ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 621.182.94:621.182.95

DOI: <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-348-356>

Использование золошлаковых отходов в сельском хозяйстве

Павел Леонидович Палеев¹✉, Людмила Ивановна Худякова²^{1,2}*Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Улан-Удэ, Россия*¹palpavel@mail.ru²lkhud@binm.ru

Аннотация. Золошлаковые отходы являются источником негативного воздействия на окружающую природную среду в глобальном масштабе. Ученые по всему миру проводят исследования в этом направлении. Цель работы – систематизировать данные о возможных способах утилизации, накопленном практическом опыте использования золошлаковых отходов в сельском хозяйстве как в России, так и за рубежом. Проведенный анализ показал, что накопленные отходы топливно-энергетического комплекса можно широко использовать в различных областях сельского хозяйства в качестве мелиорантов, минеральных удобрений на цеолитной основе, пестицидов и инсектицидов для обработки садовых культур, микроудобрений, а также для ремедиации почв и рекультивации земель. Использование золошлаковых отходов в сельском хозяйстве, наряду с другими отраслями народного хозяйства, позволит снизить экологическую нагрузку на окружающую природную среду, а также не допустить их дальнейшее складирование. Таким образом, будет сокращено количество переполненных золоотвалов, а также отпадет необходимость в отчуждении площадей под строительство новых.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, мелиоранты, минеральные удобрения на цеолитовой основе, рекультивация

Для цитирования: Палеев П. Л., Худякова Л. И. Использование золошлаковых отходов в сельском хозяйстве // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. Т. 6. № 4. С. 348–356. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-348-356>.

ECOLOGY

Original article

Applications of ash and slag waste in agriculture

Pavel L. Paleev¹✉, Lyudmila I. Khudyakova²^{1,2}*Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences,
Ulan-Ude, Russia*¹palpavel@mail.ru²lkhud@binm.ru

Abstract. Ash and slag wastes are the source of negative impact on the environment. This area is studied by a number of researchers. The article aims to systematize the data on possible applications, accumulated practical experience of using ash and slag waste in agriculture both in Russia and abroad. The analysis showed that waste from the fuel and energy industry can be widely used in various areas of agriculture. It can be used as ameliorants, zeolite-based mineral fertilizers, pesticides and insecticides for treating horticultural crops, microfertilizers, as well as for soil remediation and land reclamation. The use of ash and slag waste in agriculture and other sectors of the national economy can reduce the ecological load on the environment. The number of overfilled ash dumps can be reduced, and there will be no need to build new ones.

Keywords: ash and slag waste, ameliorants, zeolite-based mineral fertilizers, reclamation

For citation: Paleev P. L., Khudyakova L. I. Applications of ash and slag waste in agriculture. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost' = XXI century. Technosphere Safety*. 2021;6(4):348-356. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-348-356>.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом в России растет потребление электрической энергии, т. к. развитие всех сфер жизни общества полностью основано на ее использовании, что приводит к увеличению мощностей тепловых электростанций (ТЭС). В процессе работы ТЭС золошлаковые отходы (ЗШО), включающие в себя золу уноса и шлак, образуются в огромных количествах, и их, не разделяя гидротранспортом, отправляют на золоотвалы. Так в городской черте или в непосредственной близости от городов в больших количествах накапливаются ЗШО, являющиеся источником поступления золы в атмосферу вследствие ветровой эрозии.

При этом количество золы, выносимое с одного гектара золоотвала, может составлять сотни т в год, распространяясь на несколько км от источника, негативно воздействуя на окружающую природную среду и здоровье человека в целом. В настоящее время более 1,5 млрд т ЗШО находится в золоотвалах. Это является глобальной проблемой, особенно для России с ее суровыми климатическими условиями. Накопленные и вновь образующиеся ЗШО не находят потенциальных потребителей в промышленных масштабах [1]. Это приводит к заполнению существующих золоотвалов и к необходимости строительства новых. Для этого отчуждаются новые площади в черте города или в непосредственной близости от него, что приводит к серьезным капитальным затратам, связанным со строительством новых золоотвалов.

