

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 2 / 2026, Vol. 18, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/53NZVN226.pdf>

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Гладун, И. В. Термохимическая конверсия растительной биомассы, загрязненной тяжелыми металлами / И. В. Гладун, Л. П. Майорова // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/53NZVN226.pdf>.

For citation:

Gladun I.V., Mayorova L.P. Thermochemical conversion of plant biomass contaminated with heavy metals. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(2): 53NZVN226. Available at: <https://esj.today/PDF/53NZVN226.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 502.57+662.63

Гладун Игорь Владимирович

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Доцент Высшей школы «Управление природными ресурсами»

Кандидат биологических наук

Е-mail: 006209@togudv.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8667-3019>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=91054

Майорова Людмила Петровна

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Профессор Высшей школы «Управление природными ресурсами»

Доктор химических наук

Е-mail: 000318@togudv.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6326-982X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=496438

Термохимическая конверсия растительной биомассы, загрязненной тяжелыми металлами

Аннотация. Химическое загрязнение сельскохозяйственных почв тяжелыми металлами является глобальной проблемой, представляющей риск для здоровья человека. Для реабилитации земель сельскохозяйственных угодий, загрязненных тяжелыми металлами, в качестве перспективной рассматривают биологическую технологию фиторемедиации, существенным недостатком которой является вопрос утилизации загрязненной растительной биомассы. В литературном обзоре были проанализированы результаты исследований поведения тяжелых металлов, содержащихся в растительной биомассе после фиторемедиации, в процессе традиционных и инновационных термохимических технологий утилизации. Были рассмотрены технологии — термохимического сжигания растительных отходов (пиролиз), сжигания растительной биомассы в инсинераторе, гидротермальной карбонизации и газификации увлеченным потоком. Выбор технологии термохимической конверсии растительной биомассы, загрязненной тяжелыми металлами, нужно проводить одновременно с совершенствованием технологии фиторемедиации, заключающейся в учете факторов, влияющих на химический состав растительной биомассы, в частности, на совершенствование агротехники выращивания отдельных районированных сортов и видов растений, способных аккумулировать тяжелые металлы в вегетационный период. Авторами в табличной форме представлена комплексная оценка технологий термохимической конверсии (пиролиз, сжигание, газификация, гидротермальная карбонизация) растительной биомассы, загрязненной тяжелыми металлами с рассмотрением

условий процессов, получаемых продуктов, локализации тяжелых металлов, преимуществ и недостатков методов. Сделан вывод, что будущие фундаментальные и прикладные исследования, используя междисциплинарный подход, должны быть сосредоточены на разработке опытно-промышленных экологически чистых технологий термохимической конверсии растительной биомассы, загрязненной после процесса фиторемедиации тяжелыми металлами, удовлетворяющих глобальные потребности стран в биоэнергетике.

Ключевые слова: почвы; тяжелые металлы; фиторемедиация; растительная биомасса; термохимическая конверсия; комплексная оценка

Введение

Защита почвы от загрязнения тяжелыми металлами является одной из важных целей устойчивого развития в соответствии с повесткой Генеральной Ассамблеи ООН «Преобразование нашего мира: повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года»: цель 15 ЦУР — «Защита и восстановление экосистем суши и содействие их рациональному использованию...» [1]. Химическое загрязнение сельскохозяйственных почв тяжелыми металлами — глобальная проблема, наблюдающаяся, как правило, в местах концентрации производственных мощностей и густонаселенных районах земного шара и Российской Федерации [2; 3]. Высокие уровни тяжелых металлов (далее — ТМ) в почвах сельскохозяйственных угодий — кадмия, цинка, ртути, свинца, хрома, меди, никеля и металлоида мышьяка могут не только снижать урожайность культурных растений, но и представлять риск для здоровья человека, обусловленный стратегией развития сельского хозяйства в окрестностях крупных городов — бизнес-моделями выращивания овощных культур [4]. Проблема восстановления свойств техногенно-деградированных почв имеет первостепенное значение в Российской Федерации, вследствие большой изменчивости кислотности и емкости катионного обмена почвенного фонда, предопределяющих подвижность ТМ в почвенной среде и накопление в растительности, включая сельскохозяйственные культуры [5]. Тяжелые металлы могут поглощаться культурными растениями в процессе почвенного питания, и, впоследствии, через сельскохозяйственную продукцию прямо или косвенно отрицательно влиять на здоровье населения [6–8].

Для реабилитации земель сельскохозяйственных угодий, загрязненных ТМ, применяются физические, химические и биологические технологии, различающиеся по трудоемкости и экономическим затратам [9; 10]. В последние годы активно ведется доведение до технической зрелости экологической биотехнологии рекультивации нарушенных земель, одним из направлений которой является фиторемедиация, позволяющая очистить почву как сельскохозяйственных угодий, так и промышленных ландшафтов при помощи растений, и, в конечном итоге, снизить риск для здоровья человека до приемлемой величины [10–12]. В основе процесса фиторемедиации находится способность представителей различных таксономических групп флоры аккумулировать ТМ при минеральном питании, и, впоследствии, изолировать их в корневой системе (деревья и кустарники), либо преимущественно транспортировать с восходящим током по ксилеме в надземную часть (травянистые растения) [13]. Отдельные растительные виды обладают избирательностью в поглощении и аккумуляции ТМ, их относят к растениям-гипераккумуляторам [14]. Так, было обнаружено, что растение *Solanum Nigrum* при вегетации поглощает из почвы ТМ, включая As, Cu, Zn, Pb, но преимущественно аккумулирует и транспортирует в надземные органы Cd [15]. Предполагают, что сочетание технологии фиторемедиации и фитоменеджмента, как комплексного управления растительностью на земельном участке, в перспективе может привести к экономическим, экологическим и социальным выгодам общества [16]. В последние годы исследования в области применения технологии фиторемедиации значительно продвинулись: наблюдается переход от модельных экспериментов к полевым опытам [12].

Фиторемедиация, как перспективный биотехнологический метод восстановления нарушенных земель, не лишен ряда недостатков, из которых наиболее существенным является вопрос утилизации растительной биомассы, загрязненной ТМ. Технология утилизации должна соответствовать целевым эколого-экономическим индикаторам: извлечение полезных компонентов (металлов, металлоидов) для их повторного применения (рекуперация); повторное применение растительных отходов по прямому назначению после компостирования (рециклинг); использование растительных отходов в качестве возобновляемого источника энергии (вторичных энергетических ресурсов); минимальный объем выброса парниковых газов в атмосферу; ограничение вторичного загрязнения компонентов природной среды тяжелыми металлами [17; 18].

Технология утилизации продуктов фиторемедиации — это реализация природоохранной задачи 12.4 ЦУР: «К 2020 году добиться экологически безопасного обращения с химическими веществами и всеми отходами на протяжении всего их жизненного цикла в соответствии с согласованными международными механизмами и значительно сократить их выбросы в воздух, воду и почву, чтобы минимизировать их негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду» [19].

В качестве технологии утилизации растительной биомассы, загрязненной ТМ, рассматриваются:

- термохимические методы — сжигание (включая, последующий фитомайнинг), пиролиз, газификация, сжижение [17; 20–25];
- биохимические — компостирование, анаэробная ферментация [17; 21–22];
- технологические — использование в качестве сырья для производства древесных плит на основе древесно-цементных композитов [26; 27] и др.

В процессе утилизации растительной биомассы существует опасность вторичного загрязнения компонентов природной среды ТМ, которые являются установленными канцерогенами и/или способны оказывать токсические эффекты неканцерогенного действия, создавая опасность для здоровья человека и устойчивости природных экосистем [28]. Показано, что биодоступность и экотоксичность ТМ для растений в первую очередь зависят от их химической формы, а не от общего содержания в почвенном покрове [12; 29]. Биодоступность ТМ можно определить с помощью модифицированной трехэтапной процедуры последовательной экстракции, утвержденной Европейским бюро по стандартам (BCR) [30].

Процедура BCR тяжелые металлы в образцах проб растительной биомассы, почв и продуктов термохимической конверсии позволяет разделить на четыре фракции в последовательности их биодоступности и экотоксичности: кислоторастворимую/обменную (F_1); восстанавливаемую (F_2); окисляемую (F_3); остаточную (F_4). Биодоступность и экотоксичность извлеченных фракций ТМ имеют следующую последовательность: $F_4 < F_3 < F_2 < F_1$ [31; 32].

Было показано, что в растениях Cd и Pb в основном присутствовали в фракциях $F_1 + F_2$, а преобладающее содержание Zn наблюдали во фракции F_1 ; Pb и As в основном присутствовали во фракции F_3 ; Cr и Mn аккумуляровались во фракции F_4 [14, табл. 1].

Поскольку фиторемедиация, как разновидность биотехнологии, может не только способствовать устойчивому развитию [10], но и приносить дополнительные экономические выгоды за счет получения добавленной стоимости новых видов продукции (например, биотоплива, биогаза, биоугля) [17; 21; 24], цель настоящего литературного обзора — проанализировать результаты исследований поведения тяжелых металлов, содержащихся в растительной биомассе, в процессе традиционных и инновационных термохимических технологий утилизации.

