

УДК 628.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛУЗГИ И КОМПОНЕНТОВ БИОМАССЫ ПОДСОЛНЕЧНИКА ОДНОЛЕТНЕГО (*HELIANTHUS ANNUUS*) В КАЧЕСТВЕ СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ВОДНЫХ СРЕД

© *И.Г. Шайхиев¹, С.В. Свергузова^{2*}, Ж.А. Сапронова², К.И. Шайхиева¹, Е.В. Локтионова²*

¹ *Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, 420015, Россия*

² *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, Белгород, 308012, Россия, re@intbel.ru*

Обобщены литературные сведения по использованию отходов от переработки семян и компонентов биомассы подсолнечника (*Helianthus annuus* L.) в качестве сорбционных материалов для извлечения различных поллютантов из водных сред. Кратко приведены сведения об объемах выращивания семян подсолнечника в Российской Федерации. Приведены данные по составу лузги семян (ЛСП) и компонентов биомассы подсолнечника. Показано, что массовая доля сырой клетчатки в компонентах биомассы растения, по данным различных литературных источников, составляет от 17.09 до 30.1%, а в ЛСП достигает 67%, что обуславливает высокие сорбционные свойства материал. Кратко приведена информация о путях использования частей и отходов от переработки растения в различных отраслях народного хозяйства. Выявлено, что наибольшее количество публикаций посвящено использованию ЛСП в качестве сорбента для удаления загрязняющих веществ из модельных и реальных сточных вод. Приведены сведения о возможности извлечения с помощью ЛСП и компонентов биомассы подсолнечника ионов Ca^{2+} , Cd^{2+} , Cr(III) , Cr(VI) , Co^{2+} , Cs^+ , Cu^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Mn(II) , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Th^{3+} , U(VI) и Zn^{2+} . Приведены данные по удалению из растворов органических соединений, таких как красители, нефтепродукты и др. Приведены данные по значениям максимальной сорбционной емкости и эффективности извлечения загрязняющих веществ ЛСП, а также компонентами биомассы растения. Определено, что изотермы адсорбции, в большинстве случаев, хорошо описываются моделями Ленгмюра и Фрейндлиха, а кинетика процессов, в подавляющем случае, соответствует модели псевдотортого порядка.

Ключевые слова: подсолнечник, *Helianthus annuus*, отходы переработки семян, компоненты биомассы, водная среда, сорбция, ионы тяжелые металлы, органические загрязнения.

Для цитирования: Шайхиев И.Г., Свергузова С.В., Сапронова Ж.А., Шайхиева К.И., Локтионова Е.В. Использование лузги и компонентов биомассы подсолнечника однолетнего (*Helianthus annuus*) в качестве сорбционного материала для удаления загрязняющих веществ из водных сред // Химия растительного сырья. 2026. №2. С. 57–83. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260217572>.

Введение

В настоящее время в мире наблюдается устойчивая тенденция увеличения производства различных растительных продуктов питания. Данное обстоятельство обусловлено увеличением численности населения планеты. По прогнозам ученых, численность людей к 2050 г. достигнет 10 млрд человек [1]. Естественно, переработка сельскохозяйственного сырья приводит к образованию огромного количества соответствующих агропромышленных отходов. Указывается, что мировой годовой объем образования отходов от производства сельскохозяйственной продукции исчисляется миллиардами тонн в год, в России – 630–650 млн тонн [2].

Образующиеся отходы переработки сельхозсырья, как правило, не находят должного вторичного использования, сжигаются, запахиваются в почву, используются в качестве подстилки для содержания животных и т.д. Определено большое количество путей использования отходов в качестве вторичных материальных ресурсов. В частности, указывается, что из них возможно выделять целлюлозу и наноцеллюлозу [3], лигнин

* Автор, с которым следует вести переписку.

[4], каротиноиды, различные антиоксиданты, полифенолы, пищевые волокна, витамины, ферменты, масла и целый ряд других химических соединений [5–10]. Также возможно использование сельскохозяйственных растительных отходов в качестве удобрения [11, 12], компонента в строительных [13, 14] и полимерных композиционных материалах [15], сорбционных материалов (СМ) для извлечения загрязняющих веществ из водных сред [16–18], для получения водорода, метана, биоэтанола в процессах сбраживания [19, 20] и др.