В феврале 2019 г. Комитетом по энергетике ГД РФ был проведен круглый стол на тему «Законодательное регулирование использования золошлаковых отходов угольных ТЭС»¹, где было отмечено, что

сжигается в год твердого топлива порядка 123 млн т, при этом ежегодно образуется около 20 млн т ЗШО. Вместе с тем потребление ЗШО, по данным Министерства энергетики РФ, в данное время составляет всего 8,4%. Было отмечено, что основным препятствием для увеличения объемов сбыта ЗШО является отсутствие сформированного рынка потребления золошлаковых отходов.

Энергетическая стратегия в РФ впервые до 2035 г. определяет показатель использования ЗШО в народном хозяйстве – 50% от годового образования², а это составляет порядка 10 млн т к 2035 г.

Над проблемой применения ЗШО работают отечественные и зарубежные ученые. Цель работы – систематизировать данные о возможных способах утилизации и накопленном практическом опыте использования ЗШО в сельском хозяйстве.

МЕТОДЫ

Авторами был проведен аналитический обзор публикаций российских и зарубежных ученых в области современного состояния применения и переработки ЗШО для полезного использования в сельском хозяйстве.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Золошлаковые отходы по данным химического и минералогического анализа по своему составу во многом имеют сходство с природным минеральным сырьем. Поэтому их использование в различных отраслях народного хозяйства является главным стратегическим путем решения экологической проблемы в промышленной зоне золоотвала.

В работах российских исследователей [2–4] сделаны попытки систематизи-

¹Законодательное регулирование использования золошлаковых отходов угольных ТЭС: круглый стол [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/14014> (20.09.2021).

²Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2035 года [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (20.09.2021).

ровать области практического применения отходов сжигания твердого топлива. Анализируя работы отечественных и зарубежных исследователей, можно выделить несколько основных областей применения ЗШО в народном хозяйстве в зависимости от применения полученных компонентов:

- строительная отрасль (производство цемента [5], бетона [6–8], керамических изделий [9–11], теплоизоляционных материалов [12–16], дорожное строительство [17–20], закладочные смеси для заполнения земляных выработок при добыче полезных ископаемых [21, 22]);
- производство сорбентов (например, получение цеолитов [23, 24], пористых кварцевых материалов [25, 26]);
- прочее промышленное производство (получение геополимерных материалов [27–29], извлечение ценных компонентов из ЗШО);
- сельское хозяйство.

В настоящее время основным документом, определяющим стратегию развития России в области сельского хозяйства, является Доктрина продовольственной безопасности³, утвержденная в начале 2020 г.

Наряду с восстановлением и повышением плодородия земель сельскохозяйственного назначения, предотвращения сокращения площадей земель сельскохозяйственного назначения и рационального использования таких земель, одной из основополагающих целей развития продовольственной безопасности является защита и сохранение сельскохозяйственных угодий от водной и ветровой эрозии и опустынивания. Для достижения большинства этих целей можно широко использовать потенциал ЗШО в сельском хозяйстве.

³Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 // Гарант. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73338425/> (20.09.2021).

В ЗШО ТЭС содержится большое количество оксидов и ценных микроэлементов, поэтому им можно найти широкое применение при мелиорации почв в сельском хозяйстве, а также при реимедиации и рекультивации земель [30, 31]: при внесении их в почву улучшаются водно-физические и агрохимические показатели.

Высокое содержание калия в ЗШО позволяет предположить, что они могут использоваться в качестве калийного удобрения, и, тем самым, повысить содержание в почве необходимого для растений обменного калия почти на 8%. При этом рекомендуемая доза, необходимая для внесения в почву, составляет порядка 60 т/га. Положительный эффект от внесения золошлака в почву сохраняется в течение трех лет [32], но перед применением ЗШО в данной области необходимо провести химический анализ на содержание вредных химических элементов, включая тяжелые металлы.

В качестве микроудобрений рекомендуют использовать немагнитную фракцию ЗШО, так как в ней наибольшее содержание микроэлементов по сравнению с магнитной фракцией. Для получения эффективных микроудобрений пролонгированного действия авторы [33] рекомендуют получать гранулы, обогащенные связанным азотом.

Определенное количество внесенного в почву золошлака будет способствовать накоплению в ней макро- и микроэлементов, тем самым повышать ее плодородие и способствовать росту растений [34, 35]. При этом урожайность и питательный состав будут зависеть от вида почвы, количества внесенного золошлака и от выращиваемой культуры.