1. Пиролиз

Термохимическое сжижение растительных отходов (пиролиз) — процесс термического разложения биомассы в отсутствие окислителя, является традиционным методом получения жидких углеводородных топлив, при этом образуются жидкие смолообразные продукты достаточно сложного химического состава, а также газообразные и твердые продукты (древесный уголь, биоуголь). Согласно Б.Н. Кузнецову [33], процесс пиролиза растительных полимеров — это совокупность параллельно протекающих реакций дегидратации и конденсации с получением жидких и твердых продуктов, деполимеризации с образованием летучих и жидких смолистых веществ. Первичные продукты пиролиза растительной биомассы могут подвергаться вторичным превращениям: состав конечных продуктов зависит от условий процесса — скорости нагрева, конечной температуры, продолжительности, а также от химического состава биомассы. Преимущество пиролиза перед иными термохимическими методами заключается в меньших энергозатратах и получении трех ценных продуктов — биоугля, биомасла (фенолы, спирты, сложные эфиры, углеводороды и др.) и пиролизных газов (H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , углеводородов этана, пропана, бутана) [14; 33]. Процесс пиролиза в зависимости от скорости нагрева сырья и длительности процесса подразделяют на медленный (основной продукт — биоуголь), промежуточный, быстрый (биомасла) и импульсный (биогаз) [14; 33; 34].

Многочисленные исследования показали, что температура пиролиза является наиболее значимым фактором, влияющим на распределение ТМ в конечные продукты процесса и определяющим химические формы металлов [29; 35]. В процессе пиролиза токсичные формы ТМ ($F_1 + F_2$) постепенно трансформировались в низкотоксичные и/или стабильные состояния ($F_3 + F_4$), при этом они преимущественно аккумулировались в биоугле [14; 21]. Отметим, что большинство исследователей полагают, что процесс пиролиза загрязненной биомассы должен быть направлен на фиксацию ТМ в твердой фазе (биоугле), поскольку их поступление в жидкую или газообразную фазы требует разработки дорогостоящих и технически сложных методов очистки этих ценных продуктов [34], при этом возникает вопрос решения судьбы образующихся вторичных отходов от очистных сооружений, которые могут иметь более высокий класс экологической опасности. Поэтому, исследовательские усилия сосредоточены на изучении условий процесса пиролиза, обеспечивающих связывание ТМ в биоугле с одновременным получением чистых газообразных и жидких продуктов [17; 34; 36]. Так, например, Wang S. с соавт., показали, что пиролиз загрязненной биомассы позволил сохранить 91–99 % нелетучих ТМ в биоугле [37]. Проводятся исследования влияния технологических параметров пиролиза (температуры, длительности процесса), а также химических добавок (солей железа, магния или кальция) и компонентного состава растительного сырья на аккумуляцию ТМ в биоугле [29; 38–43]. Было показано, что увеличение температуры пиролиза приводит к росту удельной площади поверхности биоугля, обеспечивая тем самым пространство для аккумуляции ТМ в процессе их термической модификации, включающей вставку некоторых металлов и их соединений в углеродную матрицу твердой фазы [44–46]. Вместе с тем, чрезмерно высокая температура процесса может привести к разрушению микропористой структуры биоугля и исчезновению функциональных групп, что высвобождает ТМ в жидкую и газовую фазы [47; 48]. С другой стороны, более длительное время и более низкая температура (медленный пиролиз, торрефикация), по мнению ряда исследователей, являются ключевыми факторами для сохранения ТМ (в частности Cd) в биоугле [29; 46; 49].

Проводятся исследования по повышению стабильности ТМ в биоугле за счет предварительной химической обработки растительной биомассы [42; 43]. Не J. с соавт. проанализировали результаты влияния отдельных видов предварительной обработки загрязненной биомассы (химическая пропитка, измельчение, сушка, ферментативный гидролиз) на извлечение ТМ и их последующую аккумуляцию при пиролизе в биоуголь [39]: пиролиз

растительной биомассы с $MgCO_3$ при температуре до $700^\circ C$ способствовал снижению величины выщелачивания ТМ из биоугля, и, следовательно, их биодоступности. Для уменьшения содержания токсичных форм Cd в растительной биомассе было предложено производить предварительную обработку солями железа: раствор $FeCl_3$ эффективно удалял Cd из биомассы [50]. Huang S. с соавт. показали, что предварительная обработка растительной биомассы H_3PO_4 не только позволила получить высококачественные биомасла с высоким процентом выхода и низким содержанием ТМ, но и способствовала сохранению ТМ в биоугле [51].

В процессе пиролиза ТМ, содержащиеся в растительной биомассе, ведут себя по-разному: высоколетучие металлы могут улетучиваться во время термохимического процесса, что требует последующего контроля технологических параметров (температуры, длительности, эффективности предварительной обработки) во избежание вторичного загрязнения жидкой и газовой фаз [14; 34]. Так, ртуть (Hg) при пиролизе является наиболее летучим металлом и уже при температуре всего $225^\circ C$ полностью переходит из растительной биомассы в виде элементарной ртути в газовую фазу. Кадмий (Cd), свинец (Pb) и металлоид мышьяк (As) испаряются при относительно более высоких температурах (выше $450^\circ C$), но также классифицируются как летучие металлы, способные накапливаться в жидкой фазе [29; 37; 52–54]. Хром (Cr), никель (Ni), цинк (Zn) и медь (Cu) — нелетучие металлы: 99 % Ni и 98 % Zn при медленном пиролизе накапливались в биоугле [34].

Kistler R.C. с соавт. обнаружили, что Fe и Cu при пиролизе демонстрировали нелетучие свойства, в результате чего более 90 % этих металлов аккумулировалось в биоугле. Напротив, 98 % Cd при температуре выше $600^\circ C$ поступало в пиролитический газ. Ртуть полностью испарялась при самой низкой из исследованных температур пиролиза — $350^\circ C$ [54].

Позднее Makowska D. с соавт., подтвердили результаты Kistler R.C.: более высокие температуры пиролиза ($> 500^\circ C$) повышали pH биоугля до щелочных значений (> 10), а также способствовали испарению ТМ, особенно As и Cd, содержание которых снижалось до безопасных уровней в биоугле, при этом удаление Cd превышало 90 % при температуре $700^\circ C$. В тоже время, большая часть тяжелых металлов (Pb, Cr, Zn, Mn, Ni и Cu) при этих температурах концентрировалась в биоугле в окисляемых (F_3) и остаточных (F_4) фракциях [56].

При температуре пиролиза от 350 до $650^\circ C$ Zn и Cd находились в биоугле преимущественно в стабильных формах — фракции F_3 и F_4 , причем сумма нестабильных фракций ($F_1 + F_2$) уменьшалась для Zn на 70,3 % и для Cd на 80,0 % [44]. При повышении температуры процесса до $700^\circ C$ большая часть Cd мигрировала в жидкую фазу (биомасло) [56]. Закономерности миграции и трансформации Mn в процессе пиролиза были аналогичны закономерностям поведения Ni [34; 57].

При температуре термохимической декструкции ниже $800^\circ C$ сера (S), содержащаяся в растительной биомассе, может взаимодействовать с ТМ с образованием сульфидов, тем самым замедляя их высвобождение из твердой фазы. Минералы, содержащие SiO_2 и Al_2O_3 , могут использоваться при предварительной обработке биомассы в качестве адсорбентов для стабилизации ТМ в биоугле. Однако образование хлоридов ТМ значительно увеличивало их перенос в газовую фазу [14]. Было показано, что комплексы ТМ с кальцием (Ca), железом (Fe) или кремнием (Si) являются термически стабильными при высоких температурах пиролиза, аккумулируются в биоугле и имеют сниженный потенциал выщелачивания из него [58; 59].

Перенос ТМ в жидкую и газообразную фазы при пиролизе также может определяться конфигурацией реактора: устройство реактора, используемого для быстрого пиролиза, способствовало уносу твердых (взвешенных) частиц, содержащих ТМ, что приводило к их большому поступлению в биомасло [34; 60].

Таким образом, более высокая температура пиролиза, в определенном диапазоне, и длительность процесса эффективно стабилизировали ТМ в биоугле, уменьшали их подвижность и биодоступность (табл. 1). Это было обусловлено превращением химических форм соединений металлов при нагревании: более высокая температура пиролиза способствовала превращению растворимых, обменных и восстановленных металлов в окисленные (металлы, связанные со стабильными органическими веществами или сульфидами) и инертные (кристаллические металлы) состояния, что подавляло подвижность ТМ в реакционной системе, включая их поступление в жидкую (биомасло) и газовую фазы.

