется за счет восточных регионов России. Развитие угледобычи предусматривается в основном за счет сооружения угольных электростанций для удовлетворения внутренней потребности и экспорта электроэнергии.

Объектом настоящих исследований являются балансовые запасы месторождений энергетического уг-

ля Восточной Сибири, тенденции поставок восточно-сибирских углей, возможные уровни их добычи и использования, включая использование в качестве топлива для сооружения ТЭС на угле для экспорта электроэнергии. Особо выделены месторождения местных углей, разработка которых перспективна для энергообеспечения изолированных энергодефицитных районов.

Методы исследования

Исследования проведены с применением методов системного анализа: классификация, структурирование и реструктурирование, анализ, формализация и конкретизация [3]. Выполнен анализ динамики поставок восточносибирских углей за 2011–2019 гг., с выделением поставок на электростанции Восточной Сибири и других регионов России. На основе анализа данных по балансовым запасам угля Восточной Сибири рассчитаны запасы энергетических углей, в том числе низкокачественных и местных углей. Выполнен анализ программных документов с целью расчета возможных уровней поставок восточносибирских углей и их востребованности в перспективе, в том числе для электростанций, ориентированных на экспорт электроэнергии. В исследованиях использованы: справочная литература по государственному балансу запасов полезных ископаемых Российской Федерации (уголь) [4, 5], прогнозным ресурсам твердых и твердых горючих (уголь) полезных ископаемых Российской Федерации [6], официальные статистические данные по угольной промышленности [7] и электроэнергетике, а также официальные программные документы – схемы и программы развития электроэнергетики регионов Восточной Сибири (соответственно) 2016–2020 и 2021–2025 гг. и Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года. Потенциальные ресурсы углей Восточной Сибири для энергетики рассчитаны исходя из проектной мощности действующих предприятий, проектов сооружения новых угледобывающих предприятий и расчётных объемов выпуска низкосортных продуктов переработки коксующихся и энергетических углей на обогатительных фабриках. Потребность в топливе для электростанций рассчитана исходя из удельного нормативного расхода топлива, мощности электростанций, возможного годового объема выработки электроэнергии и низшей теплоты сгорания угля месторождения (проектного топлива).

Характеристика запасов энергетических углей

Балансовые запасы угля, в том числе энергетического, распределены по территории России неравномерно. Балансовые запасы угля по степени их изученности в соответствии с классификацией запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых, утвержденной Министерством природных ресурсов Российской Федерации, подразделялись на разведанные – А, В, С1 – и предварительно оцененные – категория С2. Доля Восточной Сибири в балансовых запасах энергетических углей России категорий А+В+С1+С2 составила 41,3 %, Западной Сибири –

40,6 %, Дальнего Востока – 10,3 %, и на остальные регионы приходится менее 10 % [4, 5]. В балансовых запасах углей Восточной Сибири преобладают энергетические угли (табл. 1), доля которых составляет 93 % от общего объема запасов, из них для добычи открытым способом пригодны 86 %. Наиболее перспективными по обеспеченности запасами энергетических углей являются месторождения Канско-Ачинского и Иркутского бассейнов и месторождения Забайкальского края. Обеспеченность запасами рассчитывается делением объема разведанных запасов (А+В+С1) на годовой объем добычи.

Таблица 1. Запасы Восточной Сибири по видам угля и способу отработки, млрд т

Table 1. Coal reserves in Eastern Siberia by types of coal and method of mining, bln t

| Вид угля, способ отработки Coal type, mining method | Категория балансовых запасов Balance reserves by category | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------|--------------------------|
| | A+B+C1 | C2 | Всего/Total A+B+C1+C2 |
| Восточная Сибирь, всего, в т. ч. Eastern Siberia, total, incl. | 68,0 | 30,2 | 98,2 |
| Коксующийся/Coking | 4,8 | 1,8 | 6,6 |
| Энергетический, из них: Thermal, of which: | 63,2 | 28,4 | 91,6 |
| Бурый/Brown | 49,3 | 21,2 | 70,5 |
| Каменный/Hard | 13,9 | 7,2 | 21,1 |
| Для открытой разработки, всего, в т. ч. For open-pit mining, total, incl. | 59,0 | 24,6 | 83,6 |
| Энергетический/Thermal | 55,6 | 23,6 | 79,2 |

Наибольшая часть балансовых запасов энергетического угля сосредоточена в Красноярском крае – 72,5 % от объема запасов Восточной Сибири. Доля Иркутской области составляет – 15,3 %, Республики Хакасия – 6 %, а вместе взятых Забайкальского края, Республик Бурятия и Тыва – 6,2 %. Месторождения наиболее качественных углей, пригодных для экспорта, расположены в республиках Хакасия и Тыва, а также в Забайкальском крае. Доля их в запасах энергетических углей составляет чуть более 36 %. Большая часть крупных месторождений находится в районах с развитой транспортной инфраструктурой.

В 2020 г. в Восточной Сибири действовало около 40 угледобывающих предприятий с проектной мощностью от 50 тыс. т в год до 22 млн т в год. В Красноярском крае разрабатываются крупные буроголивые месторождения угля с производственными мощностями от 2 до 22 млн т в год: Березовско-Назаровского, Бородинского и Балахтинского угленосных районов: Назаровское, Березовское, Бородинское, Переясловское и Большесырское. В Иркутской области разрабатываются крупные месторождения буроголивые: Мугунское и Азейское, и каменного угля: Черемховское и Головинское с производственными мощностями от 1,5 до 6 млн т в год. На отдельных месторождениях добыча угля ведется в течение нескольких десятилетий, при этом качественные показатели угля меняются. В первую очередь, обычно обрабатываются участки с лучшими качественными показателями и лучшими условиями отработки. В пределах одного месторождения имеется не одна, а

несколько марок углей, которые по качественным показателям могут значительно различаться на разных пластах, а особенно на граничных его участках. Доля углей, которые можно отнести к низкокачественным, имеется почти на каждом месторождении. К низкокачественным относятся и большинство бурых углей, практически любых марок, которые отличаются низкой теплотворностью, высокой зольностью и склонностью к самовозгоранию [8, 9].

Анализ всех учтенных Госбалансом Российской Федерации запасов угля по каждому из субъектов федерации Восточной Сибири показал, что запасы низкокачественных энергетических углей Восточной Сибири составляют 11,8 млрд т, или 13 % от разведанных (табл. 2). Кроме крупных месторождений угля, большей частью вовлеченных в хозяйственный оборот, существует множество мелких месторождений, которые можно классифицировать как местные угли. Главной особенностью месторождений местных углей является отсутствие транспортных коммуникаций и малая изученность. В основном это энергетические угли нераспределенного фонда с возможностью отработки их открытым способом, которые кроме их низкой эффективности для сжигания в топках зачастую малотранспортабельны. На балансовые запасы местных углей приходится 1,9 млрд т (табл. 2), или 2,1 % от общего объема запасов энергетических углей региона.

Таблица 2. Запасы Восточной Сибири низкокачественных и местных углей по видам, млрд т

Table 2. Coal reserves in Eastern Siberia by types of coal and method of mining, bln t

| Вид и категория угля Type and category of coal* | Категория балансовых запасов Balance reserves by category | | |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----|--------------------------|
| | A+B+C1 | C2 | Всего/Total A+B+C1+C2 |
| Бурый низкокачественный Brown low quality | 7,0 | 2,0 | 9,0 |
| Местные из бурого Local from brown | 1,2 | 0,4 | 1,6 |
| Каменный низкокачественный Low quality hard | 1,3 | 1,5 | 2,8 |
| Местные из каменного Local from hard | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| Всего низкокачественных Total low quality | 8,3 | 3,5 | 11,8 |
| Всего местных/Total local | 1,3 | 0,6 | 1,9 |

*расчёты авторов на основании данных [4, 5]

*authors' calculations based on the data [4, 5].

В Восточной Сибири насчитывается около 45 месторождений местных углей. Большая их часть (16) находится в Красноярском крае, в районах, отнесенных к Арктической зоне, районам крайнего севера, и районах, приравненных к районам крайнего Севера. В Иркутской области 10 месторождений местных углей, а в Бурятии и Забайкалье – 19. Это в основном мелкие месторождения бурых и каменных углей, пригодные для добычи открытым способом и залегающие на малоосвоенных территориях. По объемам запасов местных углей наибольшими запасами располагает Республика Бурятия – 44 % от суммарного запаса местных углей Восточной Сибири, Иркутская об-

ласть – 29 %, Красноярский край – 16 %, а Забайкальский край – 12 %. У 22-х месторождений из 45-и балансовые запасы каждого категорий A+B+C1+C2 превышают 4 млн т, а запасы 10-и месторождений составляют менее 1 млн т. Для большинства месторождений (23) при средних сроках эксплуатации угольных разрезов 40 лет возможный годовой объем добычи может составлять от 25 до 100 тыс. т в год. Такой объем достаточен для покрытия потребности в топливе поселка с населением до 5 тыс. человек. Для месторождений с запасами менее или около 1 млн т возможный объем годовой добычи может составить не более 25 тыс. т в год, что вполне достаточно для поселка 1–1,5 тыс. человек. Это показывает опыт разработки месторождений местных углей республики Бурятия, где для покрытия потребности в угле небольших поселений годовые объемы добычи не превышают 10 тыс. т.

