

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ТОКСИКОЛОГИЯ ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2024

Морозов А.Д., Горленко А.С., Лунегова Л.И., Яковлев А.С.

# Влияние состава и происхождения золошлаковых отходов угольной генерации на отклик организмов, применяемых в биотестировании

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, г. Москва, Российская Федерация

### РЕЗЮМЕ

**Введение.** Многообразие условий происхождения золошлаковых отходов оказывает значительное влияние на их конечные свойства.

**Материал и методы.** Работа посвящена поиску и установлению зависимостей влияния происхождения золошлаковых отходов на их химические и биологические показатели путем комплексной оценки результатов воздействия золошлаковых отходов на показатели жизнедеятельности гидробионтов.

**Результаты.** Исследованы значения откликов гидробионтов для золошлаковых отходов, образованных от углей различного происхождения. Проведена оценка компонентного состава водных вытяжек из исследуемых проб золошлаков. Установлены зависимости влияния условий происхождения золошлаковых отходов на их конечные химические и биологические свойства.

**Ограничения исследования.** Проведена оценка биологических и химических показателей золошлаковых отходов, образующихся при сжигании углей из шести различных месторождений. Общий объем исследуемой выборки составил 95 проб.

**Заключение.** Золошлаковые отходы, образованные от сжигания бурых углей, оказывают наиболее выраженное токсическое воздействие на гидробионты, в отличие от золошлаков каменных углей.

**Ключевые слова:** золошлаковые отходы; оценка токсичности

**Соблюдение этических стандартов.** Исследование не требует представления заключения этического комитета.

**Для цитирования:** Морозов А.Д., Горленко А.С., Лунегова Л.И., Яковлев А.С. Влияние состава и происхождения золошлаковых отходов угольной генерации на отклик организмов, применяемых в биотестировании. *Токсикологический вестник*. 2024; 32(4): 239–247. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-4-239-247>

**Для корреспонденции:** Морозов Александр Дмитриевич, аспирант кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Российская Федерация. E-mail: aldmto@mail.ru

**Участие авторов:** Морозов А.Д. – сбор и обработка материала, написание текста; Горленко А.С. – концепция и дизайн исследования, редактирование; Лунегова Л.И. – статистический анализ; Яковлев А.С. – редактирование. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила в редакцию: 29 декабря 2023 / Принята в печать: 10 июля 2024 / Опубликовано: 30 августа 2024

Alexandr D. Morozov, Anastasiya S. Gorlenko, Lada I. Lunegova, Alexandr S. Yakovlev

# The influence of the composition and origin of ash and slag waste from coal generation on the response of organisms used in biotesting

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lomonosov Moscow State University», 119991, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** Different conditions of origin of ash and slag wastes has a significant impact on their final properties.

**Material and methods.** The work is devoted to the search and establishment of dependencies of the influence of the origin of ash and slag waste on their chemical and biological parameters by a comprehensive assessment of the results of the impact of ash and slag waste on the vital signs of hydrobionts.

**Results.** The values of the responses of hydrobionts for ash and slag wastes formed from coals of various origins were investigated. The component composition of aqueous extracts from the studied ash slag samples was evaluated. The dependences of the influence of the conditions of origin of ash and slag wastes on their final chemical and biological properties were established.

**Limitations.** An assessment of the biological and chemical properties of ash and slag waste generated during the combustion of coal from six different deposits was carried out. The total volume was 95 samples.

**Conclusion.** Ash and slag wastes formed from the burning of brown coals have the most pronounced toxic effect on hydrobionts, unlike ash and slag from coal.

**Keywords:** ash and slag waste; toxicity assessment

**Compliance with ethical standards.** The study does not require the conclusion of an ethics committee.

**For citation:** Morozov A.D., Gorlenko A.S., Lunegova L.I., Yakovlev A.S. The influence of the composition and origin of ash and slag waste from coal generation on the response of organisms used in biotesting. *Toksikologicheskiy vestnik (Toxicological review)*. 2024; 32(4): 239–247. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-4-239-247> (in Russian)

**For correspondence:** Alexander D. Morozov, Postgraduate student of the Department of Land Resources and Soil Assessment of the Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University. 119991, Moscow, Russian Federation. E-mail: aldmmo@mail.ru

**Authors' contributions:** Morozov A.D. – the collection and processing of the material, writing a text; Gorlenko A.S. – the concept and design of the study, editing; Lunegova L.I. – statistical analysis; Yakovlev A.S. – editing. All co-authors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The study had no sponsorship.

Received: December 29, 2023 / Accepted: July 10, 2024 / Published: August 30, 2024

## Введение

Российская Федерация обладает разведанными и освоенными крупными месторождениями угля и занимает четвёртое место в мире по запасам углей различных видов [1]. Несмотря на стремительное развитие других направлений энергетического сектора и мировой политики в отношении более экологичных источников энергии, за счёт колоссальных запасов сырья угольная генерация в России продолжает играть значительную роль в энергетической системе страны и составляет около 13% от общей выработки энергии [2]. Сжигание углей в таких крупных объёмах влечёт за собой значительную нагрузку на компоненты окружающей среды (ОС) за счёт попадания в них

продуктов горения углей в виде газов, мелкодисперсных частиц сажи, золошлаковых отходов.

Золошлаковые отходы (ЗШО) – класс промышленных отходов, образующихся при сжигании углей в ходе осуществления хозяйственной деятельности тепловых электростанций (ТЭЦ) и государственных районных электростанций (ГРЭС). ЗШО представляют собой твердые, мелкодисперсные частицы, состоящие из летучей золы и твёрдого минерального остатка – шлака [3].

