



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-05-116>

УДК 622

**Оценка целесообразности переработки золошлаковых отвалов
Магаданской теплоэлектроцентрали**Л. В. Шипунов¹ , М. А. Кузьменков¹ , Н. К. Гайдай^{1,2} ¹ Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация² Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило
Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Магадан, Российская Федерация nataly_mag@rambler.ru**Аннотация**

Комплексная переработка золошлаковых отходов является одним из поддерживаемых направлений развития экологичности и эффективности производства энергетики. Рациональное использование их в массовом производстве в настоящее время реализовано в области строительства. Развитие современных технологий обогащения позволяет ставить вопрос о получении из золошлаковых отходов различных полезных компонентов. Цель данного исследования – изучение возможности применения энергоэффективного обогащения золы с целью производства тяжелой металлосодержащей фракции и отделения магнитной фракции. Для оценки возможности обогащения золы и ее рационального использования была исследована техническая документация золошлаковых отвалов ПАО «Магаданэнерго» и проведены полуколичественные анализы отобранных проб с золошлакового отвала. Полученные данные по содержаниям полезных компонентов и количеству золошлаков позволили разработать комплексные обогатительные схемы с оценкой их технологической эффективности и произвести оценку потенциальной экономической эффективности. Объем металлов, планируемых к извлечению, по оценкам, составил: для Ti(me-1) – 785 т, для Sr(me-2) – 183 т и для Fe(me-3) – 4867 т. Рассчитаны технологические показатели обогащения и укрупненные значения экономических показателей для реализации данного проекта в промышленных масштабах. Экономическая целесообразность проекта по переработке золы в двух моделях из трех показывает хорошие значения в десятилетнем горизонте. Реализация проекта эффективна и с точки зрения улучшения экологической ситуации, т.к. позволяет вовлечь в переработку до 10 % всего объема золоотвалов, что на пятую часть выполняет требования Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года. Исследования золы Магаданской теплоэлектроцентрали (МТЭЦ) не являются новыми, но в рамках исследования комплексной переработки золы с целью получения различных полезных компонентов ранее работы не проводились.

Ключевые слова

зола, МТЭЦ, отходы, обогащение, пробы, экономическая эффективность, экология, Магадан

Для цитированияShipunov L. V., Kuzmenkov M. A., Gaidai N. K. Assessing viability of processing ash and slag dumps for energy-efficient ash beneficiation at Magadan CPP. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):12–20. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-05-116>

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

**Assessing viability of processing ash and slag dumps
for energy-efficient ash beneficiation at Magadan CPP**L. V. Shipunov¹ , M. A. Kuzmenkov¹ , N. K. Gaidai^{1,2} ¹ North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation² North-Eastern Integrated Research Institute named after N.A. Shilo of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Magadan, Russian Federation nataly_mag@rambler.ru**Abstract**

Complex processing of ash and slag waste is a supported directions for the development of environmental friendliness and performance in power engineering. The rational use of this waste in large-scale production processes has now been realized in the construction field. The development of up-to-date beneficiation



technologies raises the possibility of extracting various useful components from ash and slag wastes. This study aims to investigate the potential for using energy-efficient ash beneficiation to produce a heavy metal-containing fraction and separate the magnetic fraction. To assess the feasibility of ash beneficiation and its rational use, the technical documentation of ash and slag dumps of PJSC “Magadanenergo” was studied, and semi-quantitative analyses of samples collected from these dumps were carried out. The data on the content of useful components and quantities of ash and slag enabled us to develop complex beneficiation flow sheets, assess their process efficiency, and evaluate their potential financial viability. The estimated volume of metals to be recovered includes 785 tons of Ti (me-1), 183 tons of Sr (me-2), and 4,867 tons of Fe (me-3). The performance indicators of the beneficiation and aggregated values of economic indicators for this project implementation on an industrial scale were calculated. The economic feasibility of the ash processing project showed good values for two out of three models over a ten-year planning horizon. Implementing the project also effectively improves the environmental situation by potentially processing up to 10% of the total volume of ash dumps, fulfilling one-fifth of the Energy Strategy of the Russian Federation’s requirements until 2035. While investigations of ash from the Magadan Cogeneration Power Plant (MCPP) are not new, they were not previously carried out within the framework of studying integrated processing of ash to obtain various useful components.

Keywords

ash, Magadan Cogeneration Power Plant, waste, beneficiation, samples, cost efficiency, ecology, Magadan

For citation

Shipunov L. V., Kuzmenkov M. A., Gaidai N. K. Assessing viability of processing ash and slag dumps for energy-efficient ash beneficiation at Magadan CPP. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):12–20. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-05-116>

Введение

Золошлаковые отходы преследуют человечество на протяжении всего развития с момента промышленной революции. Комплексная переработка золошлаковых отходов является одним из поддерживаемых направлений развития экологичности и эффективности производства энергетики¹.