2. Сжигание

Сжигание растительной биомассы после фиторемедиации в инсинераторе считается наиболее недорогим и простым методом, позволяющим уменьшить объем биомассы более чем на 90 %, однако при этом не все ТМ аккумулируются в золе. Wan G. с соавт. обнаружили, что высокая температура сжигания приводила к меньшему удержанию ТМ в донной золе [61]. Стабильность ТМ в различных формах в золе располагалась в следующем порядке: F_4 (остаточная фракция) $> F_3$ (окисляемая фракция) $> F_2$ (восстанавливаемая фракция) $> F_1$ (обменная и кислоторастворимая фракция). Было показано, что фракция F_4 являлась доминирующей фракцией ТМ в золе: более 60 % Cu и Ni стабилизировались во фракциях F_3 и F_4 ; высокая летучесть Cd и Pb была обусловлена тем, что более 57 % этих металлов в форме фракций F_1 и F_2 поступало в золу-уноса.

Hg, Cd и металлоид As, вместе с газо-воздушной смесью (в виде газообразного металла) и золой-уноса (в комплексе с взвешенными веществами), могут поступать в атмосферный воздух [62; 63]. С повышением температуры более 650°C этот процесс усиливался и наблюдалось испарение полуметаллов (Zn и Pb) [34]. Ewald A. с соавт. обнаружили, что сжигание при температуре 1100°C в сочетании с добавлением KCl приводило к испарению в атмосферу 51 % Cu, 55 % Zn, 60 % As, 70 % Pb, 72 % Cd, 91 % Hg [64]. Результаты исследования Shuai G. с соавт. показали, что с повышением температуры горения концентрации Cr, As, Sb и Hg в зольном остатке сначала увеличивались, а затем уменьшались, в то время как содержание Zn, Cu и Cd изменялось наоборот. Критическая точка изменения концентрации в золе большинства ТМ находилась при температуре 800°C [65].

По данным Guo F. с соавт. высокая температура при сжигании способствует испарению ТМ в следующем порядке: $Pb > Cd > Zn$, поскольку Zn в кислородной атмосфере существовал в виде нелетучих оксидов, которые аккумулировались в золе [66]. Sui H. с соавт. отметили несколько иную зависимость: тяжелые металлы (Zn, Pb и Cd) преимущественно концентрировались в золе, но с повышением температуры горения интенсивность их испарения возрастала в последовательности $Cd > Pb > Zn$, причем высокое содержание Ca в растительной биомассе оказывало положительное влияние на затвердевание ТМ в шлаке [67].

Для уменьшения выбросов ТМ в атмосферу вместе с золой-уноса предлагалось перед сжиганием удалять их из растительной биомассы с помощью химических экстрагирующих агентов (вода, кислоты и хелатирующие агенты), образующих растворимые соединения с ТМ [68]. Также, как и при пиролизе, на скорость улетучивания ТМ в процессе сжигания влиял химический состав растительной биомассы: при температуре сжигания ниже 800°C сера могла взаимодействовать с ТМ, тем самым замедляя их улетучивание; напротив, хлориды могли соединяться с ТМ, значительно повышая их летучесть [14].

Таким образом, утилизация растительной биомассы, загрязненной ТМ, в процессе сжигания может привести к повторному попаданию ТМ в окружающую среду и вызвать вторичное загрязнение, что представляет собой высокий риск для здоровья человека и требует применение дорогостоящих методов очистки (табл. 1).

Однако предполагается, что зола, образующаяся в инсинераторе после сжигания растительной биомассы, загрязненной ТМ, является ценным ресурсом для извлечения солей металлов с высокой степенью чистоты [22].

3. Гидротермальная карбонизация

Гидротермальные технологии (гидротермальные карбонизация, сжижение и газификация) рассматриваются перспективными для утилизации растительных отходов фиторемедиации и производства гидроугля, который в будущем может заменять ископаемый уголь [69]. Технологический процесс гидротермальной карбонизации растительных остатков, загрязненных ТМ, протекает в водной среде при температуре 180–250°C и давлении 2–20 МПа. В этих условиях растительная биомасса превращается в гидротермальный уголь (гидроуголь), биомасло (смесь органических веществ и солей) и синтез-газ (преимущественно смесь H_2 , CH_4 и CO_2), а также — водорастворимую фазу с уксусной кислотой [21; 24; 70]. Преимущество гидротермальных технологий — возможность переработки растительной биомассы с высоким содержанием влаги при относительно невысоких температурах и удаления ТМ из конечного продукта (гидроугля или биомасла) [71].

Большинство современных исследований направлены на поиск параметров технологии гидротермальной карбонизации, определяющих аккумуляцию ТМ в твердой или жидкой фазе (в зависимости от модификации метода крекинга растительных полимеров). Отмечается, что по сравнению с биоуглем, полученным в процессе пиролиза, гидроуголь имеет больше кислородсодержащих функциональных групп, способствующих иммобилизации ТМ при повышении температуры процесса, при этом ТМ образуют комплексы с неорганическими компонентами биомассы и превращаются в стабильную форму [72].

Было показано [24], что гидротермическая карбонизация растительной биомассы может переводить ТМ в жидкую фазу, благодаря ее кислой среде, что позволяет концентрировать металлы и в дальнейшем утилизировать (обезвреживать), получая при этом чистый гидроуголь. Например, в условиях низкой температуры процесса гидротермальной карбонизации (210°C) и добавления HCl металлы Cd (95,0 %) и Zn (89,3%) аккумуляровались в жидкой фазе, что способствовало получению чистого гидроугля [73].

В процессе карбонизации соломы подсолнечника, загрязненной ТМ, повышение температуры до 200°C и концентрации HCl до 2 % способствовало переносу ТМ из гидроугля в жидкие продукты — до 99 % Zn и Cd, 94 % Cu и 87 % Pb [74].

Исследование Во Z. с соавт. показало, что при гидротермальной карбонизации биомассы ивы более высокие температуры обработки усиливали фиксацию Cd и Zn в твердой фазе, в то время как добавление неорганической кислоты (HCl, H_2SO_4 , H_3PO_4) способствовало их миграции в жидкую фазу: более 91,08 % Cd и 88,41 % Zn в системе с добавлением кислоты мигрировало в жидкую фазу при температуре 180°C [75]. Аккумуляцию Cd и Zn в жидкой фазе при добавлении в реакционную среду неорганической кислоты подтверждали и другие авторы [76].

Нелетучие и малолетучие ТМ преимущественно, как и при пиролизе, накапливались в гидроугле. По данным Chen H. с соавт. [77], при температуре 320°C Cd (87,8 %), Cu (87,5 %), Pb (90,2 %) и Zn (87,2 %) концентрировались в твердой фазе. При гидротермальном сжижении биомассы гипераккумулятора *Sedum plumbizincicola* тяжелые металлы (Cd, Cr, Mn, Pb, Zn) в основном распределялись в гидроуголь и водорастворимую фазу, и только менее 10 % находилось в биомасле [78]. Авторы отмечали, что более 96 % As поступало в водорастворимую фазу из-за преобладания в ней уксусной кислоты.

Результаты исследования Cui X. с соавт. показали, что в основном ТМ концентрировались в гидроугле ($> 98\%$), при этом Cu преимущественно находилась в форме металла; Zn имел тенденцию к образованию стабильных металлоорганических комплексов или оставался в нелетучих формах; Pb сосуществовал как в металлических, так и в карбонатных формах; Cd переходил в металлическое и окисленное состояния. Температура и продолжительность процесса карбонизации определяли структурные свойства полученного гидроугля и содержание в нем Cu, Pb, Zn, Cd. В тоже время, As и Mn преимущественно поступали из растительной биомассы в жидкую фазу. В газовой фазе ТМ практически не обнаруживались [79]. Авторы предположили, что, по-видимому, гипераккумуляторы, богатые As, должны утилизироваться преимущественно способом гидротермической карбонизации, поскольку сжигание в инсинераторе и пиролиз способствуют улетучиванию As, а при гидротермической обработке большая часть его мигрирует в жидкую фазу, которая может быть в последствии очищена.

Lee J. и Park K.Y. обнаружили, что гидротермальная карбонизация остатков подсолнечника, содержащего ТМ, при температуре $160\text{--}260^\circ\text{C}$ снижала концентрацию металлов в гидроугле до нормативного уровня, установленного для биотоплива, синтезированного из твердых отходов [80]. Проведение совместной гидротермальной карбонизации биомассы, полученной в результате фиторемедиации, с костной мукой приводило к образованию гидроксиапатит-гидроугольных композитов, продемонстрировавших стабильность удерживания Cd и Zn на уровне $94,31\%$ и $82,41\%$ соответственно [81]. Повышение температуры процесса увеличивало эффективность иммобилизации ТМ в гидроугле ($> 99,2\%$), что, вероятно, объяснялось быстрым образованием гидроугля в процессе гидротермальной карбонизации и адсорбцией металлов [82]. Авторы отмечали, что ТМ химически преобразовывались в стабильные формы путем комплексообразования с неорганическими компонентами гидроугля (силикатами, SiO_2 и Al_2O_3).

Следует отметить, что технология гидротермальной карбонизации загрязненной биомассы имеет большую перспективу, поскольку позволяет получать ценные органические продукты, например, гидроксиметилфурфурол и фурфурол в присутствии пероксимоносульфата калия, причем ТМ, мигрирующие в жидкую фазу, выступают в роли природных катализаторов [83].