В угольной генерации в качестве основного топлива используются гумусовые угли, к группе которых относятся торф, бурый уголь, каменный уголь и антрациты, которые различаются по степени метаморфизма (углефикации), по мере увеличения последней в углях возрастает содержание

углерода с одновременным снижением содержания гуминовых кислот, кислорода, водорода, лёгких углеводородов, воды и других элементов. Так, средние показатели содержания углерода в торфе – 50% ( $\rho = 1,0\text{--}1,2 \text{ г/см}^3$ ), в буром угле – 65–70% ( $\rho = 1,2\text{--}1,5 \text{ г/см}^3$ ), в каменном угле – 75–95% ( $\rho = 1,5\text{--}1,7 \text{ г/см}^3$ ), в антраците – 95% углерода [4, 5]. Противоположной общему содержанию углерода в угле и не менее важной характеристикой является его зольность – процентное содержание негорючего остатка. Угли с высокой зольностью (торф, бурый уголь) обладают меньшей теплотой сгорания и большей долей образования негоревших минеральных примесей, в сравнении с углями с низкой зольностью (каменные угли, антрациты). Таким образом, применение различных видов угля на объектах угольной тепло- и электрогенерации может оказывать прямое влияние на конечные характеристики ЗШО.

Результаты исследований в сфере угольной промышленности свидетельствуют о том, что состав ЗШО неоднороден, но преимущественно представлен оксидами основных породообразующих элементов [6], характерных для осадочных горных пород, вследствие чего ЗШО в целом не должны оказывать негативного воздействия на состояние ОС. Однако исходное топливо (уголь) может содержать тяжелые металлы, такие как Pb, Cd, As, Cu, Zn, Ni, Hg и др. [7, 8], которые попадают в состав угля из первоначального растительного материала, а также поступают из ОС в процессе многолетнего метаморфизма. В процессе горения эти компоненты концентрируются в ЗШО, так как металлы имеют высокую температуру кипения и не могут улетучиваться, а те компоненты, которые могут выделяться в газообразной форме, оседают на поверхности взвешенных частиц золы. Кроме того, ЗШО в значительной степени содержат оксиды кальция, магния, калия и натрия [9, 10], которые при взаимодействии с водой, образуют щелочные растворы, вследствие чего для золошлаков характерны высокие щелочные значения pH – в среднем 8–9 ед. pH для золошлаков, образованных от сжигания каменных углей, и 9–12 ед. pH для золошлаков, образованных от сжигания бурых углей.

Такое варьирование показателей компонентного состава ЗШО может соответственно определять уровень их негативного воздействия на ОС, что будет отражаться на показателях токсичности золошлаков.

С учётом изложенного, важным аспектом при обращении с ЗШО является установление закономерностей влияния совокупности условий их

происхождения и состава на показатели их токсичности, что позволит разрабатывать более целенаправленные и эффективные методы их размещения и утилизации, а также принимать обоснованные решения в разработке и корректировке технической документации в сфере применения отходов угольной тепло- и электроэнергетики.

Наиболее распространённый способ обращения с ЗШО предполагает их размещение на специально оборудованных сооружениях – золоотвалах/полигонах/шламохранилищах с применением систем гидроудаления. При таком способе наиболее уязвимыми компонентами природной среды оказываются близлежащие почвы и грунтовые воды в связи с возможной инфильтрацией поверхностных и внутригрунтовых стоков, содержащих токсичные компоненты золошлаков – в ряде работ [8, 11] отмечено превышение концентраций тяжелых металлов в ЗШО над ПДК и ОДК почв как в самих местах размещения отхода, так и за их пределами вследствие влияния различных механизмов переноса твердых частиц.

Для объективной оценки степени негативного воздействия золошлаков на компоненты природной среды, целесообразно рассматривать методы биотестирования, основанные на оценке влияния водной вытяжки из золошлаков на жизненные показатели водных организмов (выживаемость, скорость размножения). Основы данного метода заключаются в исследовании токсического действия водной вытяжки из отходов (в соотношении отхода и воды 1:10) на гидробионтов, среди которых наиболее часто используются дафнии, инфузории, цериодафнии, бактерии, водоросли и т.п. [12, 13]. С учётом различной чувствительности к воздействию токсикантов каждого из перечисленных тест-организмов для оценки токсичности водной вытяжки из отходов принято использовать не менее двух тест-объектов из разных таксономических групп. Гибель гидробионтов в водных вытяжках может быть обусловлена не только действием токсичных компонентов отхода, но и повышенным осмотическим давлением, обусловленным высокой концентрацией нетоксичных солей, а также значением водородного показателя [14]. Как отмечалось ранее, для ЗШО характерна высокощелочная реакция среды в пределах от 8 до 12 ед. pH. При экспозиции тест-объектов в такой среде будет наблюдаться отрицательная динамика их жизненных показателей. Однако, находясь в ОС в контакте с атмосферным воздухом, ЗШО оказываются участниками природных естественных процессов стабилизации реакции среды, таких как диссипация, окисление, гидролиз, а также

подвергаются воздействию биологических факторов (например, жизнедеятельность бактерий), что в совокупности, постепенно, стабилизирует значения рН их среды. Так, присутствующий в золошлаках оксид кальция (CaO) при контакте с водой образует гидроксид кальция (Ca(OH)<sub>2</sub>), который при последующем контакте с углекислым газом (CO<sub>2</sub>) атмосферного воздуха образует труднорастворимый карбонат кальция (CaCO<sub>3</sub>), с одновременным снижением рН к нейтральным значениям [15]. С учётом данного природного процесса снижения рН среди аттестованных методик для оценки токсичности ЗШО разработаны специализированные подходы, предполагающие нейтрализацию водной вытяжки до естественных значений путём её барботирования углекислым газом (CO<sub>2</sub>) (Методика определения токсичности золошлаковых отходов методом биотестирования на основе выживаемости парameций и цериодафний (ФР.1.39.2007.04104, ПНД Ф Т 16.3.12-07<sup>1</sup>).