Рациональное использование таких отходов в массовом производстве нашлось только в различных технологиях строительства [1–3]. Однако развитие современных технологий обогащения позволяет обратить внимание на новые источники полезных ископаемых. Одним из таких направлений исследований стало обогащение золы с целью извлечения из нее различных полезных компонентов, например, драгоценных и редких металлов или недожжённого угля, из которого далее исследовалась возможность изготовления сорбента [4]. Многие работы в этой области сфокусировались на изучении извлечения магнетита [5, 6], драгоценных и редких металлов [7–9] и алюмосиликатов [10, 11]. Экономический эффект от реализации данных проектов в различные периоды различался, реализация оказывалась как убыточной, так и прибыльной. Этот эффект в большей степени определяется результатом поиска рациональных путей сбыта получаемой продукции.

В то же время масштабных исследований по переработке золошлаковых отходов с целью извлечения из них титанового концентрата не проводилось и экономическая эффективность таких проектов не оценивалась. Вероятно, это связано с тем, что вопрос рационального обогащения золы напрямую связан

с вещественным составом золы и гранул недожжённого угля. А степень обогащения полезных компонентов в различных соотношениях сильно варьируется в зависимости от значений этих соотношений.

Состав и вид углей, поставляемых последние 20 лет на МТЭЦ для сжигания, был изучен авторами [12]. Кратко можно привести следующую его характеристику: уголь с Талдинского месторождения (Кузбасс) – типичный длиннопламенный энергетический, малозольный, с большим содержанием известняков в минеральных частицах углей. Угли этого месторождения обогащались совместно с разных зон добычи, и итоговая смешанная фракция грузилась на отправку на МТЭЦ.

Ежегодно ПАО «Магаданэнерго» поставляет около 300 000 т угля с вышеуказанного месторождения². Кемеровского угольного бассейна. При этом в ходе отопительной компании осень-весна и поддержания работы котлоагрегатов летом происходит генерация около 33 000 м³ золошлаковых отходов, что при плотности 1,2–1,3 т/м³ составляет около 41 000 т золошлаковых отходов за год.

Постановка проблемы

К настоящему времени рациональной доказанной технологии переработки золошлаковых отходов МТЭЦ, требуемой Энергетической стратегией Российской Федерации, не существует.

Применение золы Магаданской ТЭЦ в составе клинкеров в цементных смесях для производства бетона на их основе оказалось неудачным ввиду

¹ «Круглый стол» на тему «Законодательное регулирование использования золошлаковых отходов угольных ТЭС». Министерство энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/140114> (Дата обращения: 20.11.22).

² Батакова О.Г. Магаданэнерго завезет более 300 тысяч тонн угля для отопительного сезона 2021–2022. Сайт ПАО «Магаданэнерго». 2021. URL: <http://www.magadanenergo.ru/content/magadanenergo-zavezet-bolee-300-tysyach-tonn-uglya-dlya-otopitelnogo-sezona-2021-2022> (Дата обращения: 03.05.2021).



большого содержания оксида кальция, который негативно влияет на прочностные свойства получаемых бетонов. Их марочность снижается с В30 до В10, что недопустимо при производстве зданий и сооружений для энергетической промышленности. А исследования по применению золошлаковых отходов в малых строительных формах (кирпичи, блоки, плиты) оказались не востребованы в силу малых объемов жилого строительства в Магадане в период с 2010 по 2022 г.

При этом в Энергетической стратегии Российской Федерации в период до 2035 г. перед всеми энергетическими компаниями, использующими в своей генерации энергии уголь, предписывается разработать меры по снижению экологической нагрузки на районы размещения ТЭС, в том числе и с учетом вовлечения в переработку золошлаковых отходов. Согласно положениям этой стратегии к 2024 г. должно быть утилизировано и обезврежено 15 % от всего объема образованных золошлаковых отходов, а к 2035 г. – 50 %³.

Основываясь на наших предыдущих исследованиях и исследованиях других авторов в сходных темах, мы обратили внимание на золошлаковые отвалы МТЭЦ с целью получения тяжелой (крайне насыщенной различными металлами, например, оксидами титана, циркония, стронция, рубидия и сульфидами цинка и меди) фракции, которую впоследствии можно было бы переработать различными методами с получением концентратов различных металлов. Для титановых и циркониевых оксидов предполагается применить метод попеременной магнитной и электрической сепарации с последовательным увеличением индукции магнитного поля сепараторов, получением отдельного магнитного концентрата с содержанием около 53–62 % по массе согласно предыдущим первичным исследованиям и селективным концентратам ильменита, рутила, монацита и циркона. А для извлечения стронция и рубидия предполагается использовать последовательную схему из электрических сепараторов с конечным кислотным растворением и выделением концентрата в электролизной машине.

Методика исследования

Основная цель данной работы – исследование выхода тяжелой фракции из золошлаковых отходов посредством применения традиционных методов гравитационного обогащения, магнитного и электрического обогащения, а также расчет экономической целесообразности этого обогащения. Ожидаемые концентраты металлов, составляющие тяжелую фракцию первичного гравитационного обогащения, учитываемые далее в расчетах, приведены выше.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) *Оценка объемов золы, накопленных на золошлаковых отвалах МТЭЦ.* Анализ проводился посредством

обработки статистической информации, накопленной МТЭЦ, в ходе натурных наблюдений за процессом генерации золошлаковых отходов и их складирования путем налива в золоотвал [13].