Авторы работ [36, 37] считают, что летучая зола, входящая в состав ЗШО, является пестицидом. Ее внесение в почву будет защищать растения от многих сельскохозяйственных вредителей, при этом снизится появление личинок, повысится

устойчивость растений к различным видам болезней. Также она может быть использована в качестве инсектицида для обработки садовых культур.

Одним из простых путей применения ЗШО является их использование в качестве стабилизатора почвы. Золошлаки содержат большое количество гранул и имеют пористую структуру, поэтому добавление их в почву позволяет сделать ее более рыхлой (увеличить проницаемость), а также повысить влагоудерживающие свойства. При этом увеличивается способность почвы удерживать питательные вещества для растений. Эффективность использования ЗШО в этом качестве также зависит от характеристик почвы [38].

В Индии, которая находится на третьем месте в мире по потреблению электроэнергии после Китая и США, ЗШО, помимо строительной области, находят широкое применение для сельскохозяйственных нужд (около 20 млн т ежегодно). Основное применение – мелиорации земель, находящихся близко к уровню моря [39]. В Индии, по сравнению с другими странами, более остро присутствует проблема засоления почв [40]. Для рекультивации таких земель требуются агрохимическая и гидротехническая мелиорации. Поскольку зола уноса, входящая в состав ЗШО, обладает высокими сорбирующими свойствами, она идеально подходит для рекультивации такого типа почв.

Перспективным направлением использования ЗШО (например, в Японии) является производство минеральных удобрений на цеолитной основе, т.е. зола уноса является материалом для производства неорганических цеолитов. Цеолиты принято считать «умными» удобрениями за счет их высокой сорбционной активности и пористости⁴ [41]. Подобные удобрения спо-

собны постепенно поставлять необходимые для растений полезные микроэлементы по мере их потребности. Такие удобрения не обладают токсичным действием для окружающей природной среды и химически инертны, а также способны поглощать токсичные загрязнители, обеспечивая оптимальный баланс почвы.

Хотя с биологической точки зрения ЗШО в чистом виде – «стерильные», лишённые органических веществ материалы, имеющие лишь следы азота, но содержание в них некоторых микроэлементов, имеющих важное значение для роста растений, в 20–100 раз превышает их содержание в почве [42]. Также на золоотвалах произрастают растения, семена которых занесены ветром, хотя процесс самозарастания проходит очень медленно – покрытие их поверхности растениями до прекращения пыления длится до 15 лет. Исходя из этого можно выдвинуть предположение, что ЗШО можно использовать в качестве почвенного субстрата. Таким образом, отходы ТЭС могут быть использованы при рекультивации земель. Например, авторы работы [43] показали, что смесь ЗШО с илом очистных сооружений образует плодородный слой для роста различных видов растений.

Авторами статьи был проведен первый этап исследований по возможности выращивания газонной травы на искусственном почвогрунте, представляющим собой смесь ЗШО ТЭЦ г. Улан-Удэ с илом очистных сооружений и отходами птицеводства (куриный помет) в различных соотношениях. В опытах была использована овсяница луговая (*Festuca pratensis*) – одна из самых распространенных газонных трав, относящихся к семейству злаковых, отличающаяся устойчивостью к неблагоприятным условиям и обладающая мощной корневой системой, которая расположена в верхнем слое грунта. Результаты проведен-

⁴Synthesis of Zeolite from Fly Ash and their Use as Soil Amendment [Электронный ресурс] // IntechOpen. URL: <https://www.intechopen.com/books/zeolites-useful-mine-rals/synthesis-of-zeolite-from-fly-ash-and-their-use-as-soil-amendment> (20.09.2021).

ных опытов позволили сделать выводы о возможности использования данных почвосмесей при рекультивации золоотвалов. В дальнейшем необходимы более детальные исследования влияния ЗШО на рост растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ научных публикаций зарубежных и российских авторов показал, что золошлаковые отходы тепловых электростанций, оказывающие

негативное воздействие на окружающую природную среду и человека, можно использовать в различных областях сельского хозяйства.

Кроме того, достаточное использование отходов теплоэнергетики позволит снизить экологическую нагрузку на окружающую природную среду, а также уменьшить количество переполненных золоотвалов. При этом вопрос строительства новых золоотвалов не будет стоять так остро.