4. Газификация увлеченным потоком

Газификация увлеченным потоком загрязненной ТМ растительной биомассы в биотопливо также, как и технология гидротермальной карбонизации, объединяет две цели: восстановление загрязненных земель для целевого использования и производство устойчивого биотоплива (синтез-газа) [84]. Газификаторы способны переработать практически любой вид органического сырья при температуре в диапазоне $600\text{--}1000^\circ\text{C}$ и продолжительности процесса $3\text{--}4$ с [85]. Преимущество газификации растительных остатков с ТМ, как и процесса пиролиза, перед сжиганием в инсинераторах, по мнению ряда авторов заключается в снижении уровня летучей золы [86].

Как и в других технологиях термохимической конверсии растительной биомассы, поведение ТМ в газификаторе определялось компонентным составом исходного сырья и физико-химическими свойствами металлов. Результаты экспериментов и моделирования показали, что Cd, Pb и Zn полностью улетучиваются в процессе газификации растительной биомассы уже при температуре выше 650°C . Остальные ТМ являются относительно нелетучими и лишь частично выделяются в газовую фазу, в том числе за счет процессов адгезии и агломерации со взвешенными веществами.

Таблица 1

Комплексная оценка технологий термохимической конверсии растительной биомассы, загрязненной тяжелыми металлами

Технология	Пиролиз	Сжигание в инсинераторе	Газификация	Гидротермальная карбонизация
Параметры				
Температура	300–900°C	> 800°C	600–1200°C (зависит от зоны газогенератора)	180–250°C В водной среде
Давление	—	—	—	2–10 МПа
Продукция	Биоуголь, пиролизный газ, биомасла	Зола, обогащенная ТМ	Синтез-газ	Гидроуголь, биомасло, синтез-газ, водорастворимая фаза с уксусной кислотой
Факторы процесса	Состав конечных продуктов зависит от условий процесса — скорости нагрева, конечной температуры, продолжительности, а также от химического состава биомассы. Более высокая температура пиролиза, в определенном диапазоне, и длительность процесса эффективно стабилизировали ТМ в биоугле, уменьшали их подвижность и биодоступность.	С повышением температуры горения концентрации Cr, As, Sb и Hg в зольном остатке сначала увеличивались, а затем уменьшались, в то время как концентрации Zn, Cu и Cd изменялись наоборот. Критическая точка изменения концентрации большинства ТМ находилась при температуре 800°C. Высокая температура способствует испарению ТМ в следующем порядке: Pb > Cd > Zn. На скорость улетучивания влияет химический состав сырья.	Поведение ТМ в газификаторе определялось компонентным составом исходного сырья и физико-химическими свойствами металлов. При температуре 600–1000°C длительность газификации составляет 3–4 секунды. На распределение ТМ между фазами влияет тип реактора (с псевдоожиженным, неподвижным или увлекаемым слоем) и вид газа, используемого для газификации.	Поведение ТМ зависит от температуры и продолжительности процесса, которые влияли как на их иммобилизацию, так и на структурные свойства полученного гидроугля. В отличие от биоугля гидроуголь имеет больше кислородсодержащих функциональных групп, что способствует иммобилизации ТМ при повышении температуры процесса, при этом ТМ образовывали комплексы с неорганическими компонентами биомассы и превращались в стабильную форму.
Извлекаемые ТМ	Hg, Cd, Pb, As, Cr, Zn, Ni, Cu	Hg, Cd, Pb, As, Cr, Zn, Cu, Sb	Hg, Cd, Pb, As, Cr, Zn, Ni, Mn, Co	Cd, Cr, Mn, Pb, Zn, Cu, As, Mn
Связывание ТМ	Hg полностью переходит в газовую фазу. Cd, Pb, As способны накапливаться в биомасле. Cr, Ni, Zn, Cu — в биоугле при медленном пиролизе.	ТМ (Zn, Pb и Cd) при сжигании концентрировались в золе, но с повышением температуры горения интенсивность их испарения в газозооцидную смесь возрастала в последовательности Cd > Pb > Zn.	As, Cd, Zn, Pb могут переходить в летучую форму при T выше 600°C. Ni, Cu, Mn, Co способны аккумулироваться в синтез-газе при температурах 1000–1200°C.	Cd, Cr, Mn, Pb, Zn в основном распределялись в гидроуголь и водорастворимую фазу. Менее 10 % находилось в биомасле. As и Mn поступали в жидкую фазу. В газовой фазе ТМ практически не обнаруживались.
Преимущества	Меньшие энергозатраты по сравнению с другими термохимическими методами. Получение трех ценных продуктов — биоугля, биомасла и пиролизных газов.	Генерация тепловой энергии. Предполагается, что зола от сжигания является ценным ресурсом для извлечения солей металлов с высокой степенью чистоты.	Возможность переработки любого органического сырья. Генерация тепловой энергии. Малое образование золы-уноса. При производительности по переработке 605 т в сут. перспективная эффективность технологии газификации биомассы масштабируется до промышленного уровня.	Возможность переработки растительной биомассы с высоким содержанием влаги при относительно невысоких температурах. Удаление ТМ из конечного продукта. Большая часть As мигрирует в жидкую фазу, которая может быть в последствии очищена. Перспективность технологии: возможность получать ценные органические продукты.
Недостатки	Зависимость миграции ТМ между фазами от химического состава растительного сырья и условий процесса.	Возможность повторного попадания ТМ в окружающую среду и вторичного загрязнения. Зависимость миграции ТМ между фазами от химического состава растительного сырья. Высокие требования к пыле-газоочистным установкам из-за накопления ТМ в золе уноса.	Зависимость миграции ТМ между фазами от химического состава растительного сырья. Высокие требования к пыле-газоочистным установкам.	Зависимость миграции ТМ между фазами от химического состава растительного сырья.

Составлено авторами

В исследованиях отмечалась зависимость выделения ТМ с газо-воздушной смесью от условий газификации и конструкции реактора, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований по оптимизации технологической эффективности процесса и его экологической безопасности [85; 86]. Согласно оценке, Das K. с соавт. [87], при производительности по переработке 605 т в сутки перспективная эффективность технологии газификации биомассы масштабируется до промышленного уровня.

Gallucci F. с соавт., анализируя результаты газификации биомассы тополя, содержащей ТМ, показали, что большая часть металлов была сосредоточена в золе, собранной на дне реактора (Pb, Cd, Cu, Cr) или в циклоне (Mg и Fe). Отмечалось, что Zn, Fe и Cu были способны образовывать агломераты со взвешенными веществами и поступать в газовую фазу [88]. Предполагалось, что испарение нелетучих элементов не будет полным и эти ТМ скорее всего останутся в твердой фазе и станут частью шлака из-за высокой температуры плавления и высоких температур внутри газификатора [85].

Таким образом, в процессе газификации растительной биомассы, загрязненной ТМ, некоторые химические элементы (As, Cd, Zn, Pb) могут переходить в летучую форму при температурах выше 600°C, тогда как другие (Ni, Cu, Mn, Co) способны аккумулироваться в синтез-газе при температурах 1000–1200°C, а Cr, Al и Mg, оставались в твердой фазе даже при температурах выше 1200°C (табл. 1). Кроме того, на распределение ТМ между фазами влияет тип реактора (с псевдоожиженным, неподвижным или увлекаемым слоем) и вид газа (воздух, кислород, пар и т. д.), используемого для газификации [89].

Заключение

Растущее внимание органов государственного управления к комплексным экологическим проблемам в энергетическом секторе, связанным как с обеспечением качества окружающей среды, так и с устойчивым развитием экономики в условиях глобальных изменений климата, способствует поиску более устойчивых и возобновляемых источников энергии для замены ископаемого топлива. Предпринимаются многочисленные попытки сократить выбросы углерода путем замены ископаемого топлива биоэнергией, получаемой из лигноцеллюлозной биомассы, обладающей главным преимуществом — возобновляемостью и доступностью. Однако из-за ограниченности площадей сельскохозяйственных угодий возникает конфликт между выращиванием культурных растений для производства продовольствия и кормов для сельскохозяйственных животных, и растительного сырья для биоэнергетики. Ситуация усугубляется тем, что практические во всех странах мира (и в Российской Федерации), сохраняется тенденция к ухудшению состояния сельскохозяйственных земель, в том числе за счет загрязнения почвенного плодородного слоя тяжелыми металлами. В связи с этим, универсальный подход, сочетающий выращивание растительной биомассы для фиторемедиации с последующим получением биоэнергии, может способствовать снижению экологических проблем сельскохозяйственных угодий и производству биоэнергии. Проведенный обзор показал, что выбор технологии термохимической конверсии растительной биомассы, загрязненной тяжелыми металлами, нужно проводить одновременно с совершенствованием технологии фиторемедиации, заключающейся в учете факторов, влияющих на химический состав растительной биомассы, в частности, на совершенствование агротехники выращивания отдельных районированных сортов и видов растений, способных аккумулировать тяжелые металлы в вегетационный период. Показано, что поведение тяжелых металлов определялось как технологическими параметрами процесса — скоростью и продолжительностью нагрева, температурой, так качественным составом растительного сырья и наличием химических добавок.