2) *Пробоотбор и полуколичественный анализ полезных компонентов в золошлаковых отходах МТЭЦ.* Анализ выполнялся на энергодисперсионном флуоресцентном рентгеновском спектрометре EDX-800HS2 производства «Shimadzu» (Япония) полуколичественным методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии. Условия измерений следующие: трубка – Rh-анод (мощность 50 Вт); напряжение – 50 кВ, 15 кВ; ток – 100 мкА (авто); атмосфера – гелий; измеряемый диаметр – 5 мм; время измерения – 100 с; измерения образцов проводились в диапазонах Ti-U (0,00–40,00 кэВ), Na-Sc (0,00–4,40 кэВ), S-K (2,1–3,4 кэВ) [13].

Пробы для анализа отбирались на золошлаковом отвале №1 (ЗШО-1) МТЭЦ. Использовалась следующая методика пробоотбора: сначала были определены основные зоны золоотвала – берма безопасности, зоны разлива гидротранспорта, зоны смешения золы, зоны чистого намыва золы. Пробы отбирались с заглубления зон чистого намыва золы (порядка 4 м) после производства процесса выемки верхних слоев золошлаковых отходов для перемещения их на другой золоотвал техникой ПАО «Магаданэнерго» (согласно графику перемещения золошлаковых отвалов). Сами пробы отбирались вдоль фланга горстевым способом. На одну фланговую пробу приходилось порядка восьми отобранных частей. Каждая из частей весила чуть больше 1 кг. Далее пробы перемешивались в лаборатории обогащения полезных ископаемых политехнического института СВГУ методом кольца и конуса трехкратно, сушили и квартовались механическим способом на классическом делителе. 1/8 полученной пробы отправлялась на полуколичественный анализ [13]. Всего было отобрано 8 фланговых проб общей массой 72,4 кг исходной золы до сушки. После сушки масса пробы снизилась до 58,2 кг.

3) *Разработка и базовый расчет рациональных технологических схем обогащения.* Разработка схем основывалась на классических схемах обогащения титано-цирконовых песков месторождений россыпного типа с последующей магнитно-электрической доводкой на соответствующих сепараторах. Также рассчитывалось извлечение стронция [14]. Схемы учитывали парк оборудования в лаборатории обогащения СВГУ, состоящий преимущественно из установок гравитационного обогащения (машина отсадочная высокочастотная – МОЛ2.5, концентрационные столы СКО-1 и РР-4, винтовой сепаратор, шлюз мелкого наполнения с резиновым высокопрофильным трафаретом, центробежный сепаратор) и установок магнитного и электрического обогащения (магнитный сепаратор барабанного типа, жидкий магнитный сепаратор, сухой магнитный сепаратор высокоградиентных полей, электрический барабанный сепаратор). Был использован классический метод расчета теории обогащения: по показателям содержаний в исходном

³ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Министерство энергетики Российской Федерации; 2020. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (Дата обращения: 20.11.22).



продукте, концентрате и хвостах рассчитывались выходы продуктов и извлечения, от которых брались объемы ожидаемого концентрата [15].

4) *Расчет базовых экономических показателей для выбранной технологической схемы для определения дальнейшей целесообразности разработки проекта переработки золы.* Экономические показатели считались по доуточненному методу NPV в изложении Аткинсона от 2005 г. [16]. На этих расчетах строилась базовая ригидная модель и по ней определялись дополнительные сценарии: пессимистичный, реалистичный и оптимистичный (каждый из которых учитывает возможности исполнения заданных значений производительности, извлечения и реализации товарной продукции по установленным ценам согласно сценариям).

Результаты исследований

Объемы золы были получены посредством обработки общего массива данных натуральных наблюдений в виде статистической информации по золоотвалам МТЭЦ, предоставленных ПАО «Магаданэнерго». Основные значения, используемые далее в подсчетах, сведены в табл. 1. Картирование отвалов и места про-

боотбора приведены в ранее опубликованных материалах авторов [17].

Для оценки объемов металлов, находящихся в золе МТЭЦ, были проведены полуколичественные анализы состава зол по отобраным в июле 2022 г. пробам согласно методу, описанному выше. Пробоотбор производился на флангах чистого намыва золы для снижения вероятности заражения проб окружающими породами [13, 14].

Полуколичественный анализ состава зол проведен специалистами института органической и физической химии им. А.Е. Арбузова (обособленное структурное подразделение ФИЦ «Казанский научный центр РАН»). Результаты полученного содержания компонентов различных металлов в золе МТЭЦ приведены в табл. 2.

Минералогические исследования показали, что состав проб соответствует типичному составу золошлаковых отходов. В их составе присутствуют кварц, силикаты, оксиды железа, пирит, карбонат, кремний, пирротин, чистое железо, латунь (Cu + Zn), а также сплавы железа различного состава: сплав Fe–Ni–Cr, Cr + Fe (феррохромит), Fe + Cr и Fe + Mn (количество Mn до 0,78 %), целестин, следы карналита.