В последнее время в мире стремительно развивается инновационное направление в области охраны окружающей среды – использование отходов и компонентов биомассы сельскохозяйственных растений в качестве СМ для извлечения различных загрязняющих веществ (поллютантов) из природных и сточных вод. Многочисленными публикациями показано, что отходы от переработки злаковых культур (солома, плодовые оболочки зерен, отруби и др.) [21–32], сахарного тростника [33, 34] и сахарной свеклы [35], репчатого лука и чеснока [36, 37], бахчевых культур [38, 39], кожура фруктов [40–42], скорлупа орехов [43–45] и др. являются эффективными СМ для удаления широкой гаммы поллютантов из водных сред.

Широко распространенной масличной культурой в Российской Федерации является подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus*) – вид травянистых растений из рода Подсолнечник семейства Астровые. Является одной из важнейших масличных культур. Стебель достигает 5 м (у масличных сортов 0.6–2.5 м), прямостоячий, преимущественно неветвящийся, покрыт жесткими волосками. Внутри стебля находится мягкая, упругая сердцевина. Листья растения очередные, на длинных черешках, верхние сидячие, нижние супротивные, зеленые, овально-сердцевидные с заостренными концами, с пластиной до 40 см длины, опушенные короткими жесткими волосками (что обеспечивает ему большую засухоустойчивость), с пильчатыми краями. Цветки в верхушечных, очень крупных соцветиях-корзинках, окруженных оберточными листьями, 30–50 см в диаметре. Краевые цветки язычковые, 4–7 см длины, обычно бесплодные; внутренние – трубчатые, обоополые, многочисленные (500–2000). Окраска цветков от светло-желтой до темно-оранжевой, иногда фиолетовая. Венчик пятичленный. Цветет в июле – августе в течение 30 дней. Плоды – продолговато-яйцевидные семечки, слабогранистые, слегка сжатые, длиной 8–15 мм длины и 4–8 мм ширины, с кожистым околоплодником, белые, серые, полосатые или черные. Состоят из околоплодника (кожуры, или лужги) и белого семени (ядра), покрытого семенной оболочкой [46].

Крупнейшими производителями семян подсолнечника являются Украина и Российская Федерация. В России в 2023 г. было произведено 17.3 млн тонн, из регионов наибольшие показатели производства достигнуты в Саратовской (2040 тыс. т), Ростовской (2029 тыс. т) и Волгоградской (1303 тыс. т) областях [47]. Средняя урожайность семян подсолнечника однолетнего составляет 10 ц/га, максимальная – 45 ц/га [46].

Семена подсолнечника употребляются в пищу и используются для производства подсолнечного масла. Побочным продуктом переработки семян подсолнечника являются плодовые оболочки – так называемая «лужга», которые представляют собой одревесневшую растительную ткань, однородную по физической структуре, с постоянным химическим составом и физико-механическими свойствами [48]. Лужга семян подсолнечника (ЛСП) богата целлюлозой, лигнином и гемицеллюлозой, они составляют 79–90% от ее состава. Остальные 10% – абсолютно-сухие вещества, которые представлены липидами, восками, протеином и минералами. Состав ЛСП по данным некоторых литературных источников приведен в таблице.

Состав ЛСП зависит от многих параметров, таких как, в частности, состав почвы, на которой выращивается растение, погодных условий, места произрастания, сорта и т.д. и в зависимости от них меняется в широких пределах (табл.).

Приведено содержание аминокислот в составе ЛСП, в % от общего количества [54]: аспарагиновая кислота – 13.4, глутаминовая кислота – 10.1, гидроксипролин – 9.1, аланин – 8.0, серин, глицин и пролин – по 7.3, треонин и аспарагиновая кислота – по 5.8, лизин – 5.1, триптофан – 4.4, аргинин – 3.6, фенилаланин – 3.25, гистидин – 2.5 и лейцин – 2.2. В этой же работе [54] приведено содержание жирных кислот в составе лужги семян *Helianthus annuus*, % от общего содержания: арахидоновая – 46.5, бегеновая – 16.3, пальмитиновая – 6.8, стеариновая – 5.6, олеиновая – 4.72, тетракозановая – 4.5, нонадециловая – 3.07, миристиновая – 1.94, линолевая – 0.78, пентадекановая – 0.4, пентакозановая – 0.23, гептадекановая – 0.2.