Список источников

1. Зырянов В.В., Зырянов Д.В. Зола-уноса – техногенное сырье. М.: ИПЦ «Макса», 2009. 320 с.
2. Пичугин Е. А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Проблемы региональной экологии. 2019. № 4. С. 77–87. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-14077>.
3. Кожуховский И. С., Величко Е. Г., Целыковский Ю. К., Цховребов Э. С. Организационно-экономические и правовые аспекты создания и развития производственно-технических комплексов по переработке золошлаковых отходов в строительную и иную продукцию // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 6 (129). С. 756–773. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.6.756-773>.
4. Худякова Л. И., Залуцкий А. В., Палеев П. Л. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций. // XXI век. Техносферная безопасность. 2019. Т. 4. № 3. С. 375–391. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2019-3-375-391>.
5. Энтин З. Б., Нефедова Л. С., Стржалковская Н. В. Зола ТЭС – сырье для цемента и бетона // Цемент и его применение. 2012. № 2. С. 40–46.
6. Ефременко А. С., Халтаева Е. П. Применение золошлаковых отходов ТЭС при производстве высокопрочных легких бетонов // Вестник ИрГТУ. 2014. № 8 (91). С. 86–89.
7. Медведева Г. А., Ахметова Р. Т., Юсупова А. А. Утилизация золошлаковых отходов ТЭС при изготовлении серных бетонов в присутствии хлорида фосфора // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 11. С. 43–47.
8. Губарь В. Н., Петрик И. Ю., Жибоедов А. В. Способы повышения качества золы-уноса ТЭС, применяемой в высококачественных бетонах // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (119). С. 63–70.
9. Мальчик А. Г., Литовкин С. В., Родионов П. В. Исследование технологии переработки золошлаковых отходов ТЭС при производстве строительных материалов // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 3. С. 60–64.
10. Malchik A. G., Litovkin S. V., Rodionov P. V., Kozik V.V., Gaydamak M.A. Analyzing the technology using ash and slag waste from thermal power plants in the production of building ceramics // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. no. 127. 012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/127/1/012024>.
11. Ковчур А. С., Шелег В. К., Ковчур С. Г., Гречаников А. В., Манак П. И., Захаренко А. В. Разработка технологии производства терракотовой керамической плитки с использованием техногенных продуктов энергетического комплекса // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2017. № 2 (33). С. 86–94.
12. Zhang X. D., Han Y. Thermal insulation properties of fly ash and waste polystyrene mixed block building materials // Chemical Engineering Transactions. 2016. Vol. 55. P. 253–258. <https://doi.org/10.3303/CET1655043>.
13. Абдрахимов В. З. Снижение экологического ущерба экосистемам за счет использования межсланцевой глины и золошлакового материала в производстве легковесного кирпича и пористого заполнителя // Уголь. 2018. № 10. С. 77–83.
14. Qin Z., Li G., Tian Y., Ma Y., Shen P. Numerical simulation of thermal conductivity of foam glass based on the steady-state method // Materials. 2019. Vol. 12, no. 1. P. 54. <https://doi.org/10.3390/ma12010054>.
15. Lee Y.-R., Soe J. T., Zhang S., Ahn J.-W., Park M. B., Ahn W.-S. Synthesis of nanoporous materials via recycling coal fly ash and other solid wastes: A mini review // Chemical Engineering journal. 2017. Vol. 317. P. 821–843. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.124>.
16. Li Y., Cheng X., Cao W., Gong L., Zhang R.,

Zhang H. Fabrication of adiabatic foam at low temperature with sodium silicate as raw material // *Materials and Design*. 2015. Vol. 88. P. 1008–1014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.078>.

17. Грицук А. И., Туманова С. А., Чаргазия Т. З., Бородай Д. И., Стукалов А. А. Эффективность использования золошлаков в дорожном строительстве // *Экономика строительства и городского хозяйства*. 2017. Т. 13. № 1. С. 81–91.

18. Hadbaatar A., Mashkin N. A., Stenina N. G. Study of ash-slag wastes of electric power plants of Mongolia applied to their utilization in road construction // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 1558–1562. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.111>.