*Цель исследования* – оценка влияния ЗШО различного происхождения на показатели жизнедеятельности организмов, применяемых в биотестировании. Объект исследования – показатели токсичности ЗШО, образованных от сжигания углей различного происхождения.

В рамках настоящей работы проводились исследования химических и биологических показателей ЗШО, образованных от сжигания каменных и бурых углей различных месторождений:

Каменные угли: *Каа-Хемское, Хакасское, Кузнецкое угольные месторождения*;

Бурые угли: *Березовское, Бородинское, Ирша-Бородинское угольные месторождения*.

Кроме того, в исследуемых пробах ЗШО дополнительно учитывалась совокупность условий обращения с ними, а именно: способ улавливания и удаления золы и шлака (жидкое / твердое); срок складирования (свежая партия (отбор из потока) / лежалые (>1 мес); особенности обустройства золоотвала (одноуровневый / разноуровневый (террасирование); условия эксплуатации золоотвала (периодическое удаление ЗШО / наращивание тела дамбы)).

## Материал и методы

Для оценки влияния состава и происхождения ЗШО на показатели их токсичности применены методы количественного химического анализа

<sup>1</sup> Методика определения токсичности золошлаковых отходов методом биотестирования на основе выживаемости парameций и цериодафний, ФР.1.39.2007.04104. ПНД Ф Т 16.3.12-07. М.: МГУ; 2008. 30 с. (Терехова В.А., Дик Э.П., Соболева А.Н., Вавилова В.М.). (ЛЭТАП МГУ и ОАО «ВТИ»).

состава ЗШО, методы оценки воздействия отходов на отклик жизнедеятельности гидробионтов (биотестирование), а также методы статистической обработки данных.

Методы биотестирования основаны на использовании живых организмов, таких как высшие растения, водные организмы (гидробионты), бактерии и другие для оценки токсичности и загрязнения компонентов ОС. Изучалось острое токсическое действие водных вытяжек из отходов ЗШО различного происхождения на отклик инфузорий *Paramecium caudatum* и цериодафний *Ceriodaphnia affinis*, в соответствии с методикой ФР.1.39.2007.04104.

Для поиска зависимостей компонентного состава водных вытяжек из ЗШО на отклик гидробионтов, применяемых в биотестировании, использовались методы количественного химического анализа – определялся компонентный состав водных вытяжек на содержание следующих элементов: Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Sr, V, Zn, а также рН, хлориды, нитраты, сульфаты, солесодержание (по NaCl). Содержание компонентов определяли с применением методик: ГОСТ 31870–2012<sup>2</sup> (для металлов), ГОСТ 31867–2012<sup>3</sup> (для анионов).

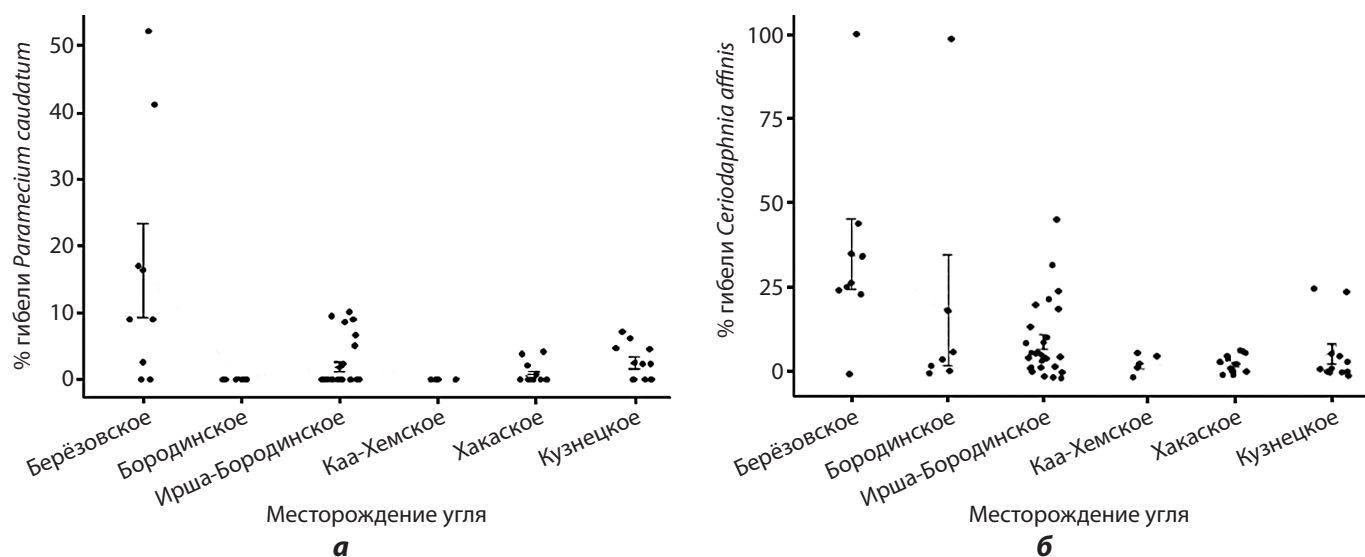
Полученные результаты обрабатывали статистическими методами анализа. Исследуемую совокупность данных разделяли на группы и факторы по определенным критериям. Группы и факторы используются для анализа взаимосвязей между переменными, выявления тенденций и закономерностей. Факторы выступают в качестве независимых переменных, которые могут влиять на зависимую, исследуемую переменную – группу.