ЛСП нашла широкое применение в различных отраслях народного хозяйства, о чем освещено в обзоре [55]. Следует отметить, что ЛСП, в частности, может использоваться в качестве наполнителя в составе строительных материалов [56], полимерных композиций [57], для получения карбонизатов и активированных углей [58] и др.

Химический состав лузги семян подсолнечника

Показатели	Литературный источник					
	[48]	[49]	[50]	[51]	[52]	[53]
Влажность, %	7.88	–	10.74–14.08	14.26	2.85	–
Массовая доля сырого белка, %	7.82	2.90	3.25–4.42	9.41	2.28	1.3–5.7
Массовая доля сырого жира, %	8.81	3.34	3.65–4.69	4.32	3.62	0.5–3.8
Массовая доля сырой клетчатки, %	–	61.80	52.54–60.81	55.93	58.73	49.0–67.0
Массовая доля общей золы, %	2.45	2.46	2.39–2.98	8.01	4.63	1.5–4.3

Одним из путей использования отходов от переработки сельскохозяйственного сырья, как говорилось выше, является их применение в качестве СМ для извлечения различных загрязняющих веществ из водных сред. Подсолнечные жмыхи, шроты и ЛСП также исследовались в качестве СМ для удаления поллютантов из сточных и природных вод. В настоящем обзоре обобщены сведения по применению отходов от переработки семян подсолнечника в качестве СМ.

Использование лузги семян подсолнечника для удаления ионов металлов из водных сред

Высокое содержание протеинов и жирных кислот, а также природных полимеров, имеющих в своем составе различные функциональные группировки, способствует возможности использования продуктов переработки семян подсолнечника для извлечения ионов различных металлов, в основном тяжелых (ИТМ), из водных сред. Как показал анализ литературных источников, наибольшее количество публикаций посвящено применению лузги семян *Helianthus annuus* в качестве СМ для удаления ионов металлов из воды [59, 60]. Для облегчения обработки информации, ионы металлов в данном обзоре располагаются в алфавитном порядке.

Ионы Cr(VI). Исследована адсорбция ионов Cr(VI) с начальной концентрацией 10–30 мг/дм³ нативной ЛСП. Определено, что в статических условиях изотермы адсорбции одинаково точно описываются моделями Ленгмюра и Редлиха-Петерсона, а в динамических условиях – моделями Бохарта-Адамса и Вольборского. Определено, что максимальная сорбционная емкость (Q_{\max}) увеличилась с 0.7 до 2.8 мг/г при начальных концентрациях ионов хрома 10 и 30 мг/дм³ соответственно. Проведенные эксперименты показали полное извлечение ионов Cr(VI) при их начальной концентрации 10 мг/дм³, температуре 298 К и pH = 1, дозировке СМ 12.5 г/дм³ в течение 10 мин контактирования [61].

В качестве СМ для удаления ионов Cr(VI) использовались остатки ЛСП после извлечения из них меланина. Определено, что при соотношении раствор : СМ = 10 : 1, pH водной среды составило pH = 8.4. При таком значении pH, ионы Cr(VI) переходят в ионы Cr(III), образуя соответствующий гидроксид, который сорбируется на поверхности СМ. Найдено, что максимальная сорбционная емкость составила $Q_{\max} = 24$ мг/г после 60 мин взаимодействия [62].

Проводились исследования по удалению ионов Cr(VI) нативной и модифицированной ЛСП. Для модификации лузги использовались растворы кислот (H₂SO₄, HNO₃, HCl, H₃PO₄) и щелочей (KOH, NaOH). Результаты проведенных исследований показали, что кислотная модификация ЛСП более эффективна, чем ее обработка щелочами. Максимальную сорбционную емкость показала лузга, обработанная раствором H₂SO₄. Проведен 3-уровневый полный факторный эксперимент, который позволил определить, что Q_{\max} достигается при модификации ЛСП 2.5 М раствором серной кислоты при T = 60 °C в течение 30 мин [63].

Ионы Cs(I). Для сорбции радиоактивных изотопов ¹³⁷Cs применялись гексацианоферраты натрия или калия, внедренные в матрицу, в качестве которой служила ЛСП. Сухая лузга массой 100 г размачивалась в воде в течение 30 мин, затем помещалась в 700 см³ 10% водного раствора K₄[Fe(CN)₆]. Через 15 мин раствор сливали и целлюлозную массу промывали небольшим количеством воды. Далее ЛСП обрабатывалась 3%-ным раствором CuSO₄ в течение 15 мин, при этом в поры СМ внедрялись молекулы гексацианоферрата. Выявлено, что полученный СМ улавливает 60% растворенных в воде изотопов ¹³⁷Cs. Определено, что обработка полученного композита 10% раствором NH₄Cl позволяет увеличить до 88% степень поглощения радиоактивных ионов [64].