19. Сигачев Н. П., Коновалова Н. А., Коннов В. И., Панков П. П., Ефименко Н. С. Эффективность использования золошлаковых отходов Забайкальского края в производстве дорожных цементогрунтов // *Экология и промышленность России*. 2015. Т. 19. № 11. С. 24–27. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-11-24-27>.

20. Маданбеков Н. Ж., Осмонова Б. Ж. Применение в асфальтобетонных смесях минерального порошка из золы уноса ТЭЦ г. Бишкек // *Вестник КГУСТА*. 2016. № 1 (51). С. 99–103.

21. Лунёв А. А., Сиротюк В. В., Иванов Е. В. Результаты исследований деформационных характеристик золошлаковых смесей // *Вестник СибАДИ*. 2017. Вып. 1 (53). С. 103–110.

22. Murko V., Khyamyalyainen V., Baranova M. Use of ash-and-slag wastes after burning of fine-dispersed coal-washing wastes // *E3S Web of conferences*. 2018. Vol. 41. P. 01042. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101042>.

23. Klamrassamee T., Pavasant P., Laosiripojana N. Synthesis of zeolite from coal fly ash: its application as water sorbent // *Engineering journal*. 2010. Vol. 14. P. 37–44. <https://doi.org/10.4186/ej.2010.14.1.37>.

24. Hamadi A., Nabih K. Synthesis of zeolites materials using fly ash and oil shale ash and their applications in removing heavy metals from aqueous solutions // *Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 2018. P. 6207910. <https://doi.org/10.1155/2018/6207910>.

25. Li Ch.-ch., Qiao X.-ch. A new approach to prepare mesoporous silica using coal fly ash // *Chemical Engineering journal*. 2016. Vol. 302. P. 388–394. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.029>.

26. Castillo X., Pizarro J., Ortiz C., Cid H., Flores M., De Canck E., Voort P. V. D. A cheap mesoporous silica from fly ash as an outstanding adsorbent for sulfate in water // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2018. Vol. 272. P. 184–192.

27. Nematollahi B., Sanjayan J. Effect of different superplasticizers and activator combinations of workability and strength of fly based geopolimer // *Materials and Design*. 2014. Vol. 57. P. 667–672. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.064>.

28. Gorhan G., Kurkly G. The influence of the NaOH

solution on the properties of the fly ash-based geopolimer mortal cured at different temperatures // *Composites: Part B*. 2014. Vol. 58. P. 371–377. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.082>.

29. Li Q., Xu H., Li F., Li P., Shen L., Zhai J. Synthesis of geopolimer composites from blends of CFBC fly and bottom ashes // *Fuel*. 2012. Vol. 97. P. 366–372. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.059>.

30. Jambhulkar H.P., Shaikh S.M.S., Kumar M.S. Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review // *Chemosphere*. 2018. Vol. 213. P. 333–344. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.045>.

31. Basu M., Pande M., Bhadoria P.B.S., Mahapatra S.C. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review // *Progress in Natural Science*. 2009. Vol. 19. P. 1173–1186. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.12.006>.

32. Гребенщиков Е. А., Юст Н. А., Пыхтеева М. А. Влияние химической мелиорации путем внесения золошлаковых отходов на физико-химические свойства почвы // *Вестник КрасГАУ*. 2016. № 6. С. 3–8.

33. Соловьев Л. П., Пронин В. А. Утилизация зольных отходов тепловых электростанций // *Современные наукоемкие технологии*. 2011. № 3. С. 40–42.

34. He H., Dong Z., Peng Q., Wang X., Fan C., Zhang X. Impacts of coal fly ash on plant growth and accumulation of essential nutrients and trace elements by alfalfa (*Medicago sativa*) grown in a loessial soil // *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 197. P. 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.028>.

35. Tripathi R. C., Masto R. E., Ram L. C. Bulk use of pond ash for cultivation of wheat-maize-eggplant crops in sequence on a fallow land // *Resources, Conservation and Recycling*. 2009. Vol. 54. P. 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.07.009>.

36. Arputha S. S., Narayanasamy P. Bio-efficacy of flyash-based herbal pesticides against pest of rice and vegetables // *Current Science*. 2007. Vol. 92 (6). P. 811–816.