Таблица 1

Краткие технические характеристики золоотвалов МТЭЦ

Наименование	1-й квартал 2021	2-й квартал 2021	3-й квартал 2021	4-й квартал 2021
Размещение всего, тыс. м ³	13,38	3,50	1,94	11,25
ЗШО-1*, секция 1	13,38	0,00	0,00	0,00
ЗШО-1, секция 2	0,00	3,50	1,94	11,25
Накоплено всего на ЗШО-1, тыс. м ³	2 713,20	2 704,70	2 706,70	2 708,10
Накоплено всего на ЗШО-1, тыс. т	3 255,90	3 245,70	3 248,10	3 249,70
на ЗШО-1, секция 1, тыс. м ³	2 108,50	2 111,50	2 111,50	2 101,70
на ЗШО-1, секция 2, тыс. м ³	604,70	593,30	595,20	606,50
Накоплено всего на ЗШО-2**, тыс. м ³	1 781,80	1 796,80	1 796,80	1 806,60
Накоплено всего на ЗШО-2, тыс. т	2 138,10	2 156,10	2 156,10	2 167,90

* ЗШО-1 – золошлаковый отвал 1, находящийся в непосредственной близости к улице Речной на участке микрорайонов «Пионерный» – «Солнечный».

** ЗШО-2 – золошлаковый отвал 2, находящийся на удалении от улицы Речной, в долине реки Балахапчан, связан грунтовой дорогой с ЗШО-1.

Таблица 2

Содержания компонентов в золе МТЭЦ, %

Пробы	Si	Al	Fe	Ca	K	Ti	Mg	P	Sr	Mn	Zr	Cu	Zn	Rb	S
	%														
1	52,30	20,20	15,30	4,20	3,50	1,60	1,10	0,70	0,50	0,20	0,10	0,10	0,04	0,03	–
2	55,00	20,10	10,80	4,70	4,60	1,80	1,30	0,60	0,30	0,10	0,10	0,10	0,03	0,03	0,40
3	54,40	20,30	13,20	3,40	3,90	1,80	1,20	0,80	0,60	0,20	0,20	0,10	0,04	0,04	–
4	56,30	21,20	10,10	3,40	4,30	2,00	0,90	0,70	0,50	0,10	0,20	0,05	0,04	0,03	0,20
5	40,20	18,20	23,00	8,10	3,30	2,30	1,80	0,50	0,80	0,30	0,30	0,10	0,10	0,05	1,00
6	51,30	17,70	17,90	0,21	3,80	1,70	1,20	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,03	0,04	0,10
7	55,00	20,80	10,60	4,20	4,40	2,10	1,30	0,60	0,40	0,20	0,20	0,10	0,05	0,04	–
8	51,50	20,20	11,70	5,00	0,10	3,10	0,90	0,05	0,20	0,20	0,20	0,10	0,04	0,10	0,90



Основные технологические параметры, установленные в ходе анализа рациональных схем обогащения, рассчитывались по аналогии со сходными проектами по переработке россыпных титано-циркониевых (циркониевых месторождений [15], а для магнетита – согласно исследованиям Л.Н. Адеевой и В.Ф. Борбат [18].

Полученные расчетным путем [19] технологические параметры обогащения золошлаковых отходов МТЭЦ приведены в табл. 3. Начальные содержания были приняты равными средним медианным значением из табл. 2 по соответствующим металлам.

Исходя из полученных значений рассчитываются объемы полезных компонентов (металлов, планируемых к извлечению):

$$V_{Me} = V_{зшо-1} \cdot a_{Me}, \quad (1)$$

где V_{Me} – рассчитанный объем металла, т; $V_{зшо-1}$ – объем золоотвала, т, a_{Me} – начальное содержание металла, %.

Из полученных общих объемов металлов определяется извлекаемый объем с учетом технологических потерь. Для учета потерь вводится корректирующий коэффициент $k_{об}$, учитывающий общие потери (его значение варьируется от 0,75 до 0,95; для дальнейших расчетов с учетом гравитационной схемы принят равным 0,90) [20]:

$$Q_{Me} = V_{Me} \cdot E_{Me} \cdot k_{об}, \quad (2)$$

где Q_{Me} – объем извлекаемого металла относительно общего, т; E_{Me} – извлечение металла в концентрат, %.

Также отдельно рассчитывается годовой поток металлов P , поступающих вместе со свежими золошлаковыми отвалами, которые МТЭЦ продолжает постоянно генерировать и которые также можно вовлечь в обогащение:

$$P_{Me} = Z_{зшо-1} \cdot a_{Me} \cdot E_{Me} \cdot k_{об}, \quad (3)$$

где P_{Me} – поток извлекаемого металла, т; $Z_{зшо-1}$ – ежегодный объем «свежих» золошлаковых отвалов, т; a_{Me} – начальное содержание металла, %; E_{Me} – извлечение металла в концентрат, %; $k_{об}$ – коэффициент, учитывающий общие потери.

Рассчитанные по формулам выше значения объема металлов, планируемых к извлечению, сведены в табл. 4.