Будущие фундаментальные и прикладные исследования с использованием междисциплинарного подхода должны быть сосредоточены на разработке промышленных экологически чистых технологий термохимической конверсии растительной биомассы, загрязненной после фиторемедиации тяжелыми металлами, удовлетворяющих глобальные потребности стран в биоэнергетике.

В данном обзоре были представлены традиционные технологии термохимической конверсии растительной биомассы, загрязненной тяжелыми металлами, а также описаны технологические приемы, способствующие иммобилизации тяжелых металлов в твердых или жидких продуктах, что является важнейшим условием для получения различных функциональных материалов с добавленной стоимостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schillaci, C. Evaluation of the United Nations Sustainable Development Goal 15.3.1 indicator of land degradation in the European Union / C. Schillaci, A. Jones, D. Vieira, M. Munafò, L. Montanarella // *Land degradation & development*. — 2023. — Vol. 34. — № 1. — P. 250–268. — DOI: 10.1002/ldr.4457 (дата обращения: 10.04.2026).
2. Федоркина, И.А. Обзор основных тенденций и динамики загрязнения воздуха и почв в регионах российской федерации в период 1993–2023 годов / И.А. Федоркина, В.В. Ерофеева, Е.В. Аникина, А.И. Сафонов // *Проблемы региональной экологии*. — 2025. — Т. 1. — С. 17–21. — DOI: 10.24412/1728-323X-2025-1-17-21 (дата обращения: 10.04.2026).
3. Касимов, Н.С. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах российских городов (по данным ежегодных докладов Росгидромета) / Н.С. Касимов, Д.В. Власов // *Вестник Московского университета*. — Сер. 5. — География. — 2018. — Т. 3. — С. 14–22.
4. Sroka, W. Farming under urban pressure: business models and success factors of peri-urban farms / W. Sroka, P. Sulewski, J. Mikołajczyk, K. Król // *Agriculture*. — 2023. — Vol. 13. — № 6. — P. 1–23. — DOI: 2077-0472/13/6/1216 (дата обращения: 10.04.2026).
5. Аветян, С.А. Картографическая интерпретация химического и радиационного загрязнения почв России / С.А. Аветян, Н.В. Савицкая, И.Ю. Савин, Е.А. Шишконокова // *Бюлл. Почвен. института им. В. В. Докучаева*. — 2023. — Т. 114. — С. 29–65. — DOI: 10.19047/0136-1694-2023-114-29-65 (дата обращения: 10.04.2026).
6. Wan, Y. Heavy metals in agricultural soils: sources, influencing factors, and remediation strategies / Y. Wan, J. Liu, Z. Zhuang, Q. Wang, H. Li // *Toxics*. — 2024. — Vol. 12. — № 1. — P. 63. — DOI: 10.3390/toxics12010063 (дата обращения: 10.04.2026).
7. Chen, K. Occurrence, fate and control strategies of heavy metals and antibiotics in livestock manure compost land application: a review / K. Chen, J. Li, L. Lin, W. Qin, Y. Gao, E. Hu, J. Jiang // *Science of total environment*. — 2024. — Vol. 957. — P. 177381. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177381 (дата обращения: 10.04.2026).
8. Wieczorek, J. Mobility, bioaccumulation in plants, and risk assessment of metals in soils / J. Wieczorek, A. Baran, A. Bubak // *Science of total environment*. — 2023. — Vol. 882. — P. 163574. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163574 (дата обращения: 10.04.2026).

9. Ciampi, P. Coupling physical and chemical-biological techniques for the remediation of contaminated soils and groundwater / P. Ciampi, M. Zeppilli, L. Lorini, M. Villano, C. Esposito, C. Nielsen, M. Petrangeli Papini // *Soil remediation science and technology*. — Cham: Springer Nature Switzerland. — 2024. — P. 401–429.
10. Филонов, А. Современное состояние и тенденции в экологической биотехнологии / А. Филонов, Л. Ахметов, А. Ветрова, А. Иванова, О. Сазонова, И. Пунтус, А. Боронин // *Biologia et biotechnologia*. — 2024. — № 1. — С. 1–28. — DOI: 10.61847/pbcraas.bbt.2024.1.2 (дата обращения: 10.04.2026).
11. Cozma, P. Phytoremediation: a sustainable and promising bio-based approach to heavy metal pollution management / P. Cozma, M. Roşca, M. Minuţ, M. Gavrilăscu // *Science of total environment*. — 2025. — Vol. 1001. — 180458. — DOI: 0.1016/j.scitotenv.2025.180458 (дата обращения: 10.04.2026).
12. Sharma, S. Phytoremediation of heavy metals in soil-concepts, advancements, and future directions / S. Sharma, T. Kumar, D. K. Das, A. Mittal, N. Verma // *Journal of soil science and plant nutrition*. — 2025. — Vol. 25. — № 1. — P. 1253–1280. — DOI: 10.1007/s42729-024-02199-60.1016/j.scitotenv.2025.180458 (дата обращения: 10.04.2026).
13. Фрунзе, О.В. Фиторемедиация почв, загрязненных ионами тяжелых металлов, с помощью древесных и кустарниковых растений / О.В. Фрунзе // *Лесной вестник*. — 2022. — Т. 26. — № 6. — С. 92–98. — DOI: 10.18698/2542-1468-2022-6-92-98 (дата обращения: 10.04.2026).
14. Su, W. Migration and transformation of heavy metals in hyperaccumulators during the thermal treatment: a review / W. Su, X. Li, H. Zhang, Y. Xing, P. Liu, C. Cai // *Environmental science and pollution research*. — 2021. — Vol. 28. — № 35. — P. 47838–47855. — DOI: 10.1007/s11356-021-15346-8 (дата обращения: 10.04.2026).
15. Tamma, A.A. Advancing phytoremediation: a review of soil amendments for heavy metal contamination management / A.A. Tamma, K. Lejcuś, W. Fiałkiewicz, D. Marczak // *Sustainability*. — 2025. — Vol. 17. — № 13. — P. 5688. — DOI: 10.3390/su17135688 (дата обращения: 10.04.2026).
16. Islam, M.M. Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: a review / M.M. Islam, N. Saxena, D. Sharma // *Rsc. Sustainability*. — 2024. — Vol. 2. — № 5. — P. 1269–1288. — DOI: 10.1039/D3SU00440F (дата обращения: 10.04.2026).
17. Khan, A.H.A. Sustainability of phytoremediation: post-harvest stratagems and economic opportunities for the produced metals contaminated biomass / A.H.A. Khan, A. Kiyani, M. Santiago-Herrera, J. Ibanez, S. Yousaf, M. Iqbal, R. Barros // *Journal of environmental management*. — 2023. — Vol. 326. — P. 116700. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116700 (дата обращения: 10.04.2026).
18. Toplicean, I.M. An overview on bioeconomy in agricultural sector, biomass production, recycling methods, and circular economy considerations / I.M. Toplicean, A.D. Datcu // *Agriculture*. — 2024. — Vol. 14. — № 7. — P. 1143. — DOI: 10.3390/agriculture14071143 (дата обращения: 10.04.2026).
19. Raman, R. Sustainable development goal 12 and its synergies with other SDGs: identification of key research contributions and policy insights / R. Raman, H.H. Lathabai, P. Nedungadi // *Discover sustainability*. — 2024. — Vol. 5. — № 1. — P. 150. — DOI: 10.1007/s43621-024-00289-0 (дата обращения: 10.04.2026).