Угли разрабатываемых месторождений различаются значительно не только по цене, но и по всем качественным характеристикам: низшей теплоте сгорания, содержанию золы и серы и наличию сопутствующих элементов, таких как мышьяк, радиоактивные элементы, редкоземельные металлы и т. п. [4, 5, 7, 9, 10]. Зола, полученная после сжигания углей некоторых месторождений, небезопасна для использования. Например, угли Балахтинского угленосного района по качественным характеристикам сжигания являются более предпочтительными по сравнению с широко используемыми в энергетике бородинскими углями [4]. Ограничением на использование балахтинского угля является содержание мышьяка, тем не менее этот уголь поставляется в небольших объемах на экспорт и для нужд комбыта. Зола после его сжигания используется населением в качестве удобрения, что оказывает негативное влияние на окружающую природную среду.

Ввиду малой изученности не для всех малых месторождений определены качественные показатели. В республике Бурятия к местным отнесены только бурые угли нераспределенного фонда. В Красноярском крае количество бурых и каменных углей в запасах местных углей примерно равное, но степень их изученности неравнозначна. В Иркутской области наиболее крупное бурогольное месторождение местных углей – Хандинское. Большая часть запасов местных углей Иркутской области приходится на каменные тощие и окисленные угли Жеронского месторождения Тунгусского бассейна. В Забайкальском крае 60 % запасов местных углей представлены каменными углями. Большая часть местных бурых углей малопригодны для сжигания без специальной топливоподготовки, за исключением каменных углей отдельных месторождений. В мировой практике существуют и разрабатываются технологии использования низкосортных углей [11, 12], такие как сушка для снижения влажности, стабилизация для снижения характеристик самонагрева и очистка для снижения содержания в угле минералов. Ввиду особенностей российской энергетики и ориентации электростанций на уголь определенного качества эти методы пока не нашли широкого применения в России. Основное направление использования местных углей – это

нужды жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) и сжигание в топках бытовых печей [13]. Химический состав углей ряда месторождений позволяет рассматривать их как источник сырья для углехимии [14]. Угли месторождений Забайкальского края содержат в своем составе в промышленно значимых концентрациях уран и редкоземельные металлы – германий, бериллий, галлий, вольфрам, молибден. Выявлены запасы угля с повышенным содержанием ниобия, стронция и бора [9]. Из перечисленных элементов в настоящее время пока извлекается только германий.

Ресурсы углей для энергетики

Ресурсы углей для энергетики включают: ресурсы из добычи энергетических углей, ресурсы попутной добычи энергетических при добыче коксующихся углей и низкосортные продукты обогащения. В отличие от прогнозных ресурсов углей, которые представляют угольный потенциал, представленный ожидаемыми запасами углей, ресурсы энергетических углей рассчитываются исходя из возможных объемов добычи и их переработки. Ресурсы углей Восточной Сибири для энергетики представлены суммой потенциально возможной добычи энергетических углей действующих предприятий, проектных мощностей новых предприятий и объемов выпуска низкосортных продуктов переработки высококачественных углей – коксующихся и энергетических. Объемы выпуска низкосортных продуктов могут составлять от 0 до 20 % от объемов обогащения угля. Согласно выполненным исследованиям и по оценкам авторов потенциальные ресурсы угля Восточной Сибири для нужд энергетики могут составить около 400 млн т (табл. 3). Из них низкосортные продукты переработки углей на обогатительных фабриках составляют от 16 до 22 млн т. Расчёты выполнены без учета возможностей добычи угля на местных месторождениях ввиду отсутствия официальных проектов их разработки. Высококачественные угли и продукты их переработки (концентраты) пригодны для поставок на экспорт, к ним относятся угли Забайкальского края, республик Тыва и Хакасия и в небольших объемах угли Красноярского края и Иркутской области. Потенциальные ресурсы угля для энергетики выше, поскольку изученность месторождений Восточной Сибири низкая. Отношение разведанных балансовых запасов к прогнозным ресурсам [4], характеризующее изученность, составляет всего 2,8 %.

Восточная Сибирь располагает значительным потенциалом для развития добычи углей, как за счет расширения и полного использования действующих мощностей, так и за счет нового строительства. Обеспеченность запасами добычи энергетических углей России категорий А+В+С1, при уровне добычи энергетических углей 2019 г. для разрабатываемых месторождений Восточной Сибири составляет более 880 лет (для России в целом около 570 лет). Если же рассматривать сложность вовлечения в хозяйственный оборот месторождений местных и низкосортных углей, то этот срок будет незначительно ниже как для России, так и для Восточной Сибири.

Таблица 3. Потенциальные ресурсы углей Восточной Сибири для энергетики, млн т

Table 3. Potential coal resources of Eastern Siberia for power engineering, million tons

| Регион Region | Ресурсы/* Resources/* |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Восточная Сибирь, всего, в т. ч. Eastern Siberia, total, incl. | 388/6–22 |
| – Республика Тыва/Tuva Republic | 63/8–10 |
| – Республика Хакасия The Republic of Khakassia | 48/6–8 |
| – Красноярский край Krasnoyarsk region | 123 |
| – Иркутская область/Irkutsk region | 53 |
| – Республика Бурятия The Republic of Buryatia | 19 |
| – Забайкальский край/Transbaikal region | 82/2–4 |

Примечание: * в том числе от переработки сортовых углей.

Note: * including from the processing of high-quality coals.

С позиций оценки перспективности разработки месторождений местных углей рационально рассматривать их следующие характеристики:

- энергодефицитность района месторождения: если район энергодефицитный, то есть ли конкуренция с другими энергоносителями, в том числе с привозным углем или возможность подключения к существующим электрическим сетям;
- объем запасов;
- качественные характеристики и химический состав угля;
- развитость транспортной инфраструктуры с позиций поставки другого энергетического ресурса;
- характеристика района месторождения: разрешена ли разработка месторождений полезных ископаемых в районе (заказники, заповедники и т. п.);
- условия разработки месторождения: горно-геологические, гидрологические и другие.

Поскольку уголь является мощным сорбентом, угли разных месторождений могут содержать в своем составе редкоземельные и другие компоненты, такие как золото, платина, серебро, германий, ванадий, хром, титан и т. п., иногда в промышленно значимых концентрациях. По представленным признакам можно выбрать ряд месторождений, угли которых могут быть востребованы как в обозримой, так и в далекой перспективе, хотя их суммарный вклад в потенциальные ресурсы едва ли превысит 0,3 млн т. Изученность большинства местных месторождений еще более низкая, чем для запасов угля в целом, разработка отдельных месторождений осложняется наличием многолетней мерзлоты, особенно в районах крайнего севера и приравненных к ним, обводненностью отдельных месторождений бурого угля, а главное – неразвитостью транспортной инфраструктуры. Этим отличаются месторождения двух бассейнов – Таймырского и Тунгусского, которые являются слабоосвоенными ввиду отсутствия инфраструктуры, недостатка трудовых ресурсов, слабой геологической изученности и, соответственно, низкой экономической оценки эффективности возможных проектов.

Тенденции поставок углей Восточной Сибири

За 2011–2019 гг. общие поставки восточносибирских углей выросли на 16,3 млн т, или на 20 % (рис. 1). Основной рост поставок пришелся на экспорт угля – 8,5 млн т, и электростанции – 7,8 млн т, при сокращении поставок прочим потребителям на 0,2 млн т (рис. 1) [7]. На экспорт поставляются, в первую очередь, высококачественные продукты переработки угля, а также и рядовой каменный уголь. Низкосортные продукты переработки поступают на электростанции и котельные.

Основными потребителями восточносибирских углей на внутреннем рынке являются электростанции. Их доля в поставках на внутренний рынок возросла за рассматриваемый период с 71 до 75 %. Доля прочих потребителей, включая котельные, производство це-

мента, клинкера и нетопливные нужды соответственно сократилась. Поставки угля на коксохимические заводы из республики Тыва и Забайкальского края в 2014 и 2015 гг. не оказали существенного влияния на общие объемы поставок. На фоне снижения поставок угля на электростанции России в целом [15] шло увеличение поставок энергетических восточносибирских углей [7]. Поставки угля на электростанции регионов Восточной Сибири подвержены значительным колебаниям (рис. 2, табл. 4) [7] из-за большого влияния климатических условий (холодная или теплая зима), гидрологических условий (водность рек и водохранилищ) и наличия остатков угля на складах на конец года. Диапазон изменения поставок составил от – 3,8 млн т (–8 %) до +4,7 млн т (+11 %) по отношению к предыдущему году.

