

ОБЗОРЫ

УДК 553:662.74:663.18

**БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ:
НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ****Сарыглар Ч.А., Чысыма Р.Б.***Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл,
e-mail: chaiz_93@mail.ru, chysyma@mail.ru*

В представленном обзоре литературы рассмотрены основные направления биотехнологической переработки углей. Отмечается, что научные разработки биологической переработки углей ведутся в трех основных направлениях: биодесульфурация, биооживление (солубилизация) и биогазификация. Показано, что из существующих направлений наиболее изученной и освоенной является биодесульфурация. Процесс протекает при умеренных температурных и атмосферных режимах, не требует больших капитальных, энергетических и эксплуатационных расходов. Рассмотрена способность микроорганизмов различных таксономических групп в лабораторных условиях удалять неорганические и органические соединения серы в углях до 100% за относительно короткий промежуток времени. Биооживление протекает при активном участии микроорганизмов, в результате которого происходит превращение угля в суспендированное состояние и водорастворимые соединения. В результате биооживления угля микроорганизмами от него получают угольную продукцию с новыми физико-химическими и энергетическими свойствами. Анаэробная бактериальная обработка угля в процессе биогазификации позволяет извлекать из угля метан, высококачественные органические и минеральные удобрения и различные химические продукты. Представленные в данном обзоре научные разработки свидетельствуют о том, что в течение последних лет биотехнологические методы переработки углей интенсивно исследуются во многих странах мира, и показывает перспективность этого метода для промышленного использования.

Ключевые слова: уголь, биотехнология, десульфурация, биосолубилизация, биогазификация**BIOTECHNOLOGICAL METHOD OF COAL PROCESSING:
DIRECTIONS AND PROSPECTS****Saryglar Ch.A., Chysyma R.B.***Tuva Institute for the Integrated Development of Natural Resources Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences, Kyzyl, e-mail: chaiz_93@mail.ru; chysyma@mail.ru*

In the presented literature review, the main areas of biotechnological processing of coal are considered. It is noted that the scientific development of the biological processing of coal is carried out in three main areas: biodesulphurization, bio-fluidization (solubilization) and biogasification. It is shown that of the existing directions, the most studied and mastered is biodesulfurization. The process proceeds at moderate temperature and atmospheric conditions, doesn't require large capital, energy and operating costs. The ability of microorganisms of various taxonomic groups under laboratory conditions to remove inorganic and organic sulfur compounds in coals up to 100% in a relatively short period of time is considered. Bio-fluidization carried with the active participation of microorganisms, resulting in the conversion of coal into a suspended state and water-soluble compounds. As a result, of coal bio-fluidization by microorganisms receiving coal products with new physicochemical and energy properties. Anaerobic bacterial treatment of coal in the biogasification process allows the extraction of methane from coal, high-quality organic and mineral fertilizers and various chemical products. The scientific developments presented in this review indicate that in recent years biotechnological methods of coal processing have been intensively studied in many countries of the world, and shows the prospects of this method for commercial use.

Keywords: coal, biotechnology, desulfurization, biosolubilization, biogasification

По негативному воздействию на окружающую среду угольная промышленность занимает одно из ведущих мест среди отраслей топливно-энергетического комплекса, что обусловлено большим объемом потребления ископаемых углей [1]. В результате производственной деятельности ТЭК ежегодные выбросы в атмосферу от сжигания угля составляют в порядке 90 млн т оксидов серы и 30 млн т оксидов азота. Серьезной проблемой является относительно высокая доля CO₂, образующегося при сжигании угля, по сравнению с другими видами топлива [2].

В этой связи улучшение качества угля, его переработка с использованием экологически чистых и эффективных технологий является весьма актуальным. Перспективным направлением в повышении энергетических и экологических характеристик ископаемых углей и углеотходов является биотехнологический метод его переработки [3].

Преимущество биотехнологических методов переработки углей заключается в том, что процессы протекают при умеренных температурах и атмосферном давлении, применении минимального набора химических реагентов, недорогих и про-

стных установок, низкого потребления энергии и отсутствия отрицательного влияния на окружающую среду [4–5].