20. Edgar, V.N. Coupling plant biomass derived from phytoremediation of potential toxic-metal-polluted soils to bioenergy production and high-value by-products — a review / V.N. Edgar, F.L. Fabián, P.C.J. Mario, V.R. Ileana // *Applied sciences*. — 2021. — Vol. 11. — № 7. — P. 2982. — DOI: 10.3390/app11072982 (дата обращения: 10.04.2026).
21. Chai, Y. Valorization of heavy metal contaminated biomass: recycling and expanding to functional materials / Y. Chai, A. Chen, M. Bai, L. Peng, J. Shao, J. Yuan, C. Peng // *Journal of cleaner production*. — 2022. — Vol. 366. — P. 132771. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132771 (дата обращения: 10.04.2026).
22. Dhiman, S. Phytomining: an innovative technique for sustainable recovery of valuable metals/metalloids from agro-industrial and mining wastes / S. Dhiman, A.D. Singh, J. Kour, T. Bhardwaj, R. Tikoria, D. Kumar, R. Bhardwa // *Sustainable clean energy production using waste biomass: sustainable energy production and utilization*. — Singapore: Springer nature Singapore. — 2024. — P. 101–127.
23. Dilshara, P. Transforming nickel toxicity into resource recovery through phytomining: opportunities and applications in Sri Lanka / P. Dilshara, B. Abeysinghe, R. Premasiri, N. Dushyantha, N. Ratnayake, S. Senarath, N. Batapola // *International journal of environmental science and technology*. — 2025. — Vol. 22. — P. 8405–8424. — DOI: 10.1007/s13762-025-06362-z (дата обращения: 10.04.2026).
24. Mehrez, K. Hydrothermal processes of contaminated biomass: fate of heavy metals and liquid effluent valorization / K. Mehrez, L. Fryda, R. Visser, A. Kane, N. Leblanc, H. Djelal // *Biomass conversion and biorefinery*. — 2025. — Vol. 15. — № 8. — P. 11493–11508. — DOI: 10.1007/s13399-024-06023-0 (дата обращения: 10.04.2026).
25. Quarshie, S.D.G. Enhanced phytoremediation of soil heavy metal pollution and commercial utilization of harvested plant biomass: a review / S.D.G. Quarshie, X. Xiao, L. Zhang // *Water, air, & soil pollution*. — 2021. — Vol. 232. — P. 475. — DOI: 10.1007/s11270-021-05430-7 (дата обращения: 10.04.2026).
26. Nguyen, D.L. Production of wood-based panel from recycled wood resource: a literature review / D.L. Nguyen, J. Luedtke, M. Nopens, A. Krause // *European journal of wood and wood products*. — 2023. — Vol. 81. — № 3. — P. 557–570. — DOI: 10.1007/s00107-023-01937-4 (дата обращения: 10.04.2026).
27. Spear, M.J. Developments in the recycling of wood and wood fibre in the UK: a review / M.J. Spear, A. Dimitriou, S.F. Curling, G.A. Ormondroyd // *Fibers*. — 2025. — Vol. 13. — № 2. — P. 23. — DOI: 10.3390/fib13020023 (дата обращения: 10.04.2026).
28. Edo, G.I. Environmental persistence, bioaccumulation, and ecotoxicology of heavy metals / G.I. Edo, P.O. Samuel, G.O. Oloni, G.O. Ezekiel, V.O. Ikpekor, P. Obasohan, J.J. Agbo // *Chemistry and ecology*. — 2024. — Vol. 40. — № 3. — P. 322–349 — DOI: 10.1080/02757540.2024.2306839 (дата обращения: 10.04.2026).
29. He, J. Effect of temperature on heavy metal (loid) deportment during pyrolysis of *Avicennia marina* biomass obtained from phytoremediation / J. He, V. Strezov, T. Kan, H. Weldekidan, S. Asumadu-Sarkodie, R. Kumar // *Bioresource technology*. — 2019. — Vol. 278. — P. 214–222. — DOI: 10.1016/j.biortech.2019.01.101 (дата обращения: 10.04.2026).
30. Marin, N.M. Ultrasound-assisted community bureau of reference (BCR) procedure for heavy metal removal in sewage sludge / N.M. Marin, T. Galaon, L.F. Pascu // *Materials*. — 2024. — Vol. 17. — № 22. — P. 5452. — DOI: 10.3390/ma17225452 (дата обращения: 10.04.2026).

31. Ure, A.M. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the commission of the European Communities / A.M. Ure, Ph. Quevauviller, H. Muntau, B. Griepink // *International journal of environmental analytical chemistry*. — 1993. — Vol. 51. — № 1–4. — P. 135–151. — DOI: 10.1080/03067319308027619 (дата обращения: 10.04.2026).
32. Yang, H.J. Mobility and bioavailability of heavy metals in sediments using the sequential extraction in Yeongsan River Basin, South Korea / H.J. Yang, T.W. Kang, W.S. Lee, W.P. Park // *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. — 2025. — Vol. 115. — № 5. — P. 62. — DOI: 10.1007/s00128-025-04128-4 (дата обращения: 10.04.2026).
33. Кузнецов, Б.Н. Получение жидких топлив и их компонентов из древесной биомассы / Б.Н. Кузнецов // *Российский химический журнал*. — 2003. — Т. 47. — № 6. — С. 83–91.
34. He, J. A state-of-the-art review of the fate of heavy metals and product properties from pyrolysis of heavy-metal (loid) enriched biomass harvested from phytoextraction / J. He, R. Kumar, T. Kan, V. Strezov // *Environmental progress & sustainable energy*. — 2023. — Vol. 42. — № 1. — P. 13979. — DOI:
35. Zheng, X. Speciation, leachability, and phytoaccessibility of heavy metals during thermochemical liquefaction of contaminated peanut straw / X. Zheng, D. Zou, Q. Wu, L. Zhang, J. Tang, F. Liu, Z. Xiao // *Waste management*. — 2024. — Vol. 176. — P. 20–29. — DOI: 10.1016/j.wasman.2024.01.024 (дата обращения: 10.04.2026).
36. Cui, Z. Transformation and stabilization of heavy metals during pyrolysis of organic and inorganic-dominated sewage sludges and their mechanisms / Z. Cui, G. Xu, B. Ormeci, H. Liu, Z. Zhang // *Waste management*. — 2022. — Vol. 150. — P. 57–65. — DOI: 10.1016/j.wasman.2022.06.023 (дата обращения: 10.04.2026).
37. Wang, S. Biochar provides a safe and value-added solution for hyperaccumulating plant disposal: a case study of *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae) / S. Wang, B. Gao, Y. Li, Y.S. Ok, C. Shen, S. Xue // *Chemosphere*. — 2017. — Vol. 178. — P. 59–64. — DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.02.121 (дата обращения: 10.04.2026).
38. Huang, H. Effect of pyrolysis temperature on chemical form, behavior and environmental risk of Zn, Pb and Cd in biochar produced from phytoremediation residue / H. Huang, W. Yao, R. Li, A. Ali, J. Du, D. Guo, M. K. Awasthi // *Bioresource technology*. — 2018. — Vol. 249. — P. 487–493. — DOI: 10.1016/j.biortech.2017.10.020 (дата обращения: 10.04.2026).
39. He, J. Effects of co-pyrolysis of heavy metal contaminated biomass with magnesium carbonate on heavy metal deportment and pyrolytic product properties / J. He, V. Strezov, X. Zhou, R. Kumar, H. Weldekidan, T. Kan // *Fuel*. — 2021. — Vol. 294. — P. 120545. — DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120545 (дата обращения: 10.04.2026).
40. Muhammad, N. Impacts of pyrolysis temperatures on physicochemical and structural properties of green waste derived biochars for adsorption of potentially toxic elements / N. Muhammad, L. Ge, W.P. Chan, A. Khan, M. Nafees, G. Lisak // *Journal of environmental management*. — 2022. — Vol. 317. — P. 115385. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115385 (дата обращения: 10.04.2026).
41. Almutairi, A.A. Variations in composition and stability of biochars derived from different feedstock types at varying pyrolysis temperature / A.A. Almutairi, M. Ahmad, M.I. Rafique, M.I. Al-Wabel // *Journal of the Saudi society of agricultural sciences*. — 2023. — Vol. 22. — № 1. — P. 25–34. — DOI: 10.1016/j.jssas.2022.05.005 (дата обращения: 10.04.2026).

42. Li, Z. Research on the stepwise treatment of phytoremediation residue: combining leaching pretreatment with pyrolysis / Z. Li, Y. Huang, Z. Zhu, H. Shi, Y. Xiao, H. Song, L. Dong // *Process safety and environmental protection*. — 2025. — Vol. 194. — P. 74–82. — DOI: 10.1016/j.psep.2024.12.016 (дата обращения: 10.04.2026).
43. Li, X. Enhancing the stability and heavy metal immobilization of co-pyrolysis biochar through biomass and red mud co-pyrolysis: a synergistic mechanism / X. Li, L. Li, Z. Huang, Z. Chang, Z. Tu, L. Tian, B. Pan // *Journal of environmental management*. — 2025. — Vol. 376. — P. 124422. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124422 (дата обращения: 10.04.2026).
44. Zong, Y. Biochar derived from cadmium-contaminated rice straw at various pyrolysis temperatures: cadmium immobilization mechanisms and environmental implication / Y. Zong, Q. Xiao, S. Lu // *Bioresour. technol.* — 2021. — Vol. 321. — P. 124459. — DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124459 (дата обращения: 10.04.2026).
45. Liu, Z. Modified biochar: synthesis and mechanism for removal of environmental heavy metals / Z. Liu, Z. Xu, L. Xu, F. Buyong, T.C. Chay, Z. Li, X. Wang // *Carbon research*. — 2022. — Vol. 1. — № 1. — P. 8. — DOI: 10.1007/s44246-022-00007-3 (дата обращения: 10.04.2026).
46. Huang, Z. Effects of pyrolysis temperatures and modified methods on rice husk-derived biochar characteristics and heavy metal adsorption / Z. Huang, Q. Wang, Y. Zhang, B. Du, J. Zhou, D. Ji // *Molecules*. — 2025. — Vol. 30. — № 17. — P. 3616. — DOI: 10.3390/molecules30173616 (дата обращения: 10.04.2026).
47. Han, Z. Pyrolysis characteristics of biomass impregnated with cadmium, copper and lead: influence and distribution / Han, Z., Guo, Z., Zhang, Y., Xiao, X., Xu, Z., Sun, Y. // *Waste biomass valorization*. — 2017. — Vol. 9. — № 7. — P. 1223–1230. — DOI: 10.1007/s12649-017-0036-5 (дата обращения: 10.04.2026).
48. Li, X. Spatial evolution of carbon and pore networks in corn straw biochar during high-temperature pyrolysis (1000–1400°C): a 3D-μCT investigation / X. Li, L. Guo, P. Fan, X. Zou, M. Zhai // *Fuel*. — 2026. — Vol. 413. — P. 138180. — DOI: 10.1016/j.fuel.2025.138180 (дата обращения: 10.04.2026).
49. He, J. Pyrolysis of heavy metal contaminated *Avicennia marina* biomass from phytoremediation: characterisation of biomass and pyrolysis products / J. He, V. Strezov, R. Kumar, H. Weldekidan, S. Jahan, B.H. Dastjerdi, X. Zhou, T. Kan // *J. Clean. Prod.* — 2019. — Vol. 234. — P. 1235–1245. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.285 (дата обращения: 10.04.2026).
50. He, J. Pyrolysis of heavy metal contaminated biomass pre-treated with ferric salts: product characterisation and heavy metal deportment / J. He, V. Strezov, X. Zhou, R. Kumar, T. Kan // *Bioresource technology*. — 2020. — Vol. 313. — P. 123641. — DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123641 (дата обращения: 10.04.2026).
51. Huang, S. Simultaneous optimizations of heavy metal immobilizations, products, temperature, and atmosphere dependency by acid pretreatment-assisted pyrolysis and gasification of hyperaccumulator (*Pteris vittata* L.) biomass / S. Huang, Z. Huang, Z. Chen, J. Wang, F. Evrendilek, J. Liu, S. Sun // *Journal of cleaner production*. — 2024. — Vol. 450. — P. 142004. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142004 (дата обращения: 10.04.2026).
52. Cui, Z. Transformation and stabilization of heavy metals during pyrolysis of organic and inorganic-dominated sewage sludges and their mechanisms / Z. Cui, G. Xu, B. Ormeci, H. Liu, Z. Zhang // *Waste management*. — 2022. — Vol. 150. — P. 57–65. — DOI: 10.1016/j.wasman.2022.06.023 (дата обращения: 10.04.2026).