Для оценки зависимости отклика гидробионтов на состав и условия происхождения ЗШО применён однофакторный дисперсионный анализ: данный анализ позволяет определить наличие статистически значимых различий между группами и, следовательно, оценить влияние фактора проанализированных объектов, что позволяет в свою очередь оценить значимость влияния рассматриваемого фактора.

<sup>2</sup> Межгосударственный стандарт ГОСТ 31870–2012 «Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектроскопии» (ISO 5961:1994, NEQ). (ISO 9174:1998, NEQ). (ISO 11885:2007, NEQ) (введён в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 ноября 2012 г. N 1619-ст). М.: Стандартинформ; 2013.

<sup>3</sup> Межгосударственный стандарт ГОСТ 31867–2012 «Определение содержания анионов методом хроматографии и капиллярного электрофореза» (ISO 10304-4:1997, NEQ) (введён в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 ноября 2012 г. N 1616-ст). Дата введения 1 января 2014 г. М.: Стандартинформ; 2014.





**Рис. 1.** Влияние происхождения угля на отклики тест-объектов (экспозиция с нейтрализацией):  
а – инфузории *Paramecium caudatum*; б – цериодафнии *Ceriodaphnia affinis*.

**Fig. 1.** The influence of the origin of coal on the responses of test objects (exposure with neutralization):  
а – infusoria *Paramecium caudatum*; б – ceriodaphnia *Ceriodaphnia affinis*.

Отбор проб проводился с учётом отдельных особенностей происхождения отходов. Объём выборки составил 95 проб, различающихся по следующим факторам: тип угля, месторождение угля, способы обращения с ЗШО, нейтрализация водной вытяжки из пробы. Исследуемые группы: химический состав, отклик инфузорий и цериодафний в водной вытяжке из пробы.

## Результаты

Проведена оценка воздействия водных вытяжек из золошлаков, образованных от сжигания бурых и каменных углей различных месторождений, на отклик инфузорий и цериодафний

в соответствии с методикой ФР.1.39.2007.04104 (с применением процесса нейтрализации). Оценивался процент смертности инфузорий за 24 ч и цериодафний за 48 ч после начала экспозиции.

Проведенный дисперсионный анализ позволил определить средние значения гибели тест-объектов в водных вытяжках из проб, различающихся по происхождению. Кроме того, на основе выборки данных и статистического распределения установлены доверительные интервалы (на графиках представлены в виде двусторонних линий, показывающих интервал в пределах одной стандартной ошибки от среднего значения, в таблицах в виде значений со знаком «±»). Результаты отражены на рис. 1 и в табл. 1.

Дополнительно оценивался отклик тест-объектов без предварительной нейтрализации водных вытяжек, с целью выявления зависимости влияния реакции среды (рН). Результаты отражены на рис. 2 и в табл. 2.

Полученные данные свидетельствуют об остром токсическом воздействии водной вытяжки без нейтрализации ЗШО бурых углей на гидробионтов, в отличие от ЗШО каменных углей. Среди бурых углей выделяется группа, характеризующаяся наибольшей токсичностью: ЗШО от сжигания бурых углей Березовского и Бородинского месторождений. При нейтрализации наблюдается общая динамика снижения острого токсического действия на гидробионтов в водных вытяжках как от бурых, так и от каменных углей. Процесс нейтрализации свидетельствует о том, что корректировка химических параметров водной вытяжки с учётом химических процессов,

Таблица 1 / Table 1  
**Значения отклика тест-объектов для золошлаков от углей различного происхождения (экспозиция с нейтрализацией), % ± SD**  
**Response values of test objects for ash and slag from coals of various origins (exposure with neutralization), % ± SD**

Месторождение угля	Тип угля	Среднее значение отклика тест-объекта в исследуемой выборке проб, %	
		инфузории, гибель	цериодафнии, гибель
Березовское	Бурый	16,4 ± 6,98	35,0 ± 10,31
Бородинское	Бурый	0,0 ± 0	18,33 ± 16,36
Ирша-Бородинское	Бурый	1,91 ± 0,69	8,89 ± 2,16
Каа-Хемское	Каменный	0,0 ± 0	5,0 ± 2,5
Хакасское	Каменный	0,78 ± 0,43	2,31 ± 0,72
Кузнецкое	Каменный	2,49 ± 0,83	5,45 ± 2,97