С учетом полученных значений рассчитывается годовая производительность по золе и исходя из этого подбираются оборудование и машины для обеспечения процесса переработки:

$$U_{зола} = \frac{\sum_{Me-1}^{Me-3} P_{Me} + 3\%Q_{Me}}{AVG_{y_{к-ц}}} \cdot AVG_{y_{х-т}}, \quad (4)$$

где $U_{зола}$ – годовая производительность по золе, т/год; $AVG_{y_{к-ц}}$ – среднее арифметическое значение выхода концентрата, % (7,32); $AVG_{y_{х-т}}$ – среднее арифметическое значение выхода хвостов, % (92,72).

Полученное значение составляет 63 000 т переработки золы в год, что в перерасчете на часовую производительность составляет 24 т/ч. Подобрать оборудование и машины под такие показатели – тривиальная задача и в дополнительном освещении не нуждается.

Последняя задача расчета базовых экономических показателей решалась с применением аналитических и расчетных методов оценки экономической эффективности инновационных проектов. Объемы капитальных вложений и операционных затрат оценивались по аналогии со сходными по производительности техническими проектами добычи и переработки россыпей редких металлов, ставка дисконтирования закладывалась около 12 %. Далее исходя из объемов потенциальной отгрузки металлических концентратов рассчитывались: чистый дисконтированный доход на горизонте 10 лет и внутренняя норма прибыльности на том же горизонте. В рассчитываемой ригидной модели использовался линейный способ амортизации.

Входные совокупные траты составляют 188,50 млн руб. (категория CAPEX – капитальные затраты), операционные затраты составляют 128,31 млн руб. в год (категория OPEX – операционные затраты). Структура OPEX: 23,00 % – фонд оплаты труда (списочная численность персонала – 27 человек); 77,00 % – материальные производственные затраты, амортизация и проценты по долговым обязательствам.

Таблица 3

Рассчитанные технологические параметры обогащения золошлаковых отходов МТЭЦ

Металл	Начальное содержание a , %	Содержание в товарном концентрате b , %	Содержание в хвостах обогащения o , %	Выход концентрата $Y_{к-ц}$	Выход хвостов $Y_{х-т}$	Полное извлечение E , %
Ti + Zr	2,20	45,00	0,50	3,82	96,18	78,14
Sr	0,50	25,00	0,10	1,61	98,39	80,32
Fe	14,00	65,00	4,00	16,40	83,61	76,11

Таблица 4

Объем металлов, планируемых к извлечению

Металл	Объем на ЗШО-1 V_{Me} , т	Извлекаемый объем Q_{Me} , т	Ежегодный поступающий объем P_{Me} , т	Планируемый к извлечению объем $P_{Me} + 3\% Q_{Me}$, т
Ti (me-1)	71 493,40	50 279,07	634,35	785,19
Sr (me-2)	16 248,50	11 745,90	148,19	183,43
Fe (me-3)	454 958,00	311 651,56	3 931,97	4 866,92



Планируемый объем поставок рассчитывается исходя из ежегодного потока извлекаемого металла и вовлечения в переработку дополнительных 3 % накопленного извлекаемого объема. В денежном выражении это составляет 177,84 млн руб. При этом в данном сценарии (которому присвоена категория – реалистичный) учет выхода металлического стронция сильно занижен ввиду ожидаемых сложностей по получению 183,43 т стронция в год. В модель внесена половина от этого объема, то есть 91,5 т стронция. Стоимость отгружаемого концентрата титана взята согласно открытым интернет-источникам – 66,00 тыс. руб. за тонну концентрата (по состоянию на ноябрь 2022 г.). Стоимость стронциевого концентрата 96,00 тыс. руб. за тонну и стоимость магнетита – 6,75 тыс. руб. за тонну⁴.

Покупка оборудования и техники планируется за счет привлечения заемного капитала через крупные финансовые организации. Условия кредитования: 18,00 % годовых в рублях сроком на 5 лет на основные фонды и вторая кредитная линия на обеспечение производственной деятельности под 12,0 % годовых в рублях сроком на 3 года. Структура заемного капитала 54,0 % – основная кредитная линия; 42,0 % – вторая кредитная линия; 4,0 % – привлеченное внешнее финансирование.

Ставка дисконтирования составляет 12 % годовых в рублях, что обусловлено текущей экономической ситуацией. Денежные потоки представлены в реальном выражении. Корректировке на прогнозируемый Министерством экономического развития Российской Федерации уровень инфляции подвергается лишь итоговый денежный поток, используемый для расчета NPV.

Для улучшения наглядности модели введена предпосылка о том, что база для налоговых выплат формируется исключительно в периоде, в который происходит расчет с бюджетами различных уровней. В модели используются следующие налоговые ставки: НДС – 20,0 %; налог на прибыль – 15,5 %; налог на имущество организации – 2,2 %.

Полученная в ходе расчетов модель приведена в табл. 5.

Формирование моделей происходило главным образом в зависимости от изменения отпускной цены

на металлы и на показатель фактической реализации стронция. В пессимистичной модели стронций из расчета убран полностью, а отпускные цены на титан и магнетит занижены на 10 % от текущих.

Практическое применение

Обоснование экономической эффективности является одним из обязательных этапов разработки рациональной схемы переработки золошлаковых отвалов. Одно из перспективных направлений использования полученных результатов – это выделение металлоносной фракции и последующее дообогащение с целью получения концентратов редких металлов. В перспективе эти результаты будут презентованы ПАО «Магаданэнерго» в части инвестиционного предложения по проекту переработки золошлаковых отходов МТЭЦ.