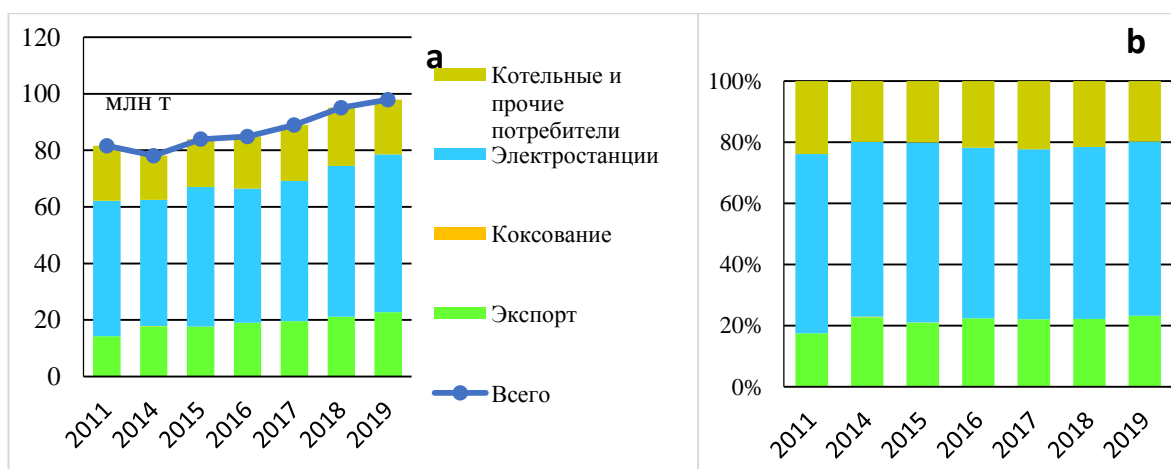


Рис. 1. Поставки углей Восточной Сибири: а) динамика поставок; б) структура поставок
 Fig. 1. Deliveries of coal from Eastern Siberia: a) supply dynamics; b) supply structure

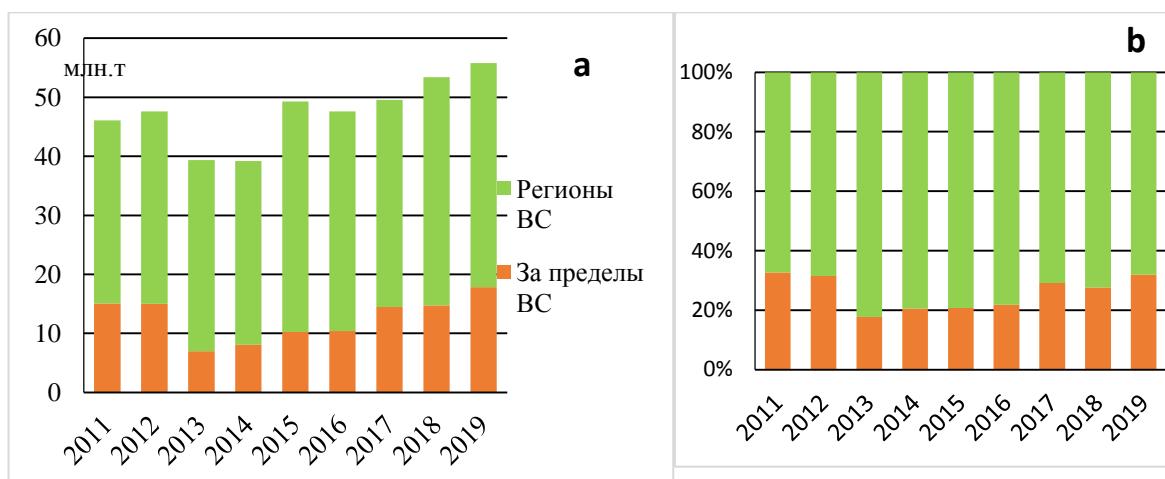


Рис. 2. Поставки восточносибирского угля электростанциям: а) динамика поставок; б) структура поставок
 Fig. 2. Deliveries of East Siberian coal to power plants: a) supply dynamics; b) supply structure

Энергетические угли Восточной Сибири поставляются в основном на электростанции регионов добычи, за исключением углей Красноярского и Забайкальского краев и республики Хакасия. На электростанции вне Восточной Сибири в 2019 г. поставлено 17,8 млн т. За пределы Восточной Сибири поставляются хакассские

угли, в основном в западном направлении, и из Забайкальского края – в восточном, из Красноярского края – в западном и восточном. На отдельных электростанциях вне регионов Восточной Сибири потребление восточносибирских углей составляет от 80 до 100 % от объемов потребляемого топлива. К ним относятся Ря-

занская ГРЭС, отдельные электростанции Алтайского и Приморского краев, Новосибирской и Кемеровской областей. Перевод отдельных блоков электростанций на газ (Череповецкая ГРЭС и другие) в целом не оказал значительного влияния на динамику поставок углей

Восточной Сибири на электростанции. Продолжение тенденций, сложившихся за рассматриваемый период, зависит от возможного сценария развития угольной генерации в России. С точки зрения наличия балансовых запасов угля ограничений нет.

Таблица 4. Поставки угля регионами Восточной Сибири на электростанции, млн т

Table 4. Coal supplies by the regions of Eastern Siberia to power plants, million tons

| Регион/Region | 2011 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019/* |
|----------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| Восточная Сибирь, всего, в т. ч./Eastern Siberia, total, incl. | 46,09 | 39,19 | 49,28 | 47,60 | 49,55 | 53,41 | 55,82/17,8 |
| Красноярский край/Krasnoyarsk region | 27,73 | 25,86 | 28,05 | 26,90 | 27,25 | 28,89 | 31,54/12,1 |
| Республика Хакасия/The Republic of Khakassia | 1,66 | 3,18 | 4,66 | 3,91 | 3,61 | 4,60 | 4,91/4,9 |
| Республика Тыва/Tuva Republic | 0,27 | 0,10 | 0,11 | 0,10 | 0,09 | 0,14 | 0,15 |
| Иркутская область/Irkutsk region | 10,30 | 7,07 | 7,48 | 7,68 | 7,92 | 8,83 | 8,51 |
| Республика Бурятия/The Republic of Buryatia | 0,80 | 1,92 | 2,29 | 2,32 | 2,35 | 2,50 | 2,49 |
| Забайкальский край/Transbaikal region | 7,10 | 6,54 | 6,77 | 6,47 | 8,31 | 8,44 | 8,21/0,8 |

*Поставки угля на электростанции за пределы Восточной Сибири.

*Coal supply to power plants outside Eastern Siberia.

Проекты и возможности использования ресурсов энергетических углей Восточной Сибири

Проекты сооружения крупных электростанций на угле и расширение мощности действующих (табл. 5) в Восточной Сибири, в том числе для экспорта электроэнергии, рассматривались в различных государственных, федеральных и региональных стратегиях и программах. В качестве организаций, реализующих проекты 2–5 (табл. 5), представлено Открытое акционерное общество «ЕвроСибЭнерго» совместно с энергетическими компаниями Китайской Народной Республики. Планируемые источники финансирования состоят из

20–30 % собственных средств и 70–80 % заемных. Электростанции, в качестве топлива использующие харанорские угли, рассчитаны также на региональных потребителей электро- и теплоэнергии. Суммарная потребность в топливе для представленных ТЭС составляет от 35 до 50 млн т угля в год, только для выработки электроэнергии. Потребность в топливе рассчитана исходя из удельного расхода топлива 276 г у.т./кВт·ч. Если учесть и возможную выработку теплоэнергии, то цифры могут быть несколько выше, но незначительно, так как представленные электростанции ориентированы в основном на экспорт электроэнергии.

Таблица 5. Характеристика проектов строительства и ввода в эксплуатацию электростанций

Table 5. Characteristics of projects for the construction and commissioning of power plants

| № п/п No. | Предприятие или месторождение Enterprise or deposit | Мощность электростанции, МВт Power plant capacity, MW | Месторождение/Deposit | Потребность в топливе, млн т* Fuel demand, million tons* |
|-----------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1 | Харанорская ТЭС-2/Kharanorskaya TPP-2 | 2400 | Харанорское/Kharanorskoe | 9–12 |
| 2 | Ишидейское/Ishideyskoe | 2000 | Ишидейское/Ishideyskoe | 6–8 |
| 3 | Чикойская впадина Chikoy depression | 1500 | Красночикойское, Зашуланское Krasnochikoyское, Zashulansкое | 6–8 |
| 4 | Мугунское/Mugunskoe | 900 | Мугунское/Mugunskoe | 5–6,0 |
| 5 | Приаргунская группа Priargunskaya group | 900 | Пограничное, Приозерное, Кутинское Pogranichnoe, Priozernoe, Kutinskoe | 5,5–7 |
| 6 | Харанорская ГРЭС (4 блок) Kharanorskaya GRES (block 4) | 660 | Харанорское, Уртуйское Kharanorskoe, Urtuyskoe | 2,5–3,5 |

Примечание: *расчеты авторов без учета выработки теплоэнергии.