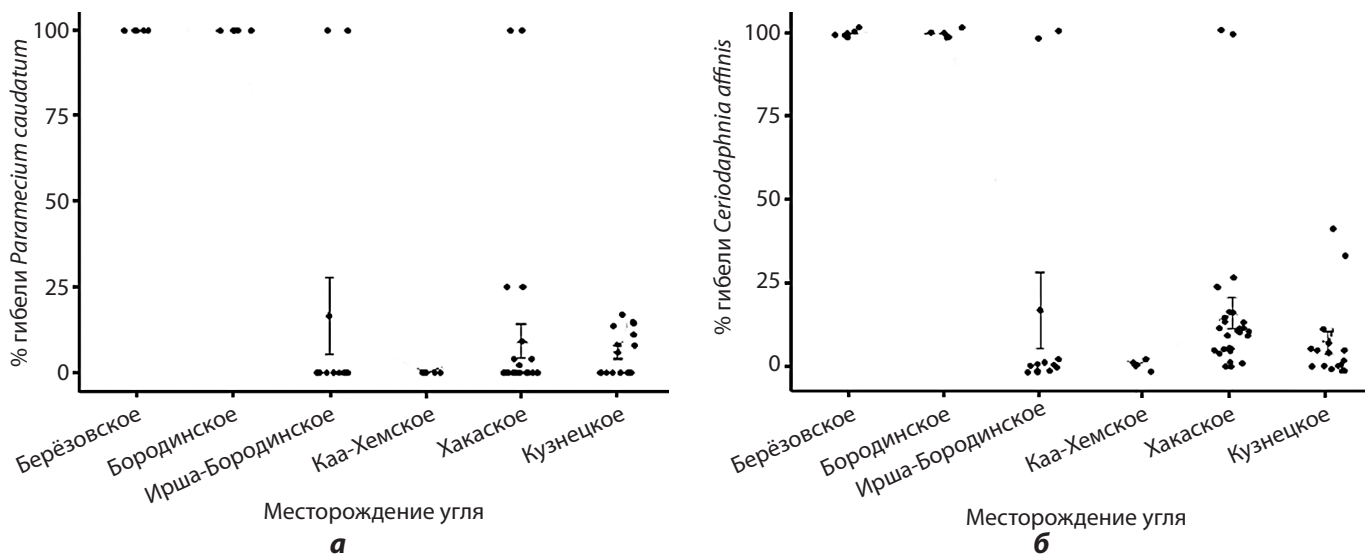


Рис. 2. Влияние происхождения угля на отклики тест-объектов (экспозиция без нейтрализации): а – инфузории *Paramecium caudatum*; б – цериодафнии *Ceriodaphnia affinis*.

Fig. 2. The influence of the origin of coal on the responses of test objects (exposure without neutralization): а – infusoria *Paramecium caudatum*; б – ceriodaphnia *Ceriodaphnia affinis*.

характерных для условий складирования ЗШО в ОС, приводит к изменению отклика тест-объектов. Токсические свойства сохраняются только в отношении ЗШО, образованных от сжигания бурых углей Березовского и Бородинского месторождений. При этом по результатам оценки влияния условий обращения с ЗШО такое сохранение токсичных свойств оказалось характерно для проб, отобранных в следующих условиях: способ улавливания и удаления золы и шлака – «сухой»; срок складирования – «свежая партия». Влияние остальных условий (особенности обустройства золошлакоотвала; условия эксплуатации золоотвала) на отклик гидробионтов оказалось статистически не значимым.

Проведён количественный химический анализ водных вытяжек из ЗШО для выявления компонентов, оказывающих значимое влияние на отклик тест-объектов. Водные вытяжки анализировались как до, так и после нейтрализации. Анализировались следующие элементы: Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, S, Sr, V, Zn, а также рН, хлориды, нитраты, сульфаты, солесодержание (по NaCl).

Предварительно проводилось выявление тесной связи типа угля и компонентного состава водных вытяжек. Месторождение угля не учитывалось, пробы классифицировались по общему признаку – тип угля (бурый/каменный). Результаты анализа компонентного состава водных вытяжек отражены в табл. 3.

Для ряда исследуемых компонентов выявлены статистически значимые различия ( $p < 0,05$ ), то есть обнаруженные различия между группами

и факторами с вероятностью 95% оказываются истинными и не являются случайными: в общем случае для золошлаков, образующихся в результате сжигания бурых углей, характерны более высокие значения реакции среды (рН), содержание хлоридов, кальция, хрома, калия, натрия, стронция, легкорастворимых солей (по NaCl). В свою очередь золошлаки, образованные от сжигания каменных углей, характеризуются повышенным содержанием алюминия и магния.

Для выявления компонентов водной вытяжки, увеличение концентрации которых может негативно сказываться на отклике тест-объектов, проводился дисперсионный анализ, в ходе

Таблица 2 / Table 2

**Значения отклика тест-объектов для золошлаков от углей различного происхождения (экспозиция без нейтрализации), % ± SD**  
Response values of test objects for ash and slag from coals of various origins (exposure with neutralization), % ± SD

Месторождение угля	Тип угля	Среднее значение отклика тест-объекта в исследуемой выборке проб, %	
		инфузории, гибель	цериодафнии, гибель
Березовское	Бурый	100 ± 0	100 ± 0
Бородинское	Бурый	100 ± 0	100 ± 0
Ирша-Бородинское	Бурый	16,67 ± 11,24	16,67 ± 11,24
Каа-Хемское	Каменный	0	0
Хакасское	Каменный	9,3 ± 5	16,07 ± 4,67
Кузнецкое	Каменный	5,85 ± 1,77	7,0 ± 3,3

Таблица 3 / Table 3

**Компонентный состав водных вытяжек из проб отходов различного происхождения,  $Me \pm SD$**   
**The component structure of water extracts from waste samples of various origins,  $Me \pm SD$**