53. Sørmo, E. Heavy metals in pyrolysis of contaminated wastes: phase distribution and leaching behavior / E. Sørmo, G. Dublet-Adli, G. Menlah, G.Ø. Flatabø, V. Zivanovic, P. Carlsson, G. Cornelissen // *Environments*. — 2024. — Vol. 11. — № 6. — P. 130. — DOI: 10.3390/environments11060130 (дата обращения: 10.04.2026).
54. Kistler, R.C. Behavior of chromium, nickel, copper, zinc, cadmium, mercury, and lead during the pyrolysis of sewage sludge / R.C. Kistler, F. Widmer, P.H. Brunner // *Environmental science & technology*. — 1987. — Vol. 21. — P. 704–8. — DOI: 10.1021/es00161a012 (дата обращения: 10.04.2026).
55. Makowska, D. Effects of pyrolysis parameters on biochar derived from sewage sludge including environmental risk assessment of heavy metals / D. Makowska, M. Pandiyan, K. Kapusta, K. Kolarz, Z. Stypka, A.L. Boehman, M.S. Wooldridge // *Journal of environmental management*. — 2025. — Vol. 395. — P. 127888. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.127888 (дата обращения: 10.04.2026).
56. Zhang, J. Comparison of ashing and pyrolysis treatment on cadmium/zinc hyperaccumulator plant: effects on bioavailability and metal speciation in solid residues and risk assessment / J. Zhang, S. Wu, J. Xu, P. Liang, M. Wang, R. Naidu, S. Wu // *Environmental pollution*. — 2021. — Vol. 272. — P. 116039. — DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116039 (дата обращения: 10.04.2026).
57. Guo, Z. Effect of pyrolysis temperature on migration characteristics of heavy metals during biomass pyrolysis / Z. Guo, W. Zhou, Y. Liu, X. Li, B. Bai, F. Li, G. Yang // *Journal of the energy institute*. — 2024. — Vol. 117. — P. 101840. — DOI: 10.1016/j.joei.2024.101840 (дата обращения: 10.04.2026).
58. Du, H. An integrated experimental and theoretical study on Si/Al-based and Ca-based additives for immobilizing heavy metals during pyrolysis of high-organic solid waste / H. Du, Z. Zhong, B. Jin, D. Zhang, X. Zheng, Y. Yang, Q. Li // *Journal of environmental chemical engineering*. — 2024. — Vol. 12. — № 2. — P. 111958. — DOI: 10.1016/j.jece.2024.111958 (дата обращения: 10.04.2026).
59. Saffari, M. The fate and mobility of chromium, arsenic and zinc in municipal sewage sludge during the co-pyrolysis process with organic and inorganic chlorides / M. Saffari, M. Moazallahi, R. Mashayekhi // *Scientific reports*. — 2025. — Vol. 15. — № 1. — P. 2986. — DOI: 10.1038/s41598-025-87169-3 (дата обращения: 10.04.2026).
60. Talwar, P. Pyrolysis process, reactors, products, and applications: a review / P. Talwar, M.A. Agudelo, S. Nanda // *Energies*. — 2025. — Vol. 18. — № 11. — P. 2979. — DOI: RePEc:gam:jeners:v:18:y:2025:i:11:p:2979-d:1672355 (дата обращения: 10.04.2026).
61. Wan, G. Emission of nitrogen/sulfur pollutants and migration of heavy metals during combustion of oily sludge from the oil refining process in fluidized bed / G. Wan, L. Sun, L. Xu, L. Lin // *Journal of the energy institute*. — 2024. — Vol. 112. — P. 101476. — DOI: 10.1016/j.joei.2023.101476 (дата обращения: 10.04.2026).
62. Jin, Y. Combustion effects and emission characteristics of SO₂, CO, NO_x and heavy metals during co-combustion of coal and dewatered sludge / Y. Jin, Y. Li, F. Liu // *Frontiers of environmental science & engineering*. — 2016. — Vol. 10. — № 1. — P. 201–210. — DOI: 10.1007/s11783-014-0739-9 (дата обращения: 10.04.2026).
63. Ajorloo, M. Heavy metals removal/stabilization from municipal solid waste incineration fly ash: a review and recent trends / M. Ajorloo, M. Ghodrat, J. Scott, V. Strezov // *Journal of material cycles and waste management*. — 2022. — Vol. 24. — № 5. — P. 1693–1717. — DOI: 10.1007/s10163-022-01459-w (дата обращения: 10.04.2026).

64. Ewald, A. Pulverized sewage sludge combustion with potassium chloride addition — fate of phosphorus, potassium, sulfur, and heavy metals / A. Ewald, G. Roeder, H. Spliethoff, S. Fendt // ACS omega. — 2025. — Vol. 10. — № 24. — P. 25733–25745. — DOI: 10.1021/acsomega.5c01774 (дата обращения: 10.04.2026).
65. Shuai, G. Migration characteristics of heavy metals during co-combustion of dehydrated sludge with straw / G. Shuai, Y. Shi-xiang, C. De-yong, L. Hong-peng, S. Bai-zhong // Journal of fuel chemistry and technology. — 2022. — Vol. 50. — № 3. — P. 283–294. — DOI: 10.1016/S1872-5813(21)60168-8 (дата обращения: 10.04.2026).
66. Guo, F. Migration and distribution of heavy metals during co-combustion of sedum plumbizincicola and coal / F. Guo, Z. Zhong, H. Xue, D. Zhong // Waste and biomass valorization. — 2018. — Vol. 9. — № 11. — P. 2203–2210. — DOI: 10.1007/s12649-017-9955-4 (дата обращения: 10.04.2026).
67. Sui, H. Combustion of phytoremediation biomass for recycling utilization: thermal behavior, kinetic analysis, and release of heavy metal / H. Sui, H. Jiang, G. Li, J. Chen, W. Cheng, H. Chen // Industrial crops and products. — 2025. — Vol. 230. — P. 121047. — DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.121047 (дата обращения: 10.04.2026).
68. Yeo, R.J. Strategies for heavy metals immobilization in municipal solid waste incineration bottom ash: a critical review / R.J. Yeo, A. Sng, C. Wang, L. Tao, Q. Zhu, J. Bu // Reviews in environmental science and bio/technology. — 2024. — Vol. 23. — № 2. — P. 503–568. — DOI: 10.1007/s11157-024-09694-3 (дата обращения: 10.04.2026).
69. Ighalo, J.O. Biomass hydrochar: a critical review of process chemistry, synthesis methodology, and applications / J.O. Ighalo, F.C. Akaeme, J. Georgin, J.S. de Oliveira, D.S. Franco // Sustainability. — 2025. — Vol. 17. — № 4. — P. 1660. — DOI: 10.3390/su17041660 (дата обращения: 10.04.2026).
70. Wang, J. Hydrothermal carbonization of heavy metal-contaminated biomass: migration, transformation, and ecological stability changes of metals / J. Wang, S. Zhang, C. Wei, H. Hou, G. Song, L. Cao, J. Zhang // International journal of molecular sciences. — 2025. — Vol. 26. — № 6. — P. 2551. — DOI: 10.3390/ijms26062551 (дата обращения: 10.04.2026).
71. Koutsonikolas, D. Membrane and electrochemical based technologies for the decontamination of exploitable streams produced by thermochemical processing of contaminated biomass / D. Koutsonikolas, G. Karagiannakis, K. Plakas, V. Chatzis, G. Skevis, P. Giudicianni, K. Stoll // Energies. — 2022. — Vol. 15. — № 7. — P. 2683. — DOI: 10.3390/en15072683 (дата обращения: 10.04.2026).
72. Naaz, F. Impact of heavy metal laden algal biomass on hydrothermal liquefaction and biorefinery approach / F. Naaz, A. Bhattacharya, K.K. Pant, A. Malik // Process safety and environmental protection. — 2021. — Vol. 145. — P. 141–149. — DOI: 10.1016/j.psep.2020.08.005 (дата обращения: 10.04.2026).
73. Zhang, J. Hydrothermal conversion of Cd/Zn hyperaccumulator (*Sedum alfredii*) for heavy metal separation and hydrochar production / J. Zhang, Y. Wang, X. Wang, W. Wu, X. Cui, Z. Cheng, G. Chen // Journal of hazardous materials. — 2022. — Vol. 423. — P. 127122. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127122 (дата обращения: 10.04.2026).