Ионы Cu(II). Исследована адсорбция ионов Cu²⁺ нативной ЛСП. Выявлено, что при начальной концентрации ионов меди 150 мг/дм³, массе лузги 5 г, соотношении раствор : лузга = 20 : 1, pH = 5.5, при комнатной температуре степень сорбции ионов Cu²⁺ после 24 ч контактирования достигла 73.34% [65].

Изучена адсорбция ионов Cu²⁺ из синтетического раствора немодифицированной ЛСП. Методом ИК-спектроскопии выявлено наличие специфических функциональных групп (гидроксильных, карбоксильных,

карбонильных и аминных) на поверхности лузги, ответственных за удаление ионов Cu^{2+} . Выявлено, что изотерма адсорбции более точно ($R^2 = 0.966$) описывается моделью Фрейндлиха. Определено, что максимальная адсорбционная способность по ионам Cu^{2+} , рассчитанная по уравнению Ленгмюра, составила 34.89 мг/г [66].

В работе [67] определено, что сорбционная емкость нативной ЛСП составляет 4.8 мг/г. Повысить сорбционные характеристики рассматриваемого СМ удалось модификацией лузги растворами H_3PO_4 (5%) и HCl (0.5 н), а также NaOH (500 мг/дм³). Выявлено, что обработка указанными реагентами увеличила значение сорбционной емкости до 34, 30 и 28 мг/г соответственно.

Нативная ЛСП, после кислотной обработки и после выделения меламина также исследовались для извлечения ионов меди из модельных растворов. Выявлено, что наибольшей сорбционной емкостью ($Q_{\text{max}} = 25$ мг/г) обладает материал после выделения меламина. Остальные сорбенты имели значения $Q_{\text{max}} = 10$ и 20 мг/г, соответственно. Найдено, что степень извлечения ионов Cu^{2+} из водных растворов может достигать высоких значений – порядка 98.6–99.6% при работе с растворами концентрацией ионов Cu^{2+} начиная от 0.1 и до 1 мг/см³ [68].

Ионы Fe(III). В работе [69] исследована сорбционная способность ЛСП по отношению к ионам Fe^{3+} , а также изучено влияние температуры на процесс адсорбции. Процесс проводился при различных температурах (293, 303, 310, 323 К) из постоянного объема раствора ($V = 20$ см³). К растворам, содержащим ионы Fe^{3+} с концентрацией 100 мг/дм³, добавлялись навески сорбента различных масс – от 0.01 до 0.5 г. Время перемешивания составляло 30 мин. Выявлено, что с повышением температуры степень извлечения ионов железа возрастает. При $T = 293$ К эффективность адсорбции достигает 65% при массе сорбента 0.5 г, при $T = 323$ К данный показатель составляет 84% [68]. Для увеличения сорбционных характеристик ЛСП рекомендуется ее модификация наноразмерными частицами MnO_2 [70].

Ионы Ni(II). Проводились эксперименты по изучению адсорбции в статических условиях для удаления ионов Ni^{2+} ЛСП. Определено, что максимальная эффективность адсорбции ионов Ni^{2+} (76%) была получена при $\text{pH} = 6.5$, дозировке СМ 20 г/дм³, начальной концентрации ионов металла 20 мг/дм³ и времени контакта 2 ч. Определено, что максимальная сорбционная емкость ЛСП по ионам никеля, вычисленная из уравнения Ленгмюра, составила 5.29 мг/г. Изотермы адсорбции более точно описываются также моделью Ленгмюра. Термодинамические параметры ($\Delta G^\circ = -9.54 - -1.59$ кДж/моль при 283–353 К, $\Delta S^\circ = 52$ Дж/моль·К, $\Delta H^\circ = -42.07$ кДж/моль) показали, что процесс адсорбции являлся спонтанным, термодинамически благоприятным и экзотермическим в заданном диапазоне температур (10–80 °С) [71].