Цель статьи – представление краткого обзора по основным направлениям биотехнологической переработки углей.

Научные разработки биотехнологической переработки углей ведутся в трех основных направлениях: биодесульфуризация, биоожижение и биогазификация.

Биодесульфуризация. Сжигание угля связано с выбросом в атмосферу оксидов серы, образованием кислотных дождей и золы, что создает загрязнение окружающей среды и оказывает вредное воздействие на человека [6].

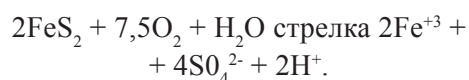
Кроме того, повышенное содержание серы в угле снижает его тепловые характеристики и, соответственно, стоимость. Поскольку при использовании значительно увеличиваются расходы топлива, а при коксовании – ухудшается качество кокса и увеличивается потребность в нем при выплавке чугуна [7].

Было предложено несколько методов снижения содержания серы в углях до и после сжигания, среди которых физические, химические и биологические. Физические и химические методы обессеривания углей требуют больших капитальных и эксплуатационных расходов, выполняются в более жестких условиях, связанных с большим количеством химических реагентов, высокой температурой, потреблением энергии и выделением значительного количества углекислого газа [8–9].

Одним из перспективных биотехнологических направлений в удалении примесей органической и неорганической серы из угля является биодесульфуризация.

Сера в угле встречается в двух формах: неорганической и органической серы. Значительная часть серы в угле представлена в виде неорганической серы. Наиболее важным компонентом неорганической серы в угле является пирит [10]. Несмотря на то, что элементарная и сульфатная сера также являются компонентами неорганической серы в угле, из-за невысокого содержания они, как правило, не учитываются при десульфуризации. В этой связи десульфурация в основном направлена на удаление пиритной и органической серы [11].

Механизм удаления серы, так же как извлечение металлов из сульфидных руд, можно представить общей реакцией:



Процесс сопровождается образованием кислоты, что обеспечивает поддержание низких значений pH, благоприятных для жизнедеятельности и окислительной активности ацидофильно хемолитотрофных бактерий [7]. В целом процесс десульфурации микроорганизмов состоит из окисления серы, расщепления углерод-углеродной связи или расщепления углерод-серной связи [12].

Для микробной десульфурации пиритной серы в углях часто рассматриваются, мезофильные, умеренно термофильные и термофильные ацидохемолитотрофные железо- и сероокисляющие бактерии (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, *Acidithiobacillus caldus*). Благодаря применению бактерий, почти вся неорганическая сера угля может быть удалена за относительно короткий промежуток времени [13].

Органическая сера, присутствующая в углях, интегрируется в структурную матрицу угля в виде тиоловых, сульфидных и тиофеновых соединений. Поэтому его удаление включает расщепление устойчивой ковалентной связи C-S. Роль микроорганизмов в окислении сложных органических соединений, в том числе дибензотиофена (DBT), активно изучается и рассматривается многими авторами [14–16].

Полное расщепление сложных органических соединений серы в углях, расщеплением C-S связи, осуществляют ограниченное число гетеротрофных бактерий и грибов: *Pseudomonas* sp, *Sulfolobus acidocaldarius*, *Rhodococcus erythropolis*, *Fusarium oxysporum* FE, *Exophiala spinifera* [17–20].

В течение последних лет микробное удаление серы интенсивно исследовалось во многих странах мира. По последним сообщениям в лабораторных условиях удается снизить содержание серы в угле путем микробиологического выщелачивания за 5 суток почти на 100%. Микробиологический способ десульфурации углей рассматривается как весьма перспективный для промышленного использования [21].

Биоожижение (солюбилизация) представляет неферментативное растворение угля, позволяющее переводить уголь в суспендированное состояние и водорастворимые продукты, с использованием микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности. Конечной целью биоожижения следует считать получение угольной продукции с новыми физико-химическими и энергетическими свойствами [22].

До настоящего времени точный механизм биосольюбилизации, из-за сложной структуры угля, все еще остается полностью не изученным [23]. По мнению M.J. Ghani, M.I. Rajoka, K. Akhtar [24], механизм разложения и растворения угля включает взаимодействие между углем, различных окисляющих и неокисляющих ферментов, хелатных соединений, щелочей и поверхностно-активных веществ.