Еще одним использованием проведенного обоснования экономической эффективности является планирование университетом загрузки собственной лаборатории обогащения полезных ископаемых в рамках договора толлинга (договора об оказании услуг о переработке базового сырья с передачей готовых концентратов, коллективных или селективных, заказчику) с ПАО «Магаданэнерго» в случае принятия решения о переработке золошлаков в целях выделения редких металлов в концентрат.

Обсуждение результатов

В ходе исследования рассчитаны технологические показатели обогащения и укрупненные значения экономических показателей для реализации данного проекта в промышленных масштабах. Несмотря на скромные показатели по производительности и низкие капитальные затраты, экономический эффект в двух из трех сценариев (оптимистичном и реалистичном) выглядит привлекательно. Однако нельзя не отметить высокий риск полученных результатов из-за некоторых допущений, сделанных в работе.

Первое допущение связано с ограниченной доступностью региона к центральным транспортным артериям Российской Федерации. Это накладывает свой отпечаток на сложность логистических схем и конечную высокую цену для потребителя. Следовательно, найти покупателя под реализуемую стоимость, указанную выше, будет затруднительно. Следует отметить и факт насыщенности рынка ильменитовым концентратом, что также не привлекает внимание потенциальных покупателей к далекому Магаданскому диоксиду титана и магнетиту.

⁴ Титановый концентрат. Старов и Ко. URL: <https://www.iodine.ru/> (Дата обращения: 20.11.22).

Таблица 5

Гибкость ригидной модели

Наименование показателя	Значение показателя, модель – реалистичная	Значение показателя, модель – пессимистичная	Значение показателя, модель – оптимистичная
NPV, млн руб.	424,31	-31,40	657,65
IRR, %	42,00	9,00	66,00
ROS, %	29,00	7,00	39,00
PВ, лет	4,00	Н/У	2,00
DPB	Не превышает горизонт прогнозирования	Превышает горизонт планирования	Не превышает горизонт прогнозирования



Второе допущение связано с тем, что технология извлечения стронция будет эффективно реализовываться в процессах гравитационного обогащения, что в силу особенностей химических соединений стронция также несет в себе определенную степень риска.

Также, если ставить вопрос о полной переработке всего золоотвала МТЭЦ на действующей площадке или на второй площадке, то возникнут определенные трудности. Они напрямую связаны с непостоянством завоза угля на МТЭЦ от одного и того же производителя. И это коснется как плановых показателей, влияющих на экономику процесса обогащения, так и внеплановых. Проблема может быть снята решением двух вопросов, которые можно будет получить только после начала отработки проекта обогащения золы МТЭЦ и проведения полноценных разведочных работ:

1) Был ли диоксид титана в тех же содержаниях в золах углей, поставленных в прошлые годы на МТЭЦ?

2) Будет ли диоксид титана в тех же содержаниях в золах углей, планируемых к закупке на будущие годы на МТЭЦ?

И последнее допущение, которое было сделано, – это уверенность в том, что металлы распределены в таких минералах и такой фракции, которые будут относительно легко извлекаться в промежуточный концентрат посредством гравитационного обогащения и далее доводиться небольшими объемами в лаборатории обогащения СВГУ. И этот вопрос тоже требует дополнительного изучения.

Заключение

Полученные в ходе исследований сведения из различных источников, а также первичный технологический расчет и полуколичественный анализ показателей представляются экономически эффективными. Технологическая схема обогащения может быть исполнена не только в виде стационарного комплекса внутри отдельно стоящего здания, но и в виде открытой модульной установки, что позволит в какой-то момент времени переместиться на площадку второго золоотвала.

При этом экономическая целесообразность проекта по переработке золы в двух моделях из трех показывает хорошие экономические показатели в десятилетнем горизонте. А с точки зрения улучшения экологической ситуации позволяет вовлечь в переработку до 10 % всего объема золоотвалов, что на пятую часть выполняет требования Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 г.⁵

Дальнейший ход исследования планируется направить на доизучение элементного и минералогического состава зол с целью определения основных минералов, вмещающих полезные компоненты, планируемые к извлечению.

⁵ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Министерство энергетики Российской Федерации; 2020. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (Дата обращения: 20.11.22).