Также изучалась адсорбция ионов Ni^{2+} различными СМ, в том числе и ЛСП. Для этого в модельный раствор, содержащий ионы никеля с начальной концентрацией 10 мг/дм³, вносились навески сорбентов в количестве от 5 до 30 г/дм³. Эксперименты проводились при температуре 20 °С при перемешивании компонентов в течение 15 мин. Результаты экспериментов показали, что увеличение количества СМ в указанных пределах способствует повышению эффективности очистки. При использовании для очистки лузги гречихи эффективность очистки (69%) незначительно выше, чем при добавлении к раствору ЛСП (56%), и намного выше по сравнению с вариантом применения скорлупы грецкого ореха (24%) [72].

Ионы Pb(II). Изучено влияние различных параметров на адсорбцию ионов Pb^{2+} ЛСП, таких как pH , время контакта, дозировка адсорбента и концентрация ионов металла. Выявлено, что наилучшая эффективность удаления (94.5%) достигается при $\text{pH} = 5$, времени контакта 120 мин, дозировке ЛСП 10 г/дм³ при начальной концентрации ионов свинца 10 мг/дм³ при комнатной температуре. Выявлено, что модель Фрейндлиха более точно описывает изотерму адсорбции ($R^2 = 0.9998$) по сравнению с моделью Ленгмюра ($R^2 = 0.8540$). Максимальная сорбционная емкость ЛСП для ионов Pb^{2+} составила 29.76 мг/г [73].

Ионы Th(III). В работе [74] при изучении адсорбции ионов Th^{3+} на ЛСП использовался метод Тагучи для оптимизации переменных параметров. Были выбраны модель «больше – лучше» отношения сигнал/шум и матрица ортогонального массива L9. Обоснованность дизайна и качество прогнозируемого отклика были проверены с помощью модели ANOVA. Определено, что влияние pH и начальной концентрации ионов Th^{3+} на адсорбцию было значительным. Оптимальные условия в результате проектирования были определены как время контакта – 1 ч, $\text{pH} = 4$, температура – 35 °С и начальная концентрация ионов металла – 100 мг/дм³, а оптимальная поглощающая способность составила 39.86±0.96 мг/г [74].

Ионы Zn(II). Исследована адсорбция ионов Zn^{2+} на нативной и модифицированной 0.5% раствором NaOH или 0.1 н раствором H_3PO_4 ЛСП. Для изучения сорбционной емкости в статических условиях

готовились модельные растворы ионов Zn^{2+} с содержанием от 10 до 1500 мг/дм³. По полученным изотермам адсорбции определено, что максимальная сорбционная емкость нативной ЛСП по ионам цинка составляет ~50 мг/г, после обработки раствором ортофосфорной кислоты увеличивается до 80 мг/г, после модификации раствором гидроксида натрия – повышается до 120 мг/г [75].

Ионы двух металлов. Как следует из вышеприведенных данных, значения сорбционной емкости по ионам металлов в некоторых случаях разительно отличаются. Данное обстоятельство определяется тем, что эксперименты различными группами авторов проводились в различных условиях. Для того чтобы сравнивать сорбционные характеристики по двум и более металлам, необходимо осуществление экспериментов в адекватных условиях.

В частности, исследована адсорбция ионов Pb^{2+} и Cd^{2+} из модельных растворов на ЛСП, скорлупе грецкого ореха и косточках сливы. Изотермы адсорбции названных ионов на ЛСП более точно описываются моделью Ленгмюра. Найдено, что наибольшей сорбционной емкостью по ионам Pb^{2+} ($Q_{max} = 36.93$ мг/г) и Cd^{2+} ($Q_{max} = 19.93$ мг/г) обладает ЛСП. Рассчитанные значения термодинамических функций указывают на спонтанный ($\Delta G^{\circ} < 0$) и экзотермический ($\Delta H^{\circ} < 0$) характер сорбционных процессов. Исследования по десорбции подтверждают возможность извлечения названных ИТМ и возможность повторного использования СМ после регенерации [76].