Компонент	Среднее значение содержания компонента в исследуемой выборке проб	
	для ЗШО бурых углей	для ЗШО каменных углей
pH, ед.	10,63 ± 0,17	9,04 ± 0,09
Хлориды, мг/дм <sup>3</sup>	72,31 ± 32,01	28,61 ± 0,21
Нитраты, мг/дм <sup>3</sup>	3,75 ± 0,6	2,93 ± 0,12
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup>	119,69 ± 25,54	89,87 ± 9,63
Солесодержание (с NaCl), мг/дм <sup>3</sup>	0,65 ± 0,24	0,22 ± 0,01
Al, мг/дм <sup>3</sup>	0,98 ± 0,26	1,59 ± 0,29
Ba, мг/дм <sup>3</sup>	0,33 ± 0,13	0,1 ± 0,01
Ca, мг/дм <sup>3</sup>	76,64 ± 49,54	51 ± 2,44
Cr, мг/дм <sup>3</sup>	0,04 ± 0,02	0,01 ± 0
Cu, мг/дм <sup>3</sup>	0,0 ± 0	0,0 ± 0
Fe, мг/дм <sup>3</sup>	0,05 ± 0	0,05 ± 0
K, мг/дм <sup>3</sup>	38,34 ± 13,49	7,38 ± 0,86
Mg, мг/дм <sup>3</sup>	2,65 ± 0,73	15,13 ± 2,38
Mn, мг/дм <sup>3</sup>	0,0 ± 0	0,0 ± 0
Mo, мг/дм <sup>3</sup>	0,05 ± 0	0,04 ± 0
Na, мг/дм <sup>3</sup>	136,04 ± 58,11	23,23 ± 1,09
Ni, мг/дм <sup>3</sup>	0,0 ± 0	0,0 ± 0
Sr, мг/дм <sup>3</sup>	8,98 ± 3,55	0,74 ± 0,09
V, мг/дм <sup>3</sup>	0,02 ± 0	0,02 ± 0
Zn, мг/дм <sup>3</sup>	0,0 ± 0	0,0 ± 0

Таблица 4 / Table 4

**Среднее содержание компонента в водной вытяжке, при котором возникает характерный отклик гидробионтов (для инфузорий), % ± SD**

**The average content of the component in the aqueous extract, at which a characteristic response of hydrobionts occurs (for infusoria), % ± SD**

Компонент	Среднее значение содержания компонента в исследуемой выборке проб	
	гибель инфузорий ≤10%	гибель инфузорий >10%
pH, ед.	7,69 ± 0,14	9,0 ± 0,41
Al, мг/дм <sup>3</sup>	0,77 ± 0,16	1,34 ± 0,27
Ba, мг/дм <sup>3</sup>	0,32 ± 0,06	0,83 ± 0,26
Ca, мг/дм <sup>3</sup>	98,83 ± 17,18	291,12 ± 93,6

которого в роли исследуемых групп выступали средние значения концентраций элементов в водных вытяжках, а в роли независимых факторов – процент гибели гидробионтов. При этом в качестве значений факторов взяты показатели гибели гидробионтов равные ≤10% и >10%, которые в соответствии с методиками биотестирования определяются как отсутствие/наличие острого токсического действия на гидробионты, соответственно. Таким образом, при оценке влияния отдельных компонентов водных вытяжек на отклик гидробионтов, влияние оценивалось как негативное при показателе гибели какого-либо из тест-объектов, равному более 10%.

В ходе анализа выявлены статистически значимые различия ( $p < 0,05$ ): на отклик инфузорий в наибольшей степени оказывают влияние высокие значения pH, а также рост концентраций алюминия, бария и кальция. В свою очередь, на отклик цериодафний оказывают влияние высокие значения pH, рост концентрации калия. Результаты отражены в табл. 4 и 5.

Дополнительно проводился сравнительный анализ компонентного состава водных вытяжек до и после процесса нейтрализации. Выделена группа компонентов, на которую процесс нейтрализации оказывает значительное влияние (табл. 6).

Таблица 5 / Table 5

**Среднее содержание компонента в водной вытяжке, при котором возникает характерный отклик гидробионтов (для цериодафний), % ± SD**  
**The average content of the component in the aqueous extract, at which a characteristic response of hydrobionts occurs (for ceriodaphnia), % ± SD**

Компонент	Среднее значение содержания компонента в исследуемой выборке проб	
	гибель цериодафний ≤10%	гибель цериодафний >10%
pH, ед.	7,7 ± 0,14	8,96 ± 0,39
K, мг/дм <sup>3</sup>	12,11 ± 1,46	32,84 ± 11,71

Таблица 6 / Table 6

**Компонентный состав водных вытяжек до и после нейтрализации,  $Me \pm SD$**   
**The component structure of water extracts before and after neutralization,  $Me \pm SD$**

Компонент	Среднее значение содержания компонента в исследуемой выборке проб	
	до	после
pH, ед.	9,69 ± 0,17	6,93 ± 0,21
Al, мг/дм <sup>3</sup>	1,34 ± 1,21	0,94 ± 1,29

По результатам анализа водных вытяжек до и после нейтрализации, среди статистически значимых различий наблюдается снижение концентрации иона алюминия, а также стабилизация рН до значений, близких к нейтральной среде, независимо от характера происхождения ЗШО.

## Обсуждение

В Российской Федерации разведано свыше трехсот угольных месторождений [1]. В настоящем исследовании проводилась оценка ЗШО, образовавшихся при сжигании каменных и бурых углей из шести месторождений. Совокупность исследуемых показателей, а также объём выборки (95 проб) в рамках настоящего исследования позволяет сформировать общие представления о возможном влиянии условий происхождения ЗШО на их конечные свойства.

С учётом существующих правил отнесения отходов производства и потребления к конкретному классу опасности, полученные результаты свидетельствуют о том, что ЗШО, образованные от сжигания каменных углей, преимущественно относятся к 5-му классу опасности, в то время как ЗШО, образованные от сжигания бурых углей, – к 6-му классу опасности. Однако такое проявление токсичности некоторых классов ЗШО преимущественно наблюдается в пробах, отобранных с учетом конкретных особенностей их происхождения (например, маленький срок складирования, сухой способ улавливания и удаления), и не проявляется в объединенных пробах, отобранных с учетом совокупности множества других условий образования ЗШО на конкретных объектах угольной генерации.