Note: *calculations of the authors excluding heat production.

Анализ качественных характеристик углей месторождений (табл. 6) [4, 5] показывает необходимость введения топливоподготовки для сжигания этих углей. Горногеологические и гидрологические условия разработки на всех месторождений достаточно благоприятные.

Строительство новой и расширение мощности существующей ТЭС на харанорском угле планируется за счет расширения мощности действующего Харанорского разреза с 5 до 9 млн т в год. Строительство угольной ТЭС на Мугунском месторождении угля рассчитано на расширение мощности действующего Мугунского разреза с 6 до 13 млн т в год. Комплексная оценка реализации проектов экспорта российской

электроэнергии из Восточной Сибири в Китай показала, что наиболее экономически целесообразным проектом является строительство ТЭС, в качестве топлива использующей Мугунский уголь [16]. Для сооружения угольных ТЭС на углях месторождений Ишидейского, Приаргунской группы и Чикойской впадины планируется создание новых угольных разрезов. Возраст проекта разработки Ишидейского месторождения исчисляется со времен СССР. Сдерживающие факторы строительства разреза на Ишидейском месторождении, кроме невостребованности, связаны с сложными гидрологическими и горнотехническими условиями разработки месторождения: наличие водоносного комплекса, широкое развитие

на площади карьерного поля речной сети, интенсивная заболоченность (80 % от площади) и распространение островной мерзлоты (30 %), шестибальная сейсмичность [8].

Таблица 6. Качественные характеристики месторождений углей, планируемых для строительства электростанций на угле для экспорта электроэнергии

Table 6. Qualitative characteristics of coal deposits planned for the construction of coal-fired power plants for the export of electricity

| Месторождение Deposit | Вид угля* Coal type* | Зола | Сера | Влага | Низшая теплота сгорания, МДж/кг Net calorific value, MJ/kg |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|---------|----------|---------------------------------------------------------------|
| | | Ash | Sulfur | Moisture | |
| % | | | | | |
| Иркутская область/Irkutsk region | | | | | |
| Ишидейское Ishideyskoe | К | 16–20 | 0,5–1,6 | 14–15 | 21 |
| Мугунское Mugunskoe | К | 18,3–21 | 0,6–1,6 | 19–20,6 | 17–18 |
| Забайкальский край/Transbaikal region | | | | | |
| Харанорское Kharanorskoe | Б | 15–32 | 0,3–0,6 | 39–44 | 12–13 |
| Пограничное, Приозерное, Кутинское Pogranichnoe, Priozernoe, Kutinskoe | Б | 23–29 | 0,3–0,4 | 22–30 | 12–16 |
| Уртуйское Urtuyskoe | Б | 11 | 0,3 | 29 | 17 |

Примечание: К – каменный, Б – бурый.

Note: K – hard, B – brown.

Месторождения угля Зашуланское и Красночикоиское Забайкальского края отнесены нами к местным углям, поскольку они расположены достаточно далеко от транспортных коммуникаций: Зашуланское в 115 км от железнодорожной станции Петровск-Забайкальский и в 26 км от поселка Шимбилик (население – около 500 человек), а Красночикоиское в 90 км от железнодорожной станции Красный Чикой. Зашуланское месторождение разрабатывается открытым способом с годовым объемом добычи немногим более 100 тыс. т при проектной мощности 6 млн т в год. Угли месторождения пригодны для получения кокса в смеси с южноякутскими углями. Разработка Красночикоиское месторождения предполагала бы отработку запасов каменного угля открытым способом в месте расположений сел Коротково, Быково, Большаково, Александровка, Малоархангельск и Барахаево, что вызвало бы негативную, мягко говоря, реакцию жителей. К тому же власти Забайкальского края считают, что в районе бассейна реки Чикой нужно сохранить уникальную экологию территории. Река Чикой питает и сохраняет кедровые леса района и является одним из доминирующих водорегулирующих районов в водособорном бассейне Байкала. Минприроды удалось добиться решения о включении Красночикоиское месторождения в проект программы лицензирования угольных месторождений России на 2021–2025 гг. Кроме того, для всех пред-

ставленных проектов требуется основательная экологическая экспертиза. Выше приведенные факты свидетельствуют о низкой проработанности проектов строительства угольных электростанций, представленных в государственных документах, и необходимости учета и трезвого взвешивания многих аспектов сооружения перечисленных ТЭС.

Несмотря на относительно низкую эффективность использования месторождений местных углей, ряд малых месторождений разрабатывается. Так, в республике Бурятия для нужд ЖКХ разрабатываются Дабан-Горхонское и Хара-Хужирское месторождения. Кроме разрабатываемых месторождений в Бурятии периодически возникают, рассматриваются и иногда реализуются проекты разработки месторождений местных углей для нужд ЖКХ изолированных территорий. Стратегией социально-экономического развития Республики Бурятия до 2025 года рассматривалась возможность обеспечения нужд ЖКХ в основном за счет развития местных ресурсов угля, а именно путем создания малых угольных предприятий [13], а в стратегии развития Республики Бурятия до 2035 в качестве одной из основных задач развития энергетической системы рассматривается развитие распределенной генерации, в первую очередь в отдаленных изолированных районах. Решение этой задачи возможно путем создания мини ТЭС на угле, основывающихся на использовании ресурсов углей местных месторождений. Содержание ценных металлов и редкоземельных элементов в углях Восточной Сибири, в особенности в углях республики Бурятия и Забайкальского края, создает предпосылки для извлечения в перспективе этих ценных компонент. Существуют и применяются отдельные технологии извлечения таких компонент, а разработкам новых технологий извлечения редких и редкоземельных элементов в работах зарубежных исследователей уделяется значительное внимание [17–19].

Проблемам использования углей низкого сорта в качестве топлива в электро- и теплоэнергетике посвящено множество зарубежных и российских исследований [20–24]. В России пока не существует необходимости широкого вовлечения в хозяйственный оборот низкосортных углей благодаря наличию значительных запасов угля, которые используются без предварительной подготовки топлива. Исключение, возможно, составляют угли изолированных районов, где другие источники топливоснабжения малодоступны или экономически не оправданы [25].

Проблема замены дорогостоящего дизельного топлива в Восточной Сибири на местные угли имеется в ряде поселений. ДЭС мощностью 7,7 мВт с годовым объемом потребления топлива 14 тыс. т эксплуатируется в поселке Ербогачен, на севере Иркутской области. Стоимость завезенного топлива в 2019 г. составила 269 млн р. Доставка топлива осуществляется по зимнику, что иногда создает проблемы с энергообеспечением поселка из-за отсутствия достаточного запаса топлива. В 20 км к северо-востоку от поселка находятся 2 участка каменных углей Ербогаченской площади с суммарными запасами категорий А+В+С1

656 тыс. т. Годового объема добычи местных углей 20–40 тыс. т будет достаточно для замены Ербогаченской ДЭС на мини ТЭЦ на угле. При ориентировочной цене добываемого местного угля 4 тыс. р./т стоимость необходимого годового его объема для угольной мини ТЭЦ будет в диапазоне 80 до 160 тыс. р. Кроме снижения затрат на покупку топлива основным преимуществом этого варианта топливоснабжения является его надежность. Использование ербогаченского угля возможно без топливподготовки: содержание серы 0,9 %, зола – 20–24 %, низшая теплота сгорания – 18 МДж/кг. Срок эксплуатации месторождения в зависимости от объемов добычи может составить от 16 до 33 лет. Изученность месторождения низкая, при условии доразведки и вовлечения запасов категории С2 можно рассчитывать на большой срок его эксплуатации.

На севере Красноярского края расположено Сырадасайское месторождение коксующихся углей Таймырского бассейна, оно находится в 100 км от поселка Диксон. Освоение месторождения уже начато в соответствии с реализацией Стратегии развития Красноярского края до 2030 года с целью экспорта углей. Предполагается создание горно-металлургического комплекса для поставок углей на экспорт в Западную Европу и на азиатско-тихоокеанский рынок. В этом же районе, в 50 км на юг от поселка Диксон, расположено месторождение каменных тощих углей Слободское. В настоящее время месторождение слабо изучено, но его угли можно рассматривать как перспективный энергетический ресурс для создания объектов тепло- и электроэнергетики промышленных поселков и поселений, создаваемых в зоне поселка Диксон. Для энергообеспечения рабочего поселка численностью около одной тысячи человек необходимо сооружение мини ТЭЦ мощностью 5–6 МВт. Суточная потребность в угле колеблется, в зависимости от режима работы и температуры наружного воздуха, от 30 до 70 т, а за год – в пределах 11–25 тыс. т.