Также исследовалась адсорбция ионов Cu^{2+} и Fe^{2+} тремя видами СМ на основе ЛСП: ЛСП после извлечения меланина при обработке раствором NaOH концентрацией 0.25 М; СМ, полученный кислотной обработкой лузги [77] и нативная измельченная ЛСП. В качестве модельных сред использовались растворы с концентрацией ионов Cu^{2+} и Fe^{2+} по 0.5 мг/см³. Процесс сорбции проводился в статических условиях при соотношении СМ : ИТМ = 50 : 1. Определено, что наибольшей сорбционной емкостью по ионам Cu^{2+} и Fe^{2+} обладает ЛСП после извлечения меланина – по 25 мг/г, наименьшей – нативная ЛСП – 10 и 12.5 мг/г, соответственно [78, 79]. Для увеличения сорбционной емкости ЛСП, последнюю предложено обрабатывать в 0.5 М растворе NaOH при массовом соотношении лузга/раствор NaOH, равном 1 : 5, в поле СВЧ с удельной мощностью 1–5 Вт/см³ в течение 5–15 мин [80]. Для определения сорбционной способности полученного материала по отношению к ионам железа и меди, готовились модельные растворы, содержащие ионы Fe^{2+} и Cu^{2+} , соответственно, в концентрации 0.6 и 1.0, а также 250.0 мг/дм³, в которых настаивались в течение 1 ч навески исследуемых СМ (10 г/дм³). Определено, что предлагаемый способ позволяет увеличить сорбционную способность продукта по ионам Cu^{2+} на 6–15%, по ионам Fe^{2+} – на 10–19% [80].

Исследовалась возможность использования ЛСП в качестве адсорбента для удаления ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} из модельных растворов. Оценивалось влияние следующих параметров, таких как pH, дозировка сорбента, время контакта, скорость перемешивания и начальная концентрация ионов металла. Результаты экспериментов показали, что наилучшие результаты достигались при pH = 5, 7 г/дм³, 120 мин, 175 об./мин и 10 мг/дм³ для обоих ионов, соответственно. При этих параметрах адсорбционная емкость ЛСП, рассчитанная по модели Ленгмюра, достигала 23.49 мг/г для ионов Cu^{2+} и 11.31 мг/г – для ионов Ni^{2+} в однокомпонентной системе и снизилась до 18.69 и 9.24 мг/г, соответственно, в двухкомпонентной системе. Определено, что максимальная эффективностью удаления названных ионов составила 92.5 и 84.8% соответственно. Кинетические исследования показали, что модель псевдвторого порядка более точно описывала кинетику процесса [81].

Также ЛСП использовалась для биосорбции ионов Cu^{2+} и Pb^{2+} из модельных растворов. Эксперименты проводились с варьированием значений pH (2–7), времени контактирования (0–600 мин), начальной концентрации металлов (0.05–0.25 мг/дм³) и дозировки СМ (1–20 г/дм³). Выявлено, что максимальная эффективность удаления ионов металлов осуществляется при pH = 6, времени взаимодействия СМ с сорбатом 120 мин (Cu^{2+}) и 180 мин (Pb^{2+}), при наименьшей концентрации ионов металлов и наибольшей дозировки сорбента. Определено, что кинетика процесса одинаково точно ($R^2 = 0.99$) описывается моделями псевдопервого и псевдвторого порядка [82].

В работе [83] изучалось сорбционное удаление ионов Cu^{2+} и Zn^{2+} с начальной концентрацией 10–100 мг/дм³ ЛСП. Определено, что наиболее эффективно извлечение названных ионов осуществляется при pH = 8, времени контактирования 2 ч, скорости перемешивания 150 об./мин при 25 °С. С увеличением начальной концентрации с 10 до 100 мг/дм³, эффективность извлечения ионов Cu^{2+} снижается с 70 до 20%, ионов Zn^{2+} – с 78 до 20%. Максимальная сорбционная емкость, вычисленная по уравнению Ленгмюра, для условий экспериментов составила 0.39 мг/г для ионов меди и 0.27 мг/г – для ионов цинка. Выявлено, что изотермы адсорбции одинаково точно описываются моделями Ленгмюра и Фрейндлиха [83].

ЛСП и жмых семян подсолнечника (ЖСП) исследовались в качестве СМ по отношению к ионам Cu^{2+} и Zn^{2+} . Выявлено, что максимальная степень извлечения с помощью ЛСП составляет 88% для ионов Cu^{2+} и 81.4% для ионов Zn^{2+} . Измельчение ЛСП приводит к повышению степеней извлечения до 93% для ионов меди и 89% – для ионов цинка. В случае ЖСП максимальная степень извлечения составляет 72% по ионам Cu^{2+} и 80% – по ионам Zn^{2+} . В результате исследования кинетики процессов установлено, что взаимодействие описывается моделью псевдотортого порядка в случае адсорбции ионов Cu^{2+} и Zn^{2+} на ЛСП; ионов Cu^{2+} – на ЖСП. Для адсорбции ионов Zn^{2+} на ЖСП больше подходит модель псевдопервого порядка [84].