Список литературы / References

1. Баженов Ю.М., Щебенкин П.Ф., Дворкин Л.И. *Применение промышленных отходов в производстве строительных материалов*. М.: Стройиздат; 1986. 120 с.
Bazhenov Y.M., Shchebenkin P.F., Dvorkin L.I. *Application of industrial waste in the production of construction materials*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1986. 120 p. (In Russ.)
2. Борисенко Л.Ф., Дельцин Л.М., Власов А.С. *Перспективы использования золы угольных тепловых электростанций*. М.: ЗАО «Геоинформмарк»; 2001. 68 с.
Borisenko L.F., Deltsin L.M., Vlasov A.S. *Prospects of utilization of ash from coal-fired thermal power plants*. Moscow: CJSC Geoinformmark Publ.; 2001. 68 p. (In Russ.)
3. Liu H., Banerji Sh.K., Burkett W.J., VanEngele J. Environment properties of fly ash bricks. In: *World of Coal Ash (WOCA) Conference*. Lexington, KY, USA, May 4–7, 2019.
4. Vereshchagina T.A., Kutikhina E.A., Buyko O.V., Anshits A.G. Hydrothermal synthesis and sorption performance to Cs(I) and Sr(II) of zirconia-analcime composites derived from coal fly ash cenospheres. *Chimica Techno Acta*. 2022;9(4):20229418. <https://doi.org/10.15826/chimtech.2022.9.4.18>
5. Lanzerstorfer C. Pre-processing of coal combustion fly ash by classification for enrichment of rare earth elements. *Energy Reports*. 2018;4:660–663. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.10.010>
6. Леонов С.Б., Никольская Н.И., Власова В.В. Золой ТЭЦ – возможное сырье для получения железных концентратов. В: *Сборник научных трудов «Знания в практику»*. Иркутск: ИрГТУ; 1999. С. 6–9.
Leonov S.B., Nikolskaya N.I.I., Vlasova V.V. CPP ashes – a possible raw material for obtaining iron concentrates. In: *Collection of Scientific Papers “Knowledge into Practice”*. Irkutsk: IrSTU Publ.; 1999. Pp. 6–9. (In Russ.)
7. Черепанов А.А. Благородные металлы в золошлаковых отходах дальневосточных ТЭЦ. *Тихоокеанская геология*. 2008;27(2):16–28.
Cherepanov A.A. Precious metals in the ash-cinder waste of Far Eastern heat-and-power stations. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2008;27(2):16–28. (In Russ.)



8. Черепанов А.А., Кардаш В.Т. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ (результаты лабораторных и полупромышленных испытаний). *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2009;(2):98–115.
Cherepanov A.A., Kardash V.T. Complex processing of ash and slag wastes from CPPs (results of laboratory and semi-industrial tests). *Geology and Mineral Resources of World Ocean*. 2009;(2):98–115. (In Russ.)
9. Бакунин Ю.Н., Черепанов А.А. Золото и платина в золошлаковых отходах ТЭЦ г. Хабаровска. В: *Обогащение руд: Сборник научных трудов*. Иркутск: Изд-во ИрГТУ; 2003. С.65–80.
Bakunin Y.N., Cherepanov A.A. Gold and platinum in ash and slag wastes of Khabarovsk CPP. In: *Ore Processing. Collection of Scientific Papers*. Irkutsk: IrSTU Publ.; 2003. Pp. 65–80. (In Russ.)
10. Карнаухов Ю.П., Шарсва В.В., Подвольская Е.Н. Вяжущие на основе отвалной золошлаковой смеси и жидкого стекла из микрокремнезема. *Строительные материалы*. 1998;(5):12–13.
Karnaikhov Yu.P., Sharsva V.V., Podvolskaya E.N. Binders on the basis of waste ash-and-slag mixture and liquid glass from microsilica. *Stroitel'nye Materialy*. 1998;(5):12–13. (In Russ.)
11. Кизильштейн Л.Я., Шпицглюз А.Л., Рылов В.Г. Алумосиликатные микросферы золы пылеугольного сжигания углей. *Химия твердого топлива*. 1987;(6):122–124.
Kizilstein L. Ya., Shpitsgluz A. L., Rylov V. G. Aluminosilicate microspheres of pulverized coal combustion ash. *Khimiya Tverdogo Topliva*. 1987;(6):122–124. (In Russ.)
12. Гайдай Н.К., Кузьменков М.А., Шипунов Л.В. Анализ углей и зол Магаданской ТЭЦ. *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2021;12–11(80):253–261.
Gayday N.K., Kuzmenkov M.A., Shipunov L.V. Analysis of coals and ashes of the Magadan CHPP. *Aktual'nyye Nauchnyye Issledovaniya v Sovremennom Mire*. 2021;12–11(80):253–261. (In Russ.)
13. Шипунов Л.В., Кузьменков М.А., Гайдай Н.К. Характеристики золы и золоотвалов Магаданской ТЭЦ. В: *Идеи, гипотезы, поиск... Материалы XXVII региональной научной конференции аспирантов, соискателей и молодых исследователей*. Магадан, 21 апреля 2022 г. М.: Изд-во «Знание-М»; 2022. С. 223–232. <https://doi.org/10.38006/00187-196-5.2022.223.232>
Shipunov L.V., Kuz'menkov M.A., Gaiday N.K. Characteristics of ash and ash dumps of Magadan TPP. In: *Ideas, hypotheses, search... Materials of the XXVII Regional Scientific Conference of Postgraduate Students, Degree-Seeking Students, and Young Researchers*. Magadan, April 21, 2022. Moscow: Znanie-M Publ.; 2022. Pp. 223–232. (In Russ.) <https://doi.org/10.38006/00187-196-5.2022.223.232>
14. Шипунов Л.В., Кузьменков М.А., Гайдай Н.К. Оценка распределения содержаний редких металлов в золоотвале Магаданской ТЭЦ. В: *На перекрестке Севера и Востока (методологии и практики регионального развития): материалы IV международной научно-практической конференции*. Магадан, 17–18 ноября 2022 г. Магадан: Изд-во СВГУ; 2022. С. 214–220.
Shipunov L.V., Kuzmenkov M.A., Gaiday N.K. Estimation of rare metal content distribution in an ash dump of Magadan CPP. In: *At the Crossroads of the North and the East (Methodologies and Practices of Regional Development): Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference*. Magadan, November 17–18, 2022. Magadan: SVSU Publ.; 2022. Pp. 214–220 (In Russ.)
15. Полькин С.И. *Обогащение руд и россытей редких и благородных металлов*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра; 1987. С. 123–169.
Polkin S.I. *Ores and placers of rare and precious metals beneficiation*. 2nd ed., reprint and additional. Moscow: Nedra Publ.; 1987. Pp. 123–169. (In Russ.)
16. Егоров В.Н. *Обогащение полезных ископаемых*. М: Недра; 1987. С. 28–56.
Egorov V. N. *Mineral Processing*. Moscow: Nedra Publ.; 1987. Pp. 28–56. (In Russ.)
17. Шипунов Л.В. Картирование золошлаковых отвалов Магаданской ТЭЦ. В: *Инновационная траектория развития современной науки: сборник статей*. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука»; 2022. С. 125–131.
Shipunov L.V., Kuzmenkov M.A., Gaidai N.K. Mapping of ash and slag dumps of Magadanskaya TPP. In: *Innovative trajectory of modern science development: collection of papers*. Petrozavodsk: “New Science” International Center for Science Partnerships; 2022. Pp. 125–131. (In Russ.)
18. Адеева Л.Н., Борбат В.Ф. Зола ТЭЦ – перспективное сырье для промышленности. *Вестник Омского университета*. 2009;(2):141–151.
Adeeva L.N., Borbat V.F. Ashes of heating and power plant – perspective raw material for industry. *Herald of Omsk University*. 2009;(2):141–151. (In Russ.)
19. Аткинсон Э.А., Банкер Р.Д., Каплан Р.С., Янг С.М. *Управленческий учет*. 3-е изд.: пер. с англ. М.: Вильямс; 2005. С. 321–457. (Ориг. вер.: Atkinson A.A., Banker R.D., Kaplan R.S., Yuong S.M. *Management accounting*. 3rd ed. New Jersey: Pearson College Div; 2000.)
Atkinson A.A., Banker R.D., Kaplan R.S., Yuong S.M. *Management accounting*. 3rd ed. New Jersey: Pearson College Div; 2000. (Trans. ver.: Atkinson A.A., Banker R.D., Kaplan R.S., Yuong S.M. *Management accounting*. 3rd ed.: trans. from English. Moscow: Williams; 2005. Pp. 321–457. (In Russ.))