В Забайкальском крае расположено Урейское месторождение каменных углей, в 45 км к западу от поселка Дульдурга. Угли марки Д зольностью 14 %, влажностью 3,5–10 %, с содержанием серы 0,5 % и низшей теплотой сгорания 24 МДж/кг являются хорошим топливом для энергетических нужд многочисленных рассредоточенных поселений центральной части Забайкальского края. Рассматриваются также коммерческие предложения по освоению этого месторождения с последующей переработкой углей на месте добычи. Реализация этих проектов предполагает получение помимо электроэнергии удобрений, синтез-газа, моторного топлива и других продуктов переработки угля с целью поставок продуктов как в регионы России, так и на экспорт в Китай. Балансовые запасы угля месторождения превышают 5 млн т, возможный годовой объем добычи может составить от 120 до 140 тыс. т.

На севере Иркутской области, в 46 км от поселка Магистральный, вблизи от железнодорожной трассы БАМ, расположено Хандинское месторождение бурых углей. Угли месторождения малосернистые и

низкозольные, но взрывоопасные по пыли и не устойчивые к окислению и могут быть использованы как низкосортное энергетическое топливо [14]. Но в этом отсутствует необходимость, поскольку электроснабжение поселка Магистральный осуществляется от подстанции «Киренга». Для покрытия, роста электрических нагрузок в поселке Магистральный строительства новых источников электроснабжения не требуется, поскольку в соответствии со Схемой теплоснабжения Магистральнинского муниципального образования Казачинско-Ленского района на период до 2028 г. ПС «Киренга» обладает достаточным резервом мощности для подключения новых потребителей электроэнергии. Перспективы использования хандинских углей связаны только с углехимией. Хандинские угли содержат в своем составе 70 % гуминовых кислот, и по своему качественному составу они являются перспективным сырьем для получения буругольного воска, углещелочных реагентов и препаратов гуминовых кислот, а также производства органических удобрений [14].

Потребность ЖКХ в местных углях во многом будет зависеть от перспектив развития близлежащих к месторождениям регионов: возникновения новых предприятий промышленности и, соответственно, создания или расширения поселений в районах нового освоения, а также от развития в доступной близости от этих регионов объектов транспортной инфраструктуры. Проблемы глубокой переработки углей широко обсуждаются на государственном уровне. В октябре 2020 г. комитетом Государственной Думы по энергетике представлены рекомендации «круглого стола» на тему «Законодательное обеспечение развития глубокой переработки угля и углехимии». Месторождения угля Восточной Сибири, перспективные для широкомасштабного развития углехимии, имеются практически во всех регионах Восточной Сибири. В настоящее время в Красноярском крае компанией СУЭК на Березовском разрезе реализуется инвестиционный проект, позволяющий получать целую линейку продуктов для разных направлений использования. Особое внимание уделяется технологии получения из угля бездымного топлива.

Перспективы использования ресурсов энергетических углей Восточной Сибири

Несмотря на складывающееся соперничество между «угольной» и «газовой» генерацией, мероприятиями, предусмотренными в Стратегии долгосрочного развития Российской Федерации по снижению уровня выбросов парниковых газов до 2050 года, предпочтительность «угольной» будет сохраняться еще длительное время, особенно в восточных регионах России [26–28]. Основные проблемы при этом сводятся к необходимости разработки и внедрения новых современных технологий в угольной энергетике, направленных на повышение технической эффективности оборудования и улучшение экологических показателей. Эта проблема широко обсуждается в многочисленных работах российских и зарубежных исследователей [9, 29–36].

В исследованиях выполнена оценка возможного коридора использования углей Восточной Сибири (рис. 3). Объемы поставок получены экспертно. Минимальному варианту соответствует:

- сокращение поставок угля за пределы Восточной Сибири из-за перевода электростанций и котельных европейской части России на газовое топливо с 17,8 до 8 млн т; прочих потребителей – с 19,3 до 10 млн т;
- сохранение существующих мощностей угольных электростанций Восточной Сибири с незначительным приростом поставок за счет расширения энергообеспеченности населения;
- сокращение потребления угля за счет внедрения энергосберегающих технологий;
- снижение удельного расхода топлива за счёт внедрения передовых технологий сжигания.

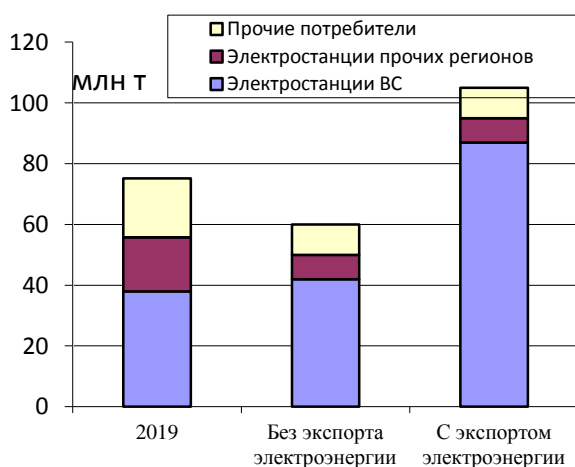


Рис. 3. Поставки энергетических углей Восточной Сибири
Fig. 3. Thermal coal supply from Eastern Siberia

Максимально возможный объем поставок энергетических углей включает строительство ТЭС для экспорта электроэнергии и при возможном в перспективе умеренном росте спроса на электро- и теплоэнергию за счет реализации проектов развития горнодобывающей промышленности и улучшения энергообеспечения ЖКХ и прочих потребителей.

Использование месторождений местных углей не входит в оценку коридора использования углей Восточной Сибири ввиду отсутствия проектов. Вовлечение низкокачественных и местных углей в хозяйственный оборот будет зависеть в основном от их востребованности и, в первую очередь, от их местоположения относительно потенциальных потребителей, а также от качественных характеристик и свойств углей. Использование местных углей возможно в качестве топлива для котельных и мини-ТЭЦ в жилых поселках северных территорий региона, создаваемых в процессе освоения этих территорий с целью разработки перспективных месторождений минерально-сырьевых ресурсов.

Рост экспорта угля, предусмотренный в программных документах, предусматривает увеличение переработки угля на обогатительных фабриках. Про-

дуктами переработки являются концентрат, поставляемый на экспорт, и промпродукт, являющийся низкосортным топливом, не востребованность которого может ограничивать поставки на экспорт. Незначительный рост поставок энергетического угля ожидается на электростанции для удовлетворения собственной растущей потребности в электроэнергии и тепле, в том числе за счет развития горнодобывающей промышленности в Забайкальском крае и республике Бурятия. Существенный рост поставок энергетического угля возможен только в связи с предусматриваемым программными документами строительством и введением в эксплуатацию угольных электростанций для экспорта электроэнергии.

Перспективное направление развития уголедобычи и углепользования – это создание на базе месторождений промышленного кластера с получением продуктов переработки не только углей, но и техногенных отходов. Это включает строительство на борту предприятий уголедобычи современных угольных ТЭС. При этом в качестве важнейшего технического направления получают развитие технологии сжигания угля в кипящем слое, позволяющие заметно снизить выбросы вредных веществ [29].

Выводы

Наличие значительных потенциальных ресурсов энергетических углей в Восточной Сибири позволяет рассматривать их как надежный источник топлива для ТЭС и котельных на длительную перспективу и в качестве экспортного потенциала и сырья для углехимической промышленности. Максимально возможная потребность в угле для ТЭС существенно ниже потенциальных возможностей увеличения добычи углей в Восточной Сибири. В зависимости от сценария развития экономики региона возможен рост производства электроэнергии в Восточной Сибири при увеличении доли угольной генерации и сокращении доли ГЭС. Значительный рост использования углей Восточной Сибири возможен только в качестве топлива на электростанциях, ориентированных на экспорт электроэнергии. Проекты сооружения таких электростанций пока недостаточно обоснованы и требуют дополнительной проработки—технологических аспектов и изучения емкости международного рынка электроэнергии и исследования рисков, обусловленных геополитическими условиями. Строительство электростанций на угле для экспорта электроэнергии в ближайшей перспективе представляется маловероятным. Переход на безуглеродную энергетику для Восточной Сибири в настоящее время тоже маловероятен, по разным причинам, в том числе экономическим и социальным.

Ограниченные масштабы использования низкосортных и местных углей Восточной Сибири в настоящее время обусловлены наличием в регионе ресурсов более качественных углей с достаточной степенью эффективности их транспортировки и использования у рассредоточенных потребителей, а также существующей возможностью подключения некоторых потребителей к существующим сетям электроснабжения.

Разработка месторождений местных углей перспективна на территориях региона с низкой транспортной доступностью и зависит от конкурентоспособности с привозными и другими энергоносителями (газ, гидроэнергия, угли крупных месторождений). При использовании передовых технологий сжигания угля ТЭС малой мощности в местах добычи местных углей могут составить конкуренцию для источников теплоэнергии на другом виде топлива [36].

Наиболее перспективным с позиций экономики и экологии представляется создание на базе месторождений угля промышленных кластеров.