Министерством энергетики Российской Федерации предложен комплексный план<sup>4</sup> по повышению объёмов утилизации ЗШО к 2035 г., в котором предложены мероприятия по развитию различных технологий их применения. ЗШО могут успешно применяться во многих областях, таких как: дорожное хозяйство, производство строительных материалов, рекультивация земель и иных сферах. Практическое применение полученных результатов становится важным в области восстановления нарушенных земель (рекультивация) – находясь в ОС в роли её компонента, рекультиванты на основе ЗШО могут являться ксенобиотиками для окружающей биоты. Для понимания того, будут ли такие рекультиванты сохранять благоприятный статус ОС, в будущих работах целесообразно провести комплексную

оценку их воздействия на показатели жизнедеятельности организмов из разных трофических уровней (продуценты, консументы, редуценты), а также на неживые компоненты природной среды (оценка миграции загрязняющих веществ с водным стоком в грунтовые воды).

## Заключение

Проведена оценка химических и биологических показателей ЗШО, образованных от сжигания углей различных месторождений: Каа-Хемское, Хакасское, Кузнецкое (бурые); Березовское, Бородинское, Ирша-Бородинское (каменные).

По результатам исследований, золошлаки, образованные от сжигания бурых углей, оказывают выраженное токсическое воздействие на гидробионтов, в отличие от золошлаков каменных углей. Среди исследуемой совокупности данных выделена группа, характеризующаяся наибольшей острой токсичностью: золошлаки от сжигания бурых углей Березовского и Бородинского месторождений.

По результатам анализа компонентного состава водных вытяжек из проб золошлаков установлено:

- ЗШО бурых углей характеризуются высокими значениями рН, повышенным содержанием хлоридов, солей (по NaCl), Ca, Cr, K, Na, Sr;
- ЗШО каменных углей характеризуются повышенным содержанием Al и Mg.

По результатам анализа отклика гидробионтов на влияние разных факторов установлено, что на жизнедеятельность гидробионтов преимущественно оказывают негативное воздействие:

- высокощелочные значения рН, рост концентраций Al, Ba, Ca – для инфузорий *Paramecium caudatum*.
- высокощелочные значения рН, рост концентраций K – для цериодафний *Ceriodaphnia affinis*.

Нейтрализация водных вытяжек стабилизирует рН до нейтральных значений, снижает концентрацию алюминия, независимо от характера происхождения ЗШО. В общем случае применение нейтрализации оказывает снижение острого токсического действия на гидробионтов. Тем не менее, в рамках настоящего исследования выделена группа ЗШО (бурых углей Березовского и Бородинского месторождений), для которой применение специфических методик биотестирования не позволяет в полной мере снизить их токсическое действие на гидробионты – процент гибели остаётся на уровне выше 10%.

<sup>4</sup> Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 15 июня 2022 г. N 1557-р. Москва, 2022.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Тетенькин Д.Д., Петров Е.И. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. М: ФГБУ «ВИМС». 2022.
2. Глобальная энергетика возвращается к угольной генерации. Доступно: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/04/26/919731-globalnaya-energetika-vozvrashaetsya-k-ugolnoj-generatsii> (accessed 25 April 2022)
3. Yao Z.T., Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S., Xi Y.Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*. 2015; 14 (Febr): 105–21. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
4. Клер В.Р. Изучение и геолого-экономическая оценка качества углей при геологоразведочных работах. М.: Недра; 1975.
5. Череповский В.Ф. Ценные и токсичные элементы в товарных углях России. М.: Недра; 1996.
6. Мальчик А.Г., Литовкин С.В. Изучение золошлаковых отходов для их использования в качестве вторичных ресурсов. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015; 9(1): 23–7.
7. Клер В.Р., Волкова Г.А., Гурвич Е.М. *Металлогения и геохимия угленосных сланцевосодержащих толщ СССР: геохимия элементов*. М.: Наука; 1987.
8. Крылов Д.А. Негативное влияние элементов-примесей от угольных ТЭС на окружающую среду и здоровье людей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015; 12: 77–87. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-0-77-87>
9. Глушенко Н.Н., Ольховская И.П. Экологическая безопасность энергетики. Свойства частиц летучей золы ТЭС, работающих на угле. *Известия РАН. Энергетика*. 2014; 1: 20–7.
10. Мелентьев В.А. *Состав и свойства золы и шлака ТЭС*. Л.: Энергоатомиздат; 1985.
11. Азарова С.В., Язиков Е.Г., Ильинских Н.Н. Оценка экологической опасности отходов горнодобывающих предприятий республики Хакасия с применением метода биотестирования. *Известия Томского политехнического университета*. 2004; 307(4): 55–9.
12. Бурдина В.М., Терехова В.А. Анализ эффективности методик биотестирования в экологической оценке загрязненных почв и отходов различного происхождения. *Материалы международной конференции «Проблемы биодеструкции техногенных загрязнителей окружающей среды»*. 14–16 сентября 2005 г. Саратов. ИБФРМ РАН; 2006; 125–6.
13. Терехова В.А. Технологии биотестирования в оценке экотоксичности отходов. *Экология производства*. 2009; 1: 48–51.
14. Маячкина Н.В., Чугунова М.В. Особенности биотестирования почв с целью их эко-токсикологической оценки. *Вестник ННГУ*. 2009; 1: 84–93.
15. Бурдина В.М., Соболева А.Н., Дик Э.П., Терехова В.А. Эффект разных способов нейтрализации на определение экотоксичности отходов ТЭС. *Экологические системы и приборы*. 2007; 10: 37–9.