Также ЛСП использовалась для снижения жесткости воды. Как общеизвестно, жесткость воды определяется наличием в ней ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} . Чем выше содержание ионов кальция и магния, тем выше жесткость воды. Определено, что нативная ЛСП имеет сорбционную емкость по ионам жесткости 1.5 мг-экв/г. Обработка ЛСП растворами H_3PO_4 , HCl и NaOH способствует увеличению сорбционной емкости по катионам жесткости до 1.9, 2.2 и 2.3 мг-экв/г соответственно [85].

Ионы трех металлов. Выявлено несколько литературных источников, посвященных исследованиям адсорбции трех различных ионов металлов отходами от переработки семян подсолнечника. В частности, сосновые опилки, ЛСП и отходы от переработки кукурузы оценивались как адсорбенты для удаления ионов Cd^{2+} , Ni^{2+} и Zn^{2+} из модельных растворов. Определено, что ЛСП обладает наилучшими значениями эффективности удаления вышеназванных ИТМ в сравнении с другими СМ: 96.6% по ионам Cd^{2+} , 71.0% – по ионам Ni^{2+} и 89.2% – по ионам Zn^{2+} . Причем определено, что при сорбции из многокомпонентных водных растворов ИТМ эффективность извлечения последних ЛСП снижается незначительно. Рекомендовано отработанные СМ использовать для изготовления кирпичей в качестве способа утилизации [86].

В работе [87] проведено сравнительное удаление ионов Cd^{2+} , Pb^{2+} и Zn^{2+} комбинированным СМ на основе смеси отходов керамического производства (ОКП) и ЛСП. Для создания комбинированных сорбентов, ОКП и ЛСП были перемешаны в различных соотношениях. Смеси подвергали термообработке при температурах 250–350 °С при времени 15–25 мин и исследовали эффективность очистки воды от ИТМ с начальной концентрацией металлов 10 мг/дм³. Установлено, что наиболее высокими адсорбционными свойствами обладают сорбенты на основе смеси отходов в соотношении 50 : 50, термообработанных при 300 °С в течение 20 мин. В частности, показано, что эффективность (Э) очистки сточных вод комбинированными СМ с термообработанной ЛСП от катионов Pb^{2+} достигает 99% и превышает величины эффективности при использовании ОКП (Э = 97%) и термообработанной ЛСП (Э = 94.6%) [87].

Модифицированные образцы ЛСП также использовались для удаления ионов Cu^{2+} , Fe^{2+} и Mn(II) из модельных растворов. Для получения СМ из ЛСП исходный материал промывался горячей дистиллированной водой (90 °С) и 70% этанолом. Далее материал замачивался в концентрированной HCl с последующим погружением в раствор 33% NaOH в течение 2 ч при комнатной температуре. Либо же подвергался низкотемпературной обработке при -20 °С в течение 50 ч, после чего обрабатывали перегретым паром при температуре 130 °С. Начальные концентрации ионов Cu^{2+} , Fe^{2+} и Mn(II) составили 1.0, 0.6 и 0.1 мг/дм³; навески СМ составили 10 г/дм³. Модификация ЛСП различными способами способствовала увеличению сорбционных характеристик по названным ИТМ. Так, если эффективность удаления ионов Cu^{2+} , Fe^{2+} и Mn(II) нативной ЛСП составили 19.6, 19.7 и 13.5% соответственно, то для образца, подвергнутого кислотно-щелочной обработке, данный показатель составил 93.5, 90.8 и 91.5%. ЛСП, подвергнутая низкотемпературной обработке, способствовала извлечению названных ионов на 87.2, 82.5 и 88.5% [88–90].