В состав кластера могут входить предприятия: по добыче и переработке угля и техногенных отходов, электростанции на угле и газе из угольных пластов, а также другие предприятия. В таких проектах конечными продуктами являются продукты с высокой добавленной стоимостью, полученные при переработке не только угля и дегазации угольных пластов, но и шахтных вод, шлаков и выбросов в атмосферу после сжигания угля на электростанциях и т. д. В силу уникальности месторождений угля для каждого месторождения должен быть подготовлен индивидуальный проект с отличающимся составом предприятий и конечных продуктов.

Благоприятными факторами для использования энергетических углей Восточной Сибири являются:

- высокая обеспеченность запасами энергетических углей Восточной Сибири для развития добычи;
 - перспективность большинства месторождений для обработки открытым способом;
 - относительно высокий уровень развития транспортных коммуникаций, в районах перспективных крупных месторождений;
 - наличие балансовых запасов местных углей в энергодефицитных территориях, ориентированных на дорогое привозное топливо;
 - высокий экономический потенциал региона.
- К сдерживающим факторам могут быть отнесены:
- низкая степень диверсификации отраслевой структуры промышленности и низкая доля в экономике региона высокотехнологичного сектора;
 - миграционный отток населения;
 - слабое развитие инженерной и рыночной инфраструктуры;
 - высокий уровень загрязнения природной среды в районах разработки крупных месторождений;
 - экстремальные климатические условия на значительной части региона.

Исследование выполнено в рамках научного проекта XI.174.2. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. АААА-А21-121012090010-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаузер В.В., Лыткина Т.С., Смирнов А.В. Дифференциация арктических территорий по степени заселенности и экономической освоенности // Арктика: экология и экономика. – 2017. – Т. 28. – № 4. – С. 18–31. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-18-31.
2. BP Energy Outlook. 2020 edition. URL: <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/bp-energy-outlook-2020.pdf> (дата обращения 02.08.2021).
3. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных направлений Сибирского энергетического института – Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева / отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.
4. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2019 года. Вып. 91. Уголь. Том VII. Сибирский федеральный округ. Часть 2. – М.: Министерство Природных Ресурсов и Экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию, Российский Федеральный геологический фонд, 2019. – 314 с. URL: <https://rfgf.ru/info-resursy/raboty-po-izucheniyu-nedr> (дата обращения 26.08.2021).
5. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2019 года. Вып. 91. Уголь. Том VIII. Дальневосточный федеральный округ. – М.: Министерство Природных Ресурсов и Экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию, Российский Федеральный геологический фонд, 2019. – 412 с. URL: <https://rfgf.ru/info-resursy/raboty-po-izucheniyu-nedr> (дата обращения 26.08.2021).
6. Прогнозные ресурсы твердых и твердых горючих (уголь) полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2019 года. – М.: Министерство Природных Ресурсов и Экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию, Российский Федеральный геологический фонд, 2019. – 80 с. URL: <https://rfgf.ru/info-resursy/raboty-po-izucheniyu-nedr> (дата обращения 26.08.2021).
7. Статистические и аналитические информационные материалы по основным показателям производственной деятельности организаций угольной отрасли России. – М.: ЦДУ ТЭК, 2000–2019. URL: <http://www.cdu.ru> (дата обращения 06.08.2021).
8. Быкадоров В.С., Череповский В.Ф. Угольная база России. Том III. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири Южная часть (Красноярский край, Канско-Ачинский бассейн; Республика Хакасия, Минусинский бассейн; Республика Тыва, Улугхемский бассейн; Иркутская область, Иркутский бассейн и угольные месторождения Предбайкалья). – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2002. – 488 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/15173> (дата обращения 02.08.2021).
9. Редкие и рассеянные элементы в углях Забайкалья / Г.П. Сидорова, А.А. Якимов, Н.В. Овчаренко, Т.О. Гущина // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. – 2019. – Т. 25. – № 2. – С. 26–33.
10. Микроэлементы в углях Восточной Сибири / Н.Г. Вязова, Л.П. Шаулина А.Ф. Шмидт, Л.М. Димова // Химия твердого топлива. – 2016. – № 5. – С. 45–55. DOI: 10.7868/S0023117716050091.
11. Schobert H. Introduction to low-rank coals // Low-Rank Coals for Power Generation, Fuel and Chemical Production. – 2017. – P. 3–21. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00001-2> (дата обращения 31.08.2021).
12. Pawlak-Kruczek H. Properties of low rank coals and resulting challenges in their utilization // Low-Rank Coals for Power Generation, Fuel and Chemical Production. – 2017. – P. 23–40. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00002-4> (дата обращения 31.08.2021).
13. Перспективы использования малых угольных разрезов Республики Бурятия / М.В. Куклина, Т.А. Баяскаланова, В.Н. Богданов, Н.Г. Уразова // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 4. – С. 98–103. URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42125> (дата обращения 23.08.2021).
14. Н.Г. Вязова, А.Г. Пройдаков, Л.П. Шаулина, А.Ф. Шмидт. Использование молодых бурых углей Хандинского месторождения Иркутской области // Химия твердого топлива. – 2019. – № 3. – С. 3–8. URL: <http://doi.org/10.1134/S0023117719030113> (дата обращения 23.08.2021).
15. Таразанов И.Г., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2019 года // Уголь. – 2020. – № 3. – С. 54–69. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-3-54-69.
16. Lagerev A., Khanaeva V., Smirnov K. A comprehensive assessment of comparative effectiveness of projects for power export from East Siberia to China: a methodological approach and

- results of its application // E3S Web of Conferences. – 2018. – V. 27. URL: <http://doi.org/10.1051/e3sconf/20182702003> (дата обращения 23.08.2021).
17. Selective sequential recovery of zinc and copper from acid mine drainage / H. Passos, B. Cruz, N. Schaeffer, C. Patinha, E.F. da Silva, A.P. João Coutinho // ACS Sustainable Chemistry & Engineering – 2021. – V. 9. – P. 3647–3657. URL: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c07549> (дата обращения 23.08.2021).
18. Influence of the anionic zinc-adeninate metal–organic framework structure on the luminescent detection of rare earth ions in aqueous streams / S.E. Crawford, J.E. Ellis, P.R. Ohodnicki, J.P. Baltrus // ACS Applied Materials & Interfaces – 2021. – V. 13 (6). – P. 7268–7277. URL: <https://doi.org/10.1021/acsmi.0c20990> (дата обращения 23.08.2021).
19. Techno-economic and life cycle assessments for sustainable rare earth recovery from coal byproducts using biosorption / M. Alipanah, D.M. Park, A. Middleton, Z. Dong, H. Hsu-Kim, Y. Jiao, H. Jin // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2020. – V. 8 (49). – P. 17914–17922. URL: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04415> (дата обращения 23.08.2021).
20. Filippov S.P. New technological revolution and energy requirements // Foresight and STI Governance. – 2018. – V. 12. – № 4. – P. 20–33. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.20.33.
21. High-efficiency pulverized coal power generation using low-rank coals / M. Agraniotis, C. Bergins, M. Stein-Cichoszewska, E. Kakaras // Low-Rank Coals for Power Generation, Fuel and Chemical Production. – 2017. – P. 95–124. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00005-X>.
22. Application of the technology of combustion of solid fuels in a circulating fluidized bed / G.A. Ryabov, E.V. Antonenko, I.V. Krutitskii, O.M. Folomeev, A.V. Belyaev // Power Technology and Engineering. – 2018. – V. 52 (3). – P. 308–313. DOI: 10.1007/s10749-018-0950-0.
23. Katalambula H., Gupta R. Low-grade coals: a review of some prospective upgrading technologies // Energy Fuels. – 2009. – V. 23 (7). – P. 3392–3405. DOI: 10.1021/ef801140t.
24. Алгоритм оптимального выбора наилучших доступных технологий для Российских ТЭС / П.В. Росляков, О.Е. Кондратьева, А.Н. Головтеева, А.М. Сиваковский // Теплоэнергетика. – 2019. – № 4. – С. 60–72. URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S0040363619040064> (дата обращения 23.08.2021).
25. Филиппов С.П., Дильман М.Д., Илюшин П.В. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов // Теплоэнергетика. – 2019. – № 12. – С. 4–17. URL: <http://doi.org/10.1134/S0040363619120038> (дата обращения 23.08.2021).
26. Афанасьев А.А. Уголь VS газ в электроэнергетике (обзор состояния и перспективы) // Энергия: экономика, техника, экология. – 2018. – № 9. – С. 2–10. URL: <http://doi.org/10.31857/S023336190001701-7> (дата обращения 23.08.2021).
27. Новак А.В. Угольная промышленность России: история на века // Энергетическая политика. – 2020. URL: <https://energypolicy.ru/a-novak-ugolnaya-promyshlennost-ross/business/2020/13/17/> (дата обращения 02.06.2021).
28. Тумановский Ф.Г. Перспективы развития угольных ТЭС России // Теплоэнергетика. – 2017. – № 6. – С. 3–13. URL: <http://doi.org/10.1134/S004036361706008X> (дата обращения 02.06.2021).
29. Pyrolysis characteristics of low-rank coal under a CO-containing atmosphere and properties of the prepared coal chars / Cheng Ma, Chong Zou, Junxue Zhao, Ruimeng Shi, Xiaoming Li, Jiangyong He, Xiaorui Zhang // Energy & Fuels. – 2019. – V. 33 (7). – P. 6098–6112. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00860> (дата обращения 02.06.2021).
30. Influence of the hydrothermal dewatering on the combustion characteristics of Chinese low-rank coals / Lichao Ge, Yanwei Zhang, Chang Xu, Zhihua Wang, Junhu Zhou, Kefa Cen // Applied Thermal Engineering. – 2015. – V. 90. – P. 174–181. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.015> (дата обращения 02.06.2021).
31. Mills S. Low quality coals – key commercial, environmental and plant considerations // IEA Clean Coal Centre. – 2016. URL: <https://usea.org/sites/default/files/Low%20quality%20coals%20-%20key%20commercial%2C%20environmental%20and%20plant%20considerations%20-ccc270.pdf> (дата обращения 02.08.2021).
32. Ioannis V., Panagiotis D., Nikolaos N. Critical review of current industrial scale lignite drying technologies. Low-Rank Coals for Power Generation // Fuel and Chemical Production. – 2017. – P. 41–71. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00003-6> (дата обращения 02.06.2021).
33. Использование органических топливных добавок для повышения эффективности сжигания угля / В.Е. Мессерле, Г. Паскалов, К.А., Умбеткалиев А.Б. Устименко // Теплоэнергетика. – 2020. – № 2. – С. 46–53. DOI: 10.1134/S004036362002004
34. Analysis of heat rate improvement potential at coal-fired power plants // U.S. Energy Information Administration. 2015. URL: https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/heatrate/pdf/heat_rate.pdf (дата обращения 05.10.2021).
35. Сомова Е.В., Тугов А.Н., Тумановский А.Г. Обзор зарубежных конструкций энергетических котлов на суперсверхкритические параметры пара и перспективы создания энергоблоков ССКП в России // Теплоэнергетика. – 2021. – № 6. – С. 6–24. DOI: 10.1134/S00403636210600
36. Technology pathways in decarbonisation scenarios / A. de Vita, I. Kielichowska, P. Mandatova, P. Capros, E. Dimopoulou, S. Evangelopoulou, T. Fotiou, M. Kannavou, P. Siskos, G. Zazias, L. de Vos, A. Dadkhan, G. Dekelver // Asset. – 2018. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2018_06_27_technology_pathways_-_finalreportmain2.pdf (дата обращения 11.10.2021).