Процесс биосольюбилизации более эффективен в отношении низкосортных углей, в связи их низкой топливной ценностью, они относительно легко подвергаются биологической обработке. В настоящее время были идентифицированы и описаны различные микроорганизмы, способные превращать жидкие соединения, полученные из угля, в полезные продукты. Микробные консорциумы, способные сжигать уголь, были найдены на угольных шахтах и отвалах, отстойниках и фильтрах нефтяных скважин, отложениях пресной и морской воды, в кишечнике жвачных животных и насекомых [25].

Об эффективности биосольюбилизации польского лигнита с участием бактерий *Gordonia alkanivorans* S7 и *Bacillus mycoides* NS1020 сообщается в работе I. Romanowska, B. Strzelecki, S. Bielecki [26], где, предварительная обработка угля азотной кислотой увеличивала эффективность процесса примерно на 89%.

В исследованиях О.И. Кляйн, Н.А. Куликовой, Е.В. Степановой и др. [27], выявлена способность базидиомицетов *Trametes hirsuta* и *T. maxima* в условиях жидкофазного культивирования сольюбилизировать бурый уголь. Определено, что базидиальные грибы *T. hirsuta* и *T. maxima* сольюбилизуют бурый уголь, за счет лигнолитического ферментного комплекса (Mn – пероксидаза и лигнин-пероксидаза).

X.X. Tao, H. Chen, K.Y. Shi отмечают [28] способность грибов TZ1, выделенных из почвы угольной шахты Фушуньси (Китай) при биосольюбилизации лигнита. При этом уровень биоконверсии лигнита составил около 23,3%. Морфо-биологическим и молекулярно-генетическим анализом установлено, 100% сходство выделенного гриба, под условным названием TZ1, с *Hypocrea lixii*.

Эффективность бактерии *Bacillus* sp. Y7, при сольюбилизации необработанного китайского лигнита отмечена в работе F. Jiang, Z. Li, Z. Lv и др. [29]. По результатам исследований установлено, что лигнин-растворяющая способность *Bacillus* sp. Y7 за-

висит от уровня кислотности среды (pH). Анализ, внеклеточных образований *Bacillus* sp. Y7, позволил говорить об основной роли термостабильных внеклеточных щелочных структур, продуцируемых данной бактерией в сольюбилизации лигнита. В результате исследований за 12 дней растворилось более 36,77% лигнита. Эти примеры свидетельствуют о том, что не только грибы, но и бактерии эффективно растворяют бурый уголь.

В исследовании M.E. Silva-Stenico, C.J. Vengadajellum, H.A. Janjua и др. [30], сообщается о способности нового изолята грибов *Trichoderma atroviride* разлагать около 82% угля в течение 21 дней и о возможном участии некоторых внутриклеточных ферментов в сольюбилизации угля.

Анализ исследований по биоожигению угля указывает на способность различных видов бактерий и грибов изменять структуру угля, при этом более высокая степень биоожигения угля характерна для грибковых микроорганизмов.

Биогазификация. Анаэробная бактериальная обработка угля в процессе биогазификации приводит не только к получению метана, также образованию химических продуктов, высококачественных органических и минеральных удобрений. В последнее время биодegradация угля микробами в направлении образования метана стала актуальной, поскольку этот процесс не только улучшает выход метана из угольных пластов, также снижает экологическую опасность добычи угля [31].

Процесс анаэробной биоконверсии угля с получением метана проходит через три последовательных стадии: гидролиз, ацетогенез и метанообразование. За каждую стадию отвечает строго определенная группа микроорганизмов (гидролитические и ферментативные бактерии, ацетогенные бактерии и метаногенные археи) [32].

В обобщающем обзоре И.П. Иванова [22], наряду с биоожигением и биодесульфурацией, рассмотрены биотехнологические способы извлечения метана из угольных пластов. В работе A. Gupta, K. Birendra [33] выявлена возможность получения метана из угля, при их обработке смешанными анаэробными микроорганизмами, выделенными из различных источников, а также эффективность микроорганизмов, присутствующих в почве рисовых полей, в получении метана из угля.