37. Bagchi S. S., Jadhan R. T. Pesticide dusting powder formulation using flyash – A cost effective innovation // *Indian journal of Environmental Protection*. 2006. Vol. 26 (11). P. 1019–1021.

38. Сниккарс П. Н., Золотова И. Ю., Осокин Н. А. Утилизация золошлаков ТЭС как новая кроссотраслевая задача // *Энергетическая политика*. 2020. № 7 (149). С. 34–45. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_7149_34.

39. Srinivasa Rao C., Subha Lakshmi C., Tripathi V., Dubey R.K., Sudha Rani Y., Gangaiah B. Fly Ash and Its Utilization in Indian Agriculture: Constraints and Opportunities // *Circular Economy and Fly Ash Management*. Eds.: S. Ghosh, V. Kumar. Singapore: Springer, 2020. P. 27–46. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0014-5_3.

40. Золотова И. Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС // Инновации и инвестиции. 2020. № 7. С. 123–128.

41. Szerement J.; Szatanik-Kloc A.; Jarosz R.; Bajda T.; Mierzwa-Hersztek M. Contemporary applications of natural and synthetic zeolites from fly ash in agriculture and environmental protection // Journal of Cleaner Production. 2021. no. 311. P. 127461. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127461>.

42. Кондратенко Ю.А., Исхаков Х.А. Свойства летучей золы как субстрата почвы // Сибирский уголь в 21 веке. 2009. № 8-9. С. 30–31.

43. Юдахин Ф.Н., Белозерова Т.И. Способ рекультивации золоотвалов тепловых электростанций в условиях севера на примере Северодвинской ТЭЦ-1 // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2005. № 1. С. 35–42.

References

1. Zyryanov V. V., Zyryanov D. V. Fly ash is a technogenic raw material. Moscow: PPC "Maksa"; 2009. 320 p. (In Russ.).

2. Pichugin E. A. Analytical review of the experience of involving ash slag waste of thermal power plants in economic circulation in the Russian Federation. *Problemy regional'noi ekologii = Regional Environmental Issues*. 2019;4:77-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-14077>.

3. Kozhukhovskiy I. S., Velichko E. G., Tselykovskiy Yu. C., Tshovrebov E. S. Organizational, economic and legal aspects of creating and developing technological complexes on recycling ash and slag waste in construction and other products. *Vestnik MGSU*. 2019;14(6):756–773. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.6.756-773>.

4. Khudyakova L. I., Zalutskiy A. V., Paleev P. L. Use of ash and slag waste of thermal power plants. *XXI vek. Tekhnosferная bezopasnost' = XXI century. Technosphere Safety*. 2019;4(3):375-391. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2019-3-375-391>.

5. Entin Z. B., Nefedova L. S., Strzhalkovskaya N. V. Zoly TPP ash as raw materials for cement and concrete. *Cement and its Applications*. 2012; 2:40-46. (In Russ.).

6. Efremenko A. S., Khaltayeva E. P. Application of thermal power plant ash and slag waste in high-strength light concrete production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;8(91):86-89. (In Russ.).

7. Medvedeva G. A., Akhmetova R. T., Yusupova A. A. Influence of activating metal chloride additives in impregnating technology of heat power wastes recycling. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*. 2018;11(1):43-47. (In Russ.).

8. Gubar V. M., Petrik I. Iu., Zhiboedov A. V. Ways to improve the quality of fly ash of thermal power plant, used for high performance concrete. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury = Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2016;3:63-70. (In Russ.).

9. Malchik A. G., Litovkin S. V., Rodionov P. V. Research technology for processing waste TPP ash

and slag in construction materials production. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*. 2016;3:60-64. (In Russ.).

10. Malchik A. G., Litovkin S. V., Rodionov P. V., Kozik V.V., Gaydamak M.A. Analyzing the technology using ash and slag waste from thermal power plants in the production of building ceramics // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016;127:012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/127/1/012024>.

11. Kauchur A. S., Sheleh V. K., Kauchur S. G., Hrachanikau A. V., Manak P. I., Zakharenka A. V. Development of terracot ceramic tiles manufacturing technology with use of technogenic products of energy complex. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*. 2017;2(33):86-94. (In Russ.).