Поступила 17.11.2021 г.

Информация об авторах

Такайшвили Л.Н., кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела комплексных и региональных проблем энергетики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

Агафонов Г.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела комплексных и региональных проблем энергетики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

UDC 620.91 (571.53) "312/313"

TRENDS AND PROSPECTS FOR USING ENERGY COALS OF EASTERN SIBERIA

Ludmila N. Takaishvili¹,
luci@isem.irk.ruGleb V. Agafonov¹,
gleb@isem.irk.ru¹ Melentiev Energy System Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to study the reserves of thermal coal in Eastern Siberia to identify predictive criteria for their use.

The main aim of the research is to assess the available resources of thermal coals in the region while allocating resources of low-quality and local coals and the prospects and restrictions for their use for energy needs.

Objects: coal deposits, balance reserves, local coals, supply trends and prospects for the use of coals from Eastern Siberia, projects for the construction of energy facilities on coal.

Methods: methods of system analysis: classification, structuring and restructuring, analysis, formalization and concretization.

Results. The place of coals of Eastern Siberia in the structure of fuel consumption in Russia is shown. An assessment of the resources of low-quality and local coals and the possibilities of their use for energy needs has been made. Analysis of trends in the consumption of thermal coal in Eastern Siberia showed a slight increase in supplies to power plants with relatively stable supplies to other consumers. At the same time, about 30 % of the total volume of fuel supplies to power plants is supplied outside Eastern Siberia. The potential level of coal resources available in the future for the needs of the energy sector was calculated. It is about 400 million tons/year. The demand for resources for the energy sector, both at present and in the future, is significantly lower than the mining opportunities. In the future, the most demanded direction for the use of coal will remain energy, mainly thermal power plants. The region of Eastern Siberia belongs to infrastructure-rarefied systems, and when analyzing the balance reserves of steam coal, a category of local ones was identified. Their feature is their remoteness from settlements and transport communications. The assessment of the prospects for the involvement of local coals in the economic turnover was carried out. The use of local and low-grade coals is only possible in boiler houses and small thermal power plants, where competition with other types of fuel, including imported coal, is minimal. According to the authors' calculations, the possible supply corridor for East Siberian coal is determined by the variant of economic development. The lower limit, compared to the level of 2019, corresponds to a slight increase in supplies, and the upper one – more than twofold, only due to the commissioning of thermal power plants for the export of electricity. Estimated volumes of coal consumption by export CHPPs can range from 35 to 50 million tons. The region's thermal coal production potential significantly exceeds the demand for the upper limit of the possible supply corridor. The results of the analysis of the thermal coal resources of Eastern Siberia show their reliability in the long term as a source of fuel for thermal power plants and for the needs of coal chemistry.

Key words:

Power-generating coal, balance reserves, Eastern Siberia, consumption, production, development of coal mining, projects, reserves-to-production ratio, tendencies.

The research was carried out within the scientific project XI.174.2 of the program of fundamental researches SB RAS, reg. AAAA-A21-121012090010-7.

REFERENCES

1. Fauzer V.V., Lytkina T.S., Smirnov A.V. Differentiation of the Arctic territories by the degree of population and economic development. *Arctic: ecology and economics*, 2017, vol. 28, no. 4, pp. 18–31. In Rus. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-18-31.
2. *BP Energy Outlook – 2020 edition*. Available at: <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/bp-energy-outlook-2020.pdf> (accessed 2 August 2021).
3. *Sistemnye issledovaniya v energetike: retrospektiva nauchnykh napravleniy Sibirskogo energeticheskogo instituta – Instituta sistem energetiki im. L.A. Melenteva* [Systems research in the energy sector: retrospective scientific directions of Siberian energy institute – Melentiev energy systems institute]. Ed. by N.I. Voropai. Novosibirsk, Nauka Publ., 2010. 686 p.
4. *Gosudarstvenny balans zapasov poleznykh iskopaemykh Rossiyskoy Federatsii na 1 yanvarya 2019 goda. Vyp. 91. Ugol. Tom VII. Sibirsky federalny okrug. Ch. 2* [State balance of mineral reserves of the Russian Federation as of January 1, 2019. Iss. 91. Coal. Vol. VII. Siberian Federal District. P. 2]. Moscow, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, Federal Agency for Subsoil Use, Russian Federal Geological Fund, 2019. 314 p. Available at: <https://rfgf.ru/info-resursy/raboty-po-izucheniyu-nedr> (accessed 26 August 2021).
5. *Gosudarstvenny balans zapasov poleznykh iskopaemykh Rossiyskoy Federatsii na 1 yanvarya 2019 goda. Vyp. 91. Ugol. Tom VIII. Dalnevostochny federalny okrug* [State balance of mineral reserves of the Russian Federation as of January 1, 2019. Iss. 91. Coal. Vol. VIII. Far Eastern Federal District]. Moscow, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, Federal Agency for Subsoil Use, Russian Federal Geological Fund, 2019. 412 p. Available at: <https://rfgf.ru/info-resursy/raboty-po-izucheniyu-nedr> (accessed 26 August 2021).
6. *Prognoznye resursy tverdykh i tverdykh goryuchikh (ugol) poleznykh iskopaemykh Rossiyskoy Federatsii na 1 yanvarya 2019 goda* [Inferred resources of solid and solid combustible (coal) minerals of the Russian Federation as of January 1, 2019]. Moscow, Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, Federal Agency for Subsoil Use, Russian Federal Geological Fund, 2019. 80 p. Available at: <https://rfgf.ru/info-resursy/raboty-po-izucheniyu-nedr> (accessed 26 August 2021).
7. *Statisticheskie i analiticheskie informatsionnye materialy po osnovnym pokazatelyam proizvodstvennoy deyatelnosti organizatsiy uglonoy otrasli Rossii* [Statistical and analytical information materials on the main indicators of the production activities of organizations in the coal industry in Russia]. Moscow, CDU Fuel and energy complex. Available at: <http://www.cdu.ru> (accessed 6 August 2021).