В процессе экспериментальных исследований биоконверсии антрацита и бу-

рого угля М.Д. Молевым, И.А. Заниной, Н.И. Стуженко [34] был обоснован выбор анаэробных метаногенных ассоциаций микроорганизмов, которые эффективно осуществляют преобразование угольных отходов в биогаз. В результате опытных работ были выбраны следующие культуры: *Clostridium thamoicellum* + *Methanobacterium thermoformicium*; *Ps. aeruginosa* + *B. megaterium* + *M. Omelianskii* + *Ms. Methanica*, а также анаэробный консорциум. При биоконверсии антрацита указанными культурами и анаэробным консорциумом, максимальная концентрация метана достигала 25%, а предварительная обработка бурого угля культурой гриба *Asp. niger* перед метанизацией этими же культурами, дало возможность поднять выход чистого метана до 65%. При этом производительность по метану для бурого угля составила 0,337 м³/т сут; для антрацита – 0,586 м³/т сут. Степень биоконверсии органической составляющей угольных отходов изменяется от 3,27 до 10,22% (при утилизации антрацита) и от 4,89 до 12,2% (в случае бурого угля).

В работе А. Орага, D.J. Adams, M.L. Free и др. [35] представлены результаты получения метана из отходов битуминозного угля, лигнита и битуминозных угольных материалов. После 30-дневного воздействия бактерий, при температуре 23 °С метан, полученный из угольных отходов, по своим показателям был аналогичен метану, полученному из угля. Результаты этих исследований показывают возможности использования угольных отходов в качестве органического субстрата для получения метана.

Авторами С.И. Шумковым, Ю.Н. Малышевым, С.Е. Тереховой и др. [36] предложена новая технология бесшахтной разработки месторождения энергетических углей, с использованием анаэробных бактерий. Преимуществом предложенной технологии является отсутствие в ней горных работ по добыче угля. Вместо этого, после откачки воды и газа из неразгруженного пласта предусматривается доставка по той же сетке скважин анаэробной биокультуры, а затем извлечение продуцированного микроорганизмами биогаза и водоугольной суспензии для дальнейшей переработки в тепловую и электрическую энергии.

Биогазификация угля в термофильном биореакторе с разделением стадий сольюбилизации и метаногенеза в аэробно-анаэробных условиях позволяет повысить выход биогаза по сравнению с мезофильным

процессом. При этом наблюдается полная потеря первичного распределения частиц исходного угля. Элементный анализ угля, проведенный после биоконверсии, в термофильном режиме, показал уменьшение содержания углерода, водорода и пиритной серы [37].

Заключение

В течение последних лет биотехнологические методы переработки углей интенсивно исследовались во многих странах мира. Преимущество биотехнологических методов переработки углей заключается, прежде всего, в их ресурсо и энергоэффективности и отсутствии отрицательного влияния на окружающую среду. В настоящее время научные разработки биологической переработки углей ведутся в трех основных направлениях: биодесульфурация, биоожигение (сольюбилизация) и биогазификация. Из существующих направлений наиболее изученной и освоенной является биодесульфурация. Способностью удалять неорганические и органические соединения серы в углях обладают микроорганизмы различных таксономических групп. В лабораторных условиях, с помощью микроорганизмов удается обессеривать до 100% угольной серы за относительно короткий промежуток времени. Биоожигение представляет собой процесс перевода углей в суспендированное состояние и водорастворимые соединения, протекающее с участием микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности, в результате, которого получается угольная продукция с новыми физико-химическими свойствами. Анаэробная бактериальная обработка угля в процессе биогазификации позволяет извлекать из угля метан, высококачественные органические и минеральные удобрения и различные химические продукты. Анализ исследований по биотехнологическим методам переработки углей позволяет говорить о перспективности этих методов для промышленного использования. При этом главным звеном биотехнологического процесса выступает сообщество микроорганизмов, способное осуществлять определенную модификацию исходного углеводородного сырья (бурые и каменные угли) и образовывать ценные продукты.