74. Song, H. Efficient removal of heavy metals from contaminated sunflower straw by an acid-assisted hydrothermal process / H. Song, J. Zhou, S. He, Q. Ma, L. Peng, M. Yin, Q. Zeng. // International journal of environmental research and public health. — 2023. — Vol. 20. — № 2. — P. 1311. — DOI: 10.3390/ijerph20021311 (дата обращения: 10.04.2026).
75. Bo, Z. Optimization conversion of willow biomass derived from phytoremediation into value-added hydrochars: effects of temperature and medium on Cd/Zn distribution and application potentials / Z. Bo, L. Haihua, Y. Xiaoli, Z. Weibin, C. Yan, D. Dongliu, C. Guangcai // Energy conversion and management. — 2024. — Vol. X. — № 24. — P. 100698. — DOI: 10.1016/j.ecmx.2024.100698 (дата обращения: 10.04.2026).
76. Zhao, B. Hydrochar derived from willow using in phytoremediation: hydrochar properties, metals behavior and potential applications / B. Zhao, H. Li, X. Yang, J. Xiao, G. Chen // Separation and purification technology. — 2024. — Vol. 339. — P. 126697. — DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126697 (дата обращения: 10.04.2026).
77. Chen, H. Hydrothermal conversion of the hyperaccumulator *Sedum alfredii* Hance for efficiently recovering heavy metals and bio-oil / H. Chen, X. Wang, X. Lyu, L. Xu, J. Wang, X. Lu // Journal of environmental chemical engineering. — 2019. — Vol. 7. — № 5. — P. 103321. — DOI: 10.1016/j.jece.2019.103321 (дата обращения: 10.04.2026).
78. He, C. Transformation behaviors and environmental risk assessment of heavy metals during resource recovery from *Sedum plumbizincicola* via hydrothermal liquefaction / C. He, Z. Zhang, C. Xie, A. Giannis, Z. Chen, Y. Tang, R. Qiu // Journal of hazardous materials. — 2021. — Vol. 410. — P. 124588. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124588 (дата обращения: 10.04.2026).
79. Cui, X. Hydrothermal treatment of the pristine and contaminated Cd/Zn hyperaccumulators for bio-oil production and heavy metal separation / X. Cui, X. Li, J. Zhang, Q. Lin, H. Xiao, Z. Cheng, G. Chen // ACS sustainable chemistry & engineering. — 2021. — Vol. 10. — № 1. — P. 603–612. — DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c07151 (дата обращения: 10.04.2026).
80. Lee, J. Conversion of heavy metal-containing biowaste from phytoremediation site to value-added solid fuel through hydrothermal carbonization / J. Lee, K.Y. Park // Environmental pollution. — 2021. — Vol. 269. — P. 116127. — DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116127 (дата обращения: 10.04.2026).
81. Chen, Y. One-pot synthesis of high-efficiency hydroxyapatite-hydrochar composites derived from phytoremediation biomass and bone meal: heavy metal stabilization, adsorption performance and mechanism / Y. Chen, C. Shi, B. Zhao, D. Di, J. Xiao, G. Chen // Journal of alloys and compounds. — 2025. — Vol. 1022. — P. 179859. — DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.179859 (дата обращения: 10.04.2026).
82. Su, W. Supercritical water gasification of hyperaccumulators for hydrogen production and heavy metal immobilization with alkali metal catalysts / W. Su, M. Zhao, Y. Xing, H. Ma, P. Liu, X. Li, C. Xia // Environmental research. — 2022. — Vol. 214. — P. 114093. — DOI: 10.1016/j.envres.2022.114093 (дата обращения: 10.04.2026).
83. Chai, Y. Production of furan chemicals from contaminated biomass using hydrothermal-assisted activated persulfate strategy: exploring the critical role of heavy metals on products / Y. Chai, J. Yuan, M. Bai, A. Chen, S. Zhu, L. Zhou, Z. Zhou // Chemical engineering journal. — 2023. — Vol. 464. — P. 142594. — DOI: 10.1016/j.ccej.2023.142594 (дата обращения: 10.04.2026).

84. Rückel, A. Conversion of syngas from entrained flow gasification of biogenic residues with clostridium carboxidivorans and clostridium autoethanogenum / A. Rückel, A. Oppelt, P. Leuter, P. Johne, S. Fendt, D. Weuster-Botz // *Fermentation*. — 2022. — Vol. 8 — № 9. — P. 465. — DOI: 10.3390/fermentation8090465 (дата обращения: 10.04.2026).
85. Ritz, M. Experimental investigation of heavy metal release in entrained-flow biomass gasification / M. Ritz, M. Dossow, H. Mörtenkötter, H. Spliethoff, S. Fendt // *Fuel*. — 2025. — Vol. 387. — P. 134379. — DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134379 (дата обращения: 10.04.2026).
86. Raheem, A. Roles of heavy metals during pyrolysis and gasification of metal-contaminated waste biomass: a review / A. Raheem, Q. He, F.H. Mangi, C. Areeprasert, L. Ding, G. Yu // *Energy & fuels*. — 2022. — Vol. 36 — № 5. — P. 2351–2368. — DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c04051 (дата обращения: 10.04.2026).
87. Das, K. Biomass gasification in an industrial-scale entrained flow gasifier and effects of various parameters on gasification performance: an approach based on numerical models / K. Das, S. Kumar, S. Bhattacharya // *Fuel*. — 2026. — Vol. 405. — P. 136537. — DOI: 10.1016/j.fuel.2025.136537 (дата обращения: 10.04.2026).
88. Gallucci, F. Fluidized bed gasification of biomass from plant-assisted bioremediation: fate of contaminants / F. Gallucci, E. Paris, A. Palma, B. Vincenti, M. Carnevale, V. Ancona, D. Borello // *Sustainable energy technologies and assessments*. — 2022. — Vol. 53. — P. 102458. — DOI: 10.1016/j.seta.2022.102458 (дата обращения: 10.04.2026).
89. Soprych, P. The use of biomass ash as a catalyst in the gasification process — a review / P. Soprych, G. Czerski // *Energies*. — 2025. — Vol. 18 — № 21. — P. 1–36.

Gladun Igor Vladimirovich

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

E-mail: 006209@togudv.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8667-3019>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=91054

Mayorova Lyudmila Petrovna

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

E-mail: 000318@togudv.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6326-982X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=496438

Thermochemical conversion of plant biomass contaminated with heavy metals

Abstract. Chemical contamination of agricultural soils with heavy metals is a global problem that poses a risk to human health. Biological technology of phytoremediation is considered promising for the rehabilitation of agricultural lands contaminated with heavy metals, a significant disadvantage of which is the issue of disposal of contaminated plant biomass. The literature review analyzed the results of studies on the behavior of heavy metals contained in plant biomass after phytoremediation in the process of traditional and innovative thermochemical disposal technologies. The choice of technology for the thermochemical conversion of plant biomass contaminated with heavy metals should be carried out simultaneously with the improvement of phytoremediation technology, which takes into account factors affecting the chemical composition of plant biomass, in particular, the improvement of agricultural techniques for growing individual zoned varieties and plant species capable of accumulating heavy metals during the growing season. The authors present in tabular form a comprehensive assessment of thermochemical conversion technologies (pyrolysis, combustion, gasification, hydrothermal carbonation) of plant biomass contaminated with heavy metals with consideration of process conditions, products obtained, localization of heavy metals, advantages and disadvantages of methods. It is concluded that future fundamental and applied research, using an interdisciplinary approach, should focus on the development of industrial environmentally friendly technologies for the thermochemical conversion of plant biomass contaminated with heavy metals after the phytoremediation process, meeting the global bioenergy needs of countries.

Keywords: soils; heavy metals; phytoremediation; plant biomass; thermochemical conversion; integrated assessment