8. Bykadorov V.S., Cherepovskiy V.F. *Ugolnaya baza Rossii. Tom III. Ugolnye basseyny i mestorozhdeniya Vostochnoy Sibiri, Yuzhnaya chast (Krasnoyarskiy kray, Kansk-Achinskiy basseyn; Respublika Khakasiya, Minusinskiy basseyn; Respublika Tyva, Ulugkhemskiy basseyn; Irkutskaya oblast, Irkutskiy basseyn i ugolnye mestorozhdeniya Predbaykalya)* [Coal base of Russia. Vol. III. Coal basins and deposits of Eastern Siberia Southern part (Krasnoyarsk Territory, Kansk-Achinsk Basin; Republic of Khakassia, Minusinsk Basin; Republic of Tyva, Ulughem Basin; Irkutsk Region, Irkutsk Basin and Coal Deposits of Cisbaikalia)]. Moscow, ZAO «Geoinformmark» Publ., 2002. 488 p. Available at: <https://www.geokniga.org/books/15173> (accessed 2 August 2021).
9. Sidorova G.P., Yakimov A.A., Ovcharenko N.V., Gushchina T.O. Rare and scattered elements in the coals of Transbaikalia. *Vestn. Zabajkal. gos. un-ta.*, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 26–33. In Rus.
10. Vyazova N.G., Shaulina L.P., Shmidt A.F., Dimova L.M. Trace elements in the coals of Eastern Siberia. *Khimiya tverdogo topliva*, 2016, no. 5, pp. 45–55. In Rus. DOI: 10.7868/S0023117716050091.
11. Schobert H. Introduction to low-rank coals. Low-Rank Coals for Power Generation. *Fuel and Chemical Production*, 2017, pp. 3–21. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00001-2> (accessed 31 August 2021).
12. Pawlak-Kruczek H. Properties of low rank coals and resulting challenges in their utilization. Low-Rank Coals for Power Generation. *Fuel and Chemical Production*, 2017, pp. 23–40. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00002-4> (accessed 31 August 2021).
13. Kuklina M.V., Bayaskalanova T.A., Bogdanov V.N., Urazova N.G. Prospects for the use of small coal mines in the Republic of Buryatia. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2018, no. 4, pp. 98–103. In Rus. Available at: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42125> (accessed 23 August 2021).
14. Vyazova N.G., Proidakov A.G., Shaulina L.P., Shmidt A.F. Ispol'zovanie molodykh burykh ugley Khandinskogo mestorozhdeniya Irkutskoy oblasti [Use of young brown coals of the Khandinsky deposit of the Irkutsk region]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2019, no. 3, pp. 3–8. Available at: <http://doi.org/10.1134/S0023117719030113> (accessed 23 August 2021).
15. Tarazanov I.G., Gubanov D.A. Results of the work of the coal industry in Russia for January–December 2019. *Ugol*, 2020, no. 3, pp. 54–69. In Rus. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-3-54-69.
16. Lagerev A., Khanaeva V., Smirnov K.A. Comprehensive assessment of comparative effectiveness of projects for power export from East Siberia to China: a methodological approach and results of its application. *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 27. Available at: <http://doi.org/10.1051/e3sconf/20182702003> (accessed 23 August 2021).
17. Passos H., Cruz B., Schaeffer N., Patinha C., Ferreira da Silva E., João A.P., Coutinho. Selective sequential recovery of zinc and copper from acid mine drainage. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, vol. 9 (10), pp. 3647–3657. Available at: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c07549> (accessed 23 August 2021).
18. Crawford S.E., Ellis J.E., Ohodnicki P.R., Baltrus J.P. Influence of the anionic zinc-adeninate metal–organic framework structure on the luminescent detection of rare earth ions in aqueous streams. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, vol. 13 (6), pp. 7268–7277. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsmi.0c20990> (accessed 23 August 2021).
19. Alipanah M., Park D.M., Middleton A., Dong Z., Hsu-Kim H., Jiao Y., Jin H. Techno-economic and life cycle assessments for sustainable rare earth recovery from coal byproducts using bio-sorption. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, vol. 8 (49), pp. 17914–17922. Available at: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04415> (accessed 23 August 2021).
20. Filippov S.P. New technological revolution and energy requirements. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no. 4, pp. 20–33. In Rus. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.20.33.
21. Agraniotis M., Bergins C., Stein-Cichoszewska M., Kakaras E. High-efficiency pulverized coal power generation using low-rank coals. Low-Rank Coals for Power Generation. *Fuel and Chemical Production*, 2017, pp. 95–124. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00005-X> (accessed 23 August 2021).
22. Ryabov G.A., Antonenko E.V., Krutitskii I.V., Folomeev O.M., Belyaev A.V. Application of the technology of combustion of solid fuels in a circulating fluidized bed. *Power Technology and Engineering*, 2018, vol. 52 (3), pp. 308–313. DOI: 10.1007/s10749-018-0950-0.
23. Katalambula H., Gupta R. Low-grade coals: a review of some prospective upgrading technologies. *Energy Fuels*, 2009, vol. 23 (7), pp. 3392–3405. DOI: 10.1021/ef801140t.
24. Roslyakov P.V., Kondrateva O.E., Golovteeva A.N., Sivakovskii A.M. Algorithm of optimal selection of the best available technologies for Russian thermal power plants. *Teploenergetika*, 2019, no. 4, pp. 60–72. In Rus. DOI: 10.1134/S004036361904006
25. Filippov S.P., Dilman M.D., Ilyushin P.V. Distributed generation and sustainable development of regions. *Teploenergetika*, 2019, no. 12, pp. 4–17. In Rus. Available at: <http://doi.org/10.1134/S0040363619120038> (accessed 23 August 2021).
26. Afanasev A.A. Ugol vs gaz v elektroenergetike (obzor sostoyaniya i perspektivy) [VS coal gas in the power industry (overview of the state and prospects)]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2018, no. 9, pp. 2–10. Available at: <http://doi.org/10.31857/S023336190001701-7> (accessed 23 August 2021).
27. Novak A.V. Ugolnaya promyshlennost Rossii: istoriya na veka [The coal industry of Russia: a history for centuries]. *Energeticheskaya politika*, 2020. Available at: <https://energypolicy.ru/analiz-ugolnaya-promyshlennost-ross/business/2020/13/17/> (accessed 23 August 2021).
28. Tumanovskiy F.G. Prospects for the development of coal-fired TPPs in Russia. *Teploenergetika*, 2017, no. 6, pp. 3–13. In Rus. Available at: <http://doi.org/10.1134/S004036361706008X> (accessed 23 August 2021).
29. Cheng Ma, Chong Zou, Junxue Zhao, Ruimeng Shi, Xiaoming Li, Jiangyong He, Xiaorui Zhang. Pyrolysis characteristics of low-rank coal under a CO-containing atmosphere and properties of the prepared coal chars. *Energy & Fuels*, 2019, vol. 33 (7), pp. 6098–6112. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00860> (accessed 23 August 2021).
30. Lichao Ge, Yanwei Zhang, Chang Xu, Zhihua Wang, Junhu Zhou, Kefa Cen. Influence of the hydrothermal dewatering on the combustion characteristics of Chinese low-rank coals. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 90, pp. 174–181. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.015> (accessed 23 August 2021).
31. Mills S. Low quality coals – key commercial, environmental and plant considerations. *IEA Clean Coal Centre*, 2016. Available at: <https://usea.org/sites/default/files/Low%20quality%20coals%20-%20key%20commercial%2C%20environmental%20and%20plant%20considerations%20-ccc270.pdf> (accessed 2 August 2021).
32. Violidakis I., Drosatos P., Nikolopoulos N. Critical review of current industrial scale lignite drying technologies. Low-Rank Coals for Power Generation. *Fuel and Chemical Production*, 2017, pp. 41–71. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00003-6> (accessed 2 June 2021).
33. Messerle V.E., Paskalov G., Umbetkaliev K.A., Ustimenko A.B. The use of organic fuel additives to improve the efficiency of coal combustion. *Teploenergetika*, 2020, no. 2, pp. 46–53. In Rus. DOI: 10.1134/S004036362002004
34. *Analysis of heat rate improvement potential at coal-fired power plants. U.S. Energy Information Administration*. 2015. Available at: <https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/heatrate/pdf/heatrate.pdf> (accessed 5 October 2021).
35. Somova E.V., Tugov A.N., Tumanovskii A.G. Review of foreign designs of power boilers for super-supercritical steam parameters and prospects for the creation of power units in Russia. *Teploenergetika*, 2021, no. 6, pp. 6–24. In Rus. DOI: 10.1134/S00403636210600
36. De Vita A., Kielichowska I., Mandatova P., Capros P., Dimopoulou E., Evangelopoulou S., Fotiou T., Kannavou M., Siskos P., Zazias G., De Vos L., Dadkhan A., Dekelver G. Technology pathways in decarbonisation scenarios. *Asset*, 2018. Available at: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2018_06_27_technology_pathways_-_finalreportmain2.pdf (accessed 11 October 2021).

Received: 17 November 2021.

Information about the authors

Ludmila N. Takaishvili, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy System Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Gleb V. Agafonov, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy System Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.