Список литературы / References

1. Ершова О.В. К проблеме улучшения экологической обстановки в районах углепользования // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12–1. С. 19–22.

- Ershova O.V. On the problem of improving the environmental situation in the areas of coal use // *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016. № 12–1. P. 19–22 (in Russian).
2. Пашкевич Н.В., Мартемьянова А.Н. Оценка экономической эффективности развития угольной энергетики с учетом экономического фактора // *Записки Горного института*. 2011. Т. 191. С. 152–157.
- Pashkevich N.V., Martemyanova A.N. Evaluation of the economic efficiency of the development of coal energy, taking into account the economic factor // *Zapiski Gornogo instituta*. 2011. V. 191. P. 152–157 (in Russian).
3. Иванов И.П., Иванова Д.И., Баранова М.П., Михайленко С.А. Перспективы биоугольных технологий в энергетике // *Сборник докладов Первого международного научно-технического конгресса «Энергетика в глобальном мире»* 16–18 июня. Красноярск, 2010. С. 391–392.
- Ivanov I.P., Ivanova D.I., Baranova M.P., Mikhailenko S.A. Prospects for bio-coal technologies in the energy sector // *Sbornik докладov Pervogo mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa «Energetika v global'nom mire»* 16–18 iyunya. Krasnoyarsk, 2010. P. 391–392 (in Russian).
4. Ye J., Zhang P., Wang S., Nabi M., Zhang Q., Zhang H. Biodesulfurization of high sulfur fat coal with indigenous and exotic microorganisms. *Journal of cleaner production*. 2018. vol. 197. P. 562–570. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.223.
5. Иванов И.П., Теремова М.И., Еремина А.О., Головина В.В., Фетисова О.Ю., Скворцова Г.П., Чесноков Н.В., Кузнецов Б.Н. Аэробная переработка бурого угля штаммом *Acinetobacter calcoaceticus* // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия*. 2014. Т. 7. № 2. С. 209–220.
- Ivanov I.P., Teremova M.I., Eremina A.O., Golovina V.V., Fetisova O.Yu., Skvortsova G.P., Chesnokov N.V., Kuznetsov B.N. Aerobic processing of brown coal by the strain *Acinetobacter calcoaceticus* // *Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry*. 2014. Vol. 7. № 2. P. 209–220 (in Russian).
6. Nuhu A.A. Bio-catalytic desulfurization of fossil fuels: a mini review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2013. vol.12. № 1. P. 9–23. DOI: 10.1007/s11157-012-9267-x.
7. Блайда И.А., Васильева Т.В. Бактериальная десульфурация углей // *Микробиология и биотехнология*. 2017. № 3. С. 6–23. DOI: 10.18524/2307-4663.2017.3(39).110877.
- Blyda I.A., Vasilieva T.V. Bacterial desulfurization of coal // *Microbiology and Biotechnology*. 2017. № 3. P. 6–23 (in Russian).
8. Zhou Y., Hu Y., Gong X., Wang Z., Zhang S., Wang M. Intensified hydrogen production and desulfurization at elevated temperature and pressure during coal electrolysis. *Electrochimica Acta*. 2018. vol. 284. P. 560–568. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.07.204.
9. Celik P.A., Aksoy D.O., Koca S., Koca H., Cabuk A. The approach of biodesulfurization for clean coal technologies: a review. *International journal of environmental science and technology*. 2019. vol. 16. № 4. P. 2115–2132. DOI: 10.1007/s13762-019-02232-7.
10. Duan P., Wang W., Liu X., Qian F., Sang S., Xu S. Distribution of As, Hg and other trace elements in different size and density fractions of the Reshuihe high-sulfur coal, Yunnan Province, China. *International Journal of Coal Geology*. 2017. vol. 173. P. 129–141. DOI: 10.1016/j.coal.2017.02.013.
11. Demir U. Characterization and Desulfurization Possibilities of High Sulfur Gediz-Turkey Coal. *Combustion*. 2017. vol. 1. P. 31–38. DOI:10.17265/2162-5298/2017.01.004.
12. Liu T., Hou J., Peng Y. Effect of a newly isolated native bacteria, *Pseudomonas* sp. NP22 on desulfurization of the low-rank lignite. *International Journal of Mineral Processing*. 2017. Vol. 162. P. 6–11. DOI:10.1016/j.minpro.2017.02.014.
13. Nazari F., Kefayati M.E., Raheb J. The study of biological technologies for the removal of sulfur compounds. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*. 2017. Vol. 28. № 3. P. 205–219.