12. Zhang X.D., Han Y. Thermal insulation properties of fly ash and waste polystyrene mixed block building materials. *Chemical Engineering Transactions*. 2016;55:253–258. <https://doi.org/10.3303/CET1655043>.

13. Abdrakhimov V. Z. Environmental system damage mitigation due to interschistic clay and bottom-ash material application in lightweight brick and porous aggregate production. *Ugol' = Russian Coal Journal*. 2018;10:77–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-10-77-83>.

14. Qin Z., Li G., Tian Y., Ma Y., Shen P. Numerical simulation of thermal conductivity of foam glass based on the steady-state method. *Materials*. 2019;12(1):54. <https://doi.org/10.3390/ma12010054>.

15. Lee Y.-R., Soe J. T., Zhang S., Ahn J.-W., Park M. B., Ahn W.-S. Synthesis of nanoporous materials via recycling coal fly ash and other solid wastes: A mini review. *Chemical Engineering journal*. 2017;317:821-843. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.124>.

16. Li Y., Cheng X., Cao W., Gong L., Zhang R., Zhang H. Fabrication of adiabatic foam at low temperature with sodium silicate as raw material. *Materials and Design*. 2015;88:1008-1014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.078>.

17. Gritsuk A. I., Tumanova S. A., Chargazia N. Z., Boroday D. I., Stukalov A. A. Efficiency of use of

slag waste in road construction. *Ekonomika stroitel'stva i gorodskogo khozyaistva = Economics of Civil Engineering and Municipal Economy*. 2017;13(1):81-91. (In Russ.).

18. Hadbaatar A., Mashkin N. A., Stenina N. G. Study of ash-slag wastes of electric power plants of Mongolia applied to their utilization in road construction. *Procedia Engineering*. 2016;150:1558-1562.

19. Sigachev N. P., Konovalova N. A., Konnov V. I., Pankov P. P., Yefimenko N. S. The effectiveness of the use of the Zabaykalsky territory ash and slag waste in the production of road cement soils. *Ekologiya i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(11):24-27. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-11-24-27>.

20. Madanbekov N. J., Osmonova B. J. Application in asphalt concrete mixtures a mineral powder from an ash carryover from the thermoelectric power center of Bishkek city. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova = The herald of Kyrgyz state university of construction, transport and architecture named after N. Isanov*. 2016;1(51):99-103. (In Russ.).

21. Lunev A. A., Sirotyuk V. V., Ivanov E. V. Experimental research of the deformation properties of ash and slag mixtures. *Vestnik SibADI = The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;1(53):103-110. (In Russ.).

22. Murko V., Khyamyalyainen V., Baranova M. Use of ash-and-slag wastes after burning of fine-dispersed coal-washing wastes. *E3S Web of conferences*. 2018;41:01042. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101042>.

23. Klamrassamee T., Pavasant P., Laosiripojana N. Synthesis of zeolite from coal fly ash: its application as water sorbent. *Engineering journal*. 2010;14:37-44. <https://doi.org/10.4186/ej.2010.14.1.37>.

24. Hamadi A., Nabih K. Synthesis of zeolites materials using fly ash and oil shale ash and their applications in removing heavy metals from aqueous solutions. *Journal of Chemistry*. 2018;2018:6207910. <https://doi.org/10.1155/2018/6207910>.

25. Li Ch.-ch., Qiao X.-ch. A new approach to prepare mesoporous silica using coal fly ash. *Chemical Engineering journal*. 2016;302:388-394. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.029>.

26. Castillo X., Pizarro J., Ortiz C., Cid H., Flores M., De Canck E., Voort P. V. D. A cheap mesoporous silica from fly ash as an outstanding adsorbent for sulfate in water. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2018;272:184-192.

27. Nematollahi B., Sanjayan J. Effect of different superplasticizers and activator combinations of workability and strength of fly based geopolimer. *Materials and Design*. 2014;57:667-672. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.064>.

28. Gorhan G., Kurkly G. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geo-

polymer mortal cured at different temperatures. *Composites. Part B*. 2014;58:371-377.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.082>.

29. Li Q., Xu H., Li F., Li P., Shen L., Zhai J. Synthesis of geopolimer composites from blends of CFBC fly and bottom ashes. *Fuel*. 2012;97:366-372. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.059>.