Ионы четырех металлов. Обработанная 0.5% раствором HCl ЛСП исследовалась в качестве СМ для извлечения ионов Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} и Pb^{2+} из модельных растворов. Начальные концентрации названных ИТМ составили 52.0, 50.1, 51.7 и 53.6 мг/дм³, время контактирования – 1–45 мин, масса СМ – 12.5 г/дм³. Выявлено, что наибольшая эффективность удаления ИТМ достигается в интервале $\text{pH} = 6–7$. Значения максимальной сорбционной емкости, вычисленные из уравнения Ленгмюра, составили: ионы Cd^{2+} – 5.33 мг/г, Cu^{2+} – 4.17 мг/г, Ni^{2+} – 2.43 мг/г и Pb^{2+} – 9.91 мг/г. Эффективность извлечения ИТМ при проведении экспериментов в вышеназванных условиях составили 80.0, 90.3, 94.0 и 98.7% соответственно. Определено, что изотермы адсорбции ионов Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} более точно описываются моделью Ленгмюра, ионов Pb^{2+} – моделью Фрейндлиха, а кинетика процесса во всех случаях соответствует модели псевдотортого порядка ($R^2 > 0.999$) [91].

ЛСП, модифицированная 0.1 М раствором HCl , использовалась для сорбции ионов Cu^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} и Zn^{2+} из модельных растворов. Определено, что значения сорбционной емкости по названным ИТМ составили 0.44, 0.82, 0.29 и 1.28 ммоль/г соответственно [92].

Кроме катионов металлов, ЛСП использовалась и для извлечения других неорганических загрязнений. В частности, исследовано удаление ионов аммония из водных растворов в различных экспериментальных условиях. Определено, что при начальной концентрации ионов аммония 50 мг/дм^3 , дозе СМ 3 г/дм^3 , $\text{pH} = 7$ и размере частиц $1\text{--}2 \text{ мм}$, сорбционная емкость составила 9.64 мг/г . Определено, что в первые 15 мин контактирования сорбируется 58% ионов NH_4^+ . Выявлено, что изотерма адсорбции более точно описывается моделью Фрейндлиха ($R^2 = 0.999$), а кинетика процесса соответствует модели псевдвторого порядка. Выявлено, что основным механизмом процесса является внутримолекулярная диффузия [93].

Кроме катионов, ЛСП исследовалась и в качестве СМ для удаления неорганических анионов. В частности, проводились работы по изучению адсорбции нитрат-ионов ЛСП, модифицированной 0.1 М раствором HCl . Начальная концентрация нитрат-ионов составила 50 мг/дм^3 , дозировка СМ – $0.8\text{--}3.0 \text{ г/дм}^3$. Определено, что оптимальное время контакта составило 120 мин, оптимальная доза сорбента – 3.0 г , а оптимальный $\text{pH} = 2.0$. Сорбционная емкость модификата лузги при названных условиях составила 0.49 мг/г [94].

Использование отходов от переработки семян подсолнечника для извлечения органических загрязнений из водных сред

Кроме ИТМ, отходы от переработки семян *Helianthus annuus* исследовались в качестве СМ для удаления различных органических соединений из водных сред.

Красители. Сельскохозяйственные отходы широко исследованы в качестве СМ для извлечения различных красителей из модельных и реальных сточных вод [95–99]. Отходы от переработки семян подсолнечника также использовались для удаления красителей из водных сред [100, 101].

Исследовано влияние различных показателей, таких как pH ($2\text{--}11$), времени взаимодействия ($0\text{--}420$ мин), начальной концентрации ($25\text{--}100 \text{ мг/дм}^3$) на сорбцию красителя марки «Methylene blue» нативной ЛСП. Выявлено, что наибольшая эффективность удаления красителя достигалась при $\text{pH} > 4$, сорбционное равновесие достигалось в течение 60 мин. Максимальная сорбционная емкость по красителю составила 45.25 мг/г . Изотермы адсорбции при различных температурах описывались более точно моделью Ленгмюра, а кинетика адсорбции соответствовала модели псевдвторого порядка. Определенные термодинамические параметры ($\Delta H^\circ = 3.274 \text{ кДж/моль}$ и $\Delta S^\circ = 18.7 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$) свидетельствуют о протекании физической эндотермической адсорбции [102].

Увеличить сорбционную емкость по красителю Methylene blue возможно модификацией ЛСП. Так, в частности, предлагается использовать ЛСП с покрытием поверхности наноразмерными частицами SiO_2 ($5 : 1$) для удаления красителя Methylene blue из водных растворов. Определены оптимальные условия процесса: $\text{pH} = 6$, доза СМ – 4 г/дм^3 , температура – $25 \text{ }^\circ\text{C}$, время процесса – 150 мин, при которых достигается максимальная сорбционная