14. Karavaiko G.I., Lobyreva L.B. An overview of the bacteria and archaea involved in removal of inorganic and organic sulfur compounds from coal. *Fuel processing technology*. 1994. vol. 40. № 2–3. P. 167–182.
15. Singh A.L., Singh A.L. Desulfurization and demineralization of coal with bacteria: An ecofriendly concept for clean coal energy. Recent trends in *Microbial Biotechnology*, Lambert Academic Publishing Edited by Vivek Bajpai. 2010. P. 215–231.
16. Jatoi A.S., Aziz S., Soomro S.A. Biological Removal of Sulfur from Coal through Use of Microorganism. A Review. 4th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development. 2016. [Electronic resource]. URL: [http://eesd.muett.edu.pk/proceedings\(EESD_2016_320\)\(date of access: 18.11.2019\)](http://eesd.muett.edu.pk/proceedings(EESD_2016_320)(date of access: 18.11.2019)).
17. Wang J., Butler R.R III., Wu F., Pomberet J-F., Killbane J.J II., Stark B.C. Enhancement of microbial biodesulfurization via genetic engineering and adaptive evolution. *PLoS one*. 2017. vol. 12. № 1. P. e0168833. DOI: 10.1371/journal.pone.0168833.
18. Martinez I., Santos V.E., Alcon A., Garcia-Ochoa F. Enhancement of the biodesulfurization capacity of *Pseudomonas putida* CECT5279 by co-substrate addition. *Process Biochemistry*. 2015. vol. 50. № 1. P. 119–124. DOI:10.1016/j.procbio.2014.11.001.
19. Etemadifar Z., Etemadzadeh S.S., Emtiazi G.A novel approach for bioleaching of sulfur, iron, and silica impurities from coal by growing and resting cells of *Rhodococcus* spp. *Geomicrobiology journal*. 2019. vol. 36. № 2. P. 123–129. DOI: 10.1080/01490451.2018.1514441.
20. Etemadzadeh S.S., Emtiazi G., Etemadifar Z. Heterotrophic bioleaching of sulfur, iron, and silicon impurities from coal by *Fusarium oxysporum* FE and *Exophiala spinifera* FM with growing and resting cells. *Current microbiology*. 2016. vol. 72. № 6. P. 707–715. DOI: 10.1007/s00284-016-1008-x.
21. Биоготехнология обессеривания углей. [Электронный ресурс]. URL: <http://biolobo.ru/promishlennaya-biotehnologiya.html?page=13> (дата обращения: 18.11.2019).
- Biogotechnology for desulfurization of coal [Electronic resource]. URL: <http://biolobo.ru/promishlennaya-biotehnologiya.html?page=13> (date of access: 18.11.2019) (in Russian).
22. Иванов И.П. Основные направления биотехнологической обработки углей (обзор) // *Химия твердого топлива*. 2007. № 1. С. 5–13.
- Ivanov I.P. Main trends in the biotechnological processing of coals: A review. *Chemistry of solid fuels*. 2007. V. 41. № 1. P. 3–10. DOI: 10.3103/S0361521907010028.
23. Kulikova N.A., Stepanova E.V., Koroleva O.V. Mitigating activity of humic substances: direct influence on biota. Use of humic substances to remediate polluted environments: from theory to practice. Springer. Dordrecht. 2005. vol. 52. P. 285–309. DOI: 10.1007/1-4020-3252-8_14.
24. Ghani M.J., Rajoka M.I., Akhtar K. Investigations in fungal solubilization of coal: Mechanisms and significance. *Biotechnology and bioprocess engineering*. 2015. vol. 20. № 4. P. 634–642. DOI: 10.1007/s12257-015-0162-5.
25. Gupta A., Birendra K. Biogasification of coal using different sources of microorganisms. *Fuel*. 2000. vol. 79. № 1. P. 103–105. DOI: 10.1016/S0016-2361(99)00097-6.
26. Romanowska I., Strzelecki B., Bielecki S. Biosolubilization of Polish brown coal by *Gordonia alkanivorans* S7 and *Bacillus mycoides* NS1020. *Fuel processing technology*. 2015. vol. 131. P. 430–436. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.12.019.
27. Кляйн О.И., Куликова Н.А., Степанова Е.В., Филиппова О.И., Федорова Т.В., Малошенок Л.Г., Филимонов И.С., Королёва О.В. Получение и характеристика биологически активных продуктов солибилизации бурого угля базидиальными грибами белой гнили // *Биотехнология*. 2013. Т. 29. № 4. С. 65–73.
- Klein O.I., Kulikova N.A., Stepanova E.V., Fedorova T.V., Maloshenok L.G., Koroleva O.V., Filippova O.I., Filimonov I.S. Preparation and characterization of bioactive products obtained via the solubilization of brown coal by white rot fungi. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2014. V. 50. № 7. P. 730–736. DOI: 10.1134/S0003683814070035.