30. Jambhulkar H. P., Shaikh S. M. S., Kumar M. S. Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review. *Chemosphere*. 2018;213:333-344. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.045>.

31. Basu M., Pande M., Bhadoria P.B.S., Mahapatra S.C. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. *Progress in Natural Science*. 2009;19:1173-1186. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.12.006>.

32. Grebenschikova E. A., Yust N. A., Pukhteeva M. A. The influence of chemical melioration on physical and chemical properties of the soil by introduction of ash waste. *Vestnik KrasGAU = Vestnik KrasGAU*. 2016;6:3-8. (In Russ.).

33. Solovjev L. P., Pronin V. A. Increase of ecological safety of thermal power stations by recycling of the cindery waste. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*. 2011;3:40-42. (In Russ.).

34. He H., Dong Z., Peng Q., Wang X., Fan C., Zhang X. Impacts of coal fly ash on plant growth and accumulation of essential nutrients and trace elements by alfalfa (*Medicago sativa*) grown in a loessial soil. *Journal of Environmental Management*. 2017;197:428-439.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.028>.

35. Tripathi R.C., Masto R.E., Ram L.C. Bulk use of pond ash for cultivation of wheat-maize-eggplant crops in sequence on a fallow land. *Resources, Conservation and Recycling*. 2009;54:134-139. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.07.009>.

36. Arputha S.S., Narayanasamy P. Bio-efficacy of flyash-based herbal pesticides against pest of rice and vegetables. *Current Science*. 2007;92(6):811-816.

37. Bagchi S. S., Jadhan R. T. Pesticide dusting powder formulation using flyash – A cost effective innovation. *Indian journal of Environmental Protection*. 2006;26(11):1019-1021.

38. Snikkars P. N., Zolotova I. Yu., Osokin N. A. Increasing coal combustion product utilization in Russia as a crossindustry goal. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2020;7:34-45. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_7149_34.

39. Srinivasa Rao C., Subha Lakshmi C., Tripathi V., Dubey R. K., Sudha Rani Y., Gangaiah B. Fly Ash and Its Utilization in Indian Agriculture: Constraints and Opportunities. In: Circular Economy and Fly Ash Management. Ghosh S., Kumar V. (Eds.). Singapore: Springer; 2020. p. 27-46. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0014-5_3.

40. Zolotova I. Yu. Benchmarking of foreign experi-

ence in utilization of solid fuel combustion products of coal-fired thermal power plants. *Innovatsii i investitsii*. 2020;7:123-128. (In Russ.).

41. Szerement J., Szatanik-Kloc A., Jarosz R., Bajda T., Mierzwa-Hersztek M. Contemporary applications of natural and synthetic zeolites from fly ash in agriculture and environmental protection. *Journal of Cleaner Production*. 2021;311:127461. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127461>.

42. Kondratenko Yu. A., Iskhakov H. A. Properties of fly ash as a soil substrate. *Sibirskii ugol' v 21 veke*. 2009;8-9:30-31. (In Russ.).

43. Yudaknin F. N., Belozerova T. I. The method of ash dumps reclamation at the heat stations in the north by the example of Severodvinsk heat station. *Geoecologia, inzhenernaia geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2005;1:5-42. (In Russ.).

Информация об авторах

П. Л. Палеев,

кандидат технических наук,
научный сотрудник лаборатории химии
и технологии природного сырья,
Байкальский институт природопользования
СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

Л. И. Худякова,

доктор технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
химии и технологии природного сырья,
Байкальский институт природопользования
СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 11.10.2021.
Одобрена после рецензирования 15.11.2021.
Принята к публикации 30.11.2021.*

Information about the authors

Pavel L. Paleev,

Cand. Sci. (Eng.),
Researcher of Laboratory of Chemistry
and Technology of Natural Resources,
Baikal Institute of Nature Management
SB RAS,
6 Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia

Liudmila I. Khudyakova,

Dr. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of Laboratory of Chemistry
and Technology of Natural Resources,
Baikal Institute of Nature Management
SB RAS,
6 Sakhyanova St., Ulan-Ude 670047, Russia

Contribution of the author's

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

*All authors have read and approved the final
manuscript.*

*The article was submitted 11.10.2021.
Approved after reviewing 15.11.2021.
Accepted for publication 30.11.2021.*