20. *Справочник по проектированию рудных обогатительных фабрик*. В 2 кн. Книга 1. Сост.: Баранов В. Ф. и др.; редкол.: проф. Тихонов О. Н. и др. М.: Недра; 1988. С: 194–209.
Ore processing plant design handbook. In 2 Books, Book 1. Compiled by: Baranov V. F. et al.; editors: Prof. Tikhonov O. N. et al. Moscow: Nedra Publ.; 1988. Pp. 194–209. (In Russ.)

Информация об авторах

Лев Викторович Шипунов – старший преподаватель кафедры цифровой инженерии, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-0840-8209](https://orcid.org/0000-0002-0840-8209); e-mail Eazey2308@gmail.com

Максим Андреевич Кузьменков – старший преподаватель кафедры цифровой инженерии, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-6375-9693](https://orcid.org/0000-0002-6375-9693), Scopus ID [58286501200](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58286501200); e-mail Snowfallandtea@mail.ru

Наталья Константиновна Гайдай – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, директор политехнического института, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; старший научный сотрудник лаборатории региональной геологии и геофизики, Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Магадан, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-2679-4967](https://orcid.org/0000-0002-2679-4967), Scopus ID [6603868070](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603868070); e-mail nataly_mag@rambler.ru

Information about the authors

Lev V. Shipunov – Senior Lecturer at the Department of Digital Engineering, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; ORCID [0000-0002-0840-8209](https://orcid.org/0000-0002-0840-8209); e-mail Eazey2308@gmail.com

Maxim A. Kuzmenkov – Senior Lecturer at the Department of Digital Engineering, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; ORCID [0000-0002-6375-9693](https://orcid.org/0000-0002-6375-9693), Scopus ID [58286501200](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58286501200); e-mail Snowfallandtea@mail.ru

Nataliya K. Gaidai – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Polytechnic Institute, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; Senior Researcher at the Laboratory of regional Geology and Geophysics, North-Eastern Integrated Research Institute named after N.A. Shilo of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russian Federation; ORCID [0000-0002-2679-4967](https://orcid.org/0000-0002-2679-4967), Scopus ID [6603868070](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603868070); e-mail nataly_mag@rambler.ru

Поступила в редакцию	07.05.2023	Received	07.05.2023
Поступила после рецензирования	06.10.2023	Revised	06.10.2023
Принята к публикации	01.11.2023	Accepted	01.11.2023