28. Tao X.X., Chen H., Shi K.Y., Lv Z.P. Identification and biological characteristics of a newly isolated fungus *Hypocrea lixii* and its role in lignite bioconversion. *African Journal of Microbiology Research*. 2010. vol. 4. № 17. P. 1842–1847.
29. Jiang F., Li Z., Lv Z., Gao T., Yang J., Qin Z., Yuan H. The biosolubilization of lignite by *Bacillus* sp. Y7 and characterization of the soluble products. *Fuel*. 2013. vol. 103. P. 639–645. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.08.030.
30. Silva-Stenico M.E., Vengadajellum C.J., Janjua H.A., Harrison S.T., Burton S.G., Cowan D.A. Degradation of low rank coal by *Trichoderma atroviride* ES11. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*. 2007. vol. 34. № 9. P. 633. DOI: 10.1007/s10295-007-0242-4.
31. Bao Y., Huang H., He D., Ju Y., Qi Y. Microbial enhancing coal-bed methane generation potential, constraints and mechanism—a mini-review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. vol. 35. P. 68–78. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.08.035.
32. Park S.Y., Yanna L. Biogenic methane production from coal: a review on recent research and development on microbially enhanced coalbed methane (MECBM). *Fuel*. 2016. vol. 166. P. 258–267. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.10.121.
33. Gupta A., Birendra K. Biogasification of coal using different sources of microorganisms. *Fuel*. 2000. vol. 79. № 1. P. 103–105. DOI: 10.1016/S0016-2361(99)00097-6.
34. Молев М.Д., Занина И.А., Стуженко Н.И. Современные подходы к утилизации техногенных отходов с использованием микробной биоконверсии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 3. С. 155–160.
- Molev M.D., Zanina I.A., Stuzhenko N.I. Current approaches to utilization of industrial wastes using microbial bioconversion // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal). 2017. № 3. P. 155–160 (in Russian).
35. Opara A., Adams D.J., Free M. L., McLennan J., Hamilton J. Microbial production of methane and carbon dioxide from lignite, bituminous coal, and coal waste materials. *International Journal of Coal Geology*. 2012. vol. 96. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.coal.2012.02.010.
36. Шумков С.И., Малышев Ю.Н., Терехова С.Е., Лауринавичюс К.С. Способ переработки угля // Патент 2139426 E21B 43/295.C12N 1/20. опубл. БИ. 1999. № 28.
- Shumkov S.I., Malyshev Yu.N., Terekhova S.E., Laurinavichyus K.S. A method of processing coal // Patent 2139426 EBB 43 / 295.C12N 1/20. publ. BI. 1999. № 28. (in Russian).
37. Shumkov S.I., Laurinavichius K.S., Terekhova S.E. Coal biogasification in combined thermophilic aerobic-anaerobic bioreactor. «Prospects for Coal Science in 21th Century». 1999. September. Shanxi Science. Technology Press. China, 1999. P. 1215–1218.