## REFERENCES

1. Tetenkin D.D., Petrov E.I. *State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021 [Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-sy'rov'nykh resursov Rossijskoj Federacii v 2021 godu]*. Moscow: FGBU «VIMS». 2022. (in Russian)
2. Global energy returns to coal-fired generation [Global'naya e'nergetika vozvrashaetsya k ugol'noj generacii]. Available at: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/04/26/919731-globalnaya-energetika-vozvrashaetsya-k-ugolnoj-generatsii> (accessed 29 April 2022) (in Russian)
3. Yao Z.T., Ji X.S., Sarker P.K., Tang J.H., Ge L.Q., Xia M.S., Xi Y.Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*. 2015; 14 (Febr): 105–21. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
4. Kler V.R. *Geological and economic study of coal quality assessment during geological exploration [Izuchenie i geologo-e'konomicheskaya ocenka kachestva uglej pri geologorazvedochny'x rabotax]*. Moscow: Nedra; 1975. (in Russian)
5. Cherepovskii V.F. *Valuable and toxic elements in commercial coals of Russia [Cenny'e i toksichny'e e'lementy' v tovarny'x uglyax Rossii]*. Moscow: Nedra; 1996. (in Russian)
6. Malchik A.G., Litovkin S.V. The study of ash and slag wastes for their use as secondary resources. *Mezhdunarodny'j zhurnal prikladny'x i fundamental'ny'x issledovanij*. 2015; 9(1): 23–7. (in Russian)
7. Kler V.R., Volkova G.A., Gurvich E.M. *Metallogeny and geochemistry of coal-bearing shale-bearing strata of the USSR: geochemistry of elements [Metallogeniya i geokimiya uglenosny'x slancesoderzhashhix tolshh SSSR: geokimiya e'lementov]*. Moscow: Nauka; 1987. (in Russian)
8. Krylov D.A. The negative impact of impurity elements from coal-fired thermal power plants on the environment and human health. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2015; 12: 77–87. (in Russian) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-0-77-87> (in Russian)
9. Gluschenko N.N., Ol'hovskaya I.P. Environmental safety of energy. Properties of fly ash particles from coal-fired thermal power plants. *Izvestiya RAN. E'nergetika*. 2014; 1: 20–7. (in Russian)
10. Melent'ev V.A. *Composition and properties of ash and slag of thermal power plants [Sostav i svoystva zoly' i shlaka TE'S]*. L.: Energoatomizdat; 1985. (in Russian)
11. Azarova S.V., Yazikov E.G., Il'inskih N.N. Assessment of the environmental hazard of waste from mining enterprises of the Republic of Khakassia using the biotesting method. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta*. 2004; 307(4): 55–9. (in Russian)
12. Burdina V.M., Terehova V.A. Analysis of the effectiveness of biotesting techniques in the environmental assessment of contaminated soils and waste of various origins. *Materials of the international conference «Problems of biodegradation of man-made environmental pollutants» 14–16 September 2005 [Materialy' mezhdunarodnoj konferencii «Problemy' biodestrukcii tehnogenny'x zagryaznitelej okruzhayushhej sredy»*. 14–16 sentyabrya 2005 g.]. Saratov. IBFRM RAN; 2006; 125–6. (in Russian)
13. Terehova V.A. Biotesting technologies in the assessment of ecotoxicity of waste. *E'kologiya proizvodstva*. 2009; 1: 48–51. (in Russian)
14. Mayachkina N.V., Chugunova M.V. Features of soil biotesting for the purpose of their ecotoxicological assessment. *Vestnik NNGU*. 2009; 1: 84–93. (in Russian)
15. Burdina V.M., Soboleva A.N., Dik E.P., Terehova V.A. The effect of different neutralization methods on the determination of the ecotoxicity of thermal power plant waste. *E'kologicheskie sistemy' i pribory'*. 2007; 10: 3–9. (in Russian)

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Морозов Александр Дмитриевич**, аспирант кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Российская Федерация. E-mail: [aldmmo@mail.ru](mailto:aldmmo@mail.ru)

**Горленко Анастасия Сергеевна**, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Российская Федерация. E-mail: [aldmmo@mail.ru](mailto:aldmmo@mail.ru)

**Лунегова Лада Ивановна**, магистр кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Российская Федерация. E-mail: [lada-1999@inbox.ru](mailto:lada-1999@inbox.ru)

**Яковлев Александр Сергеевич**, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Российская Федерация. E-mail: [soil.resources@mail.ru](mailto:soil.resources@mail.ru)

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Alexander D. Morozov**, Postgraduate student of the Department of Land Resources and Soil Assessment, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0009-6254-5472> E-mail: [aldmmo@mail.ru](mailto:aldmmo@mail.ru)

**Anastasia S. Gorlenko**, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0006-3539-1349> E-mail: [aldmmo@mail.ru](mailto:aldmmo@mail.ru)

**Lada I. Lunegova**, Master of the Department of Land Resources and Soil Assessment, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0005-6506-3728> E-mail: [lada-1999@inbox.ru](mailto:lada-1999@inbox.ru)

**Alexander S. Yakovlev**, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Land Resources and Soil Assessment, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-2570-7721> E-mail: [soil.resources@mail.ru](mailto:soil.resources@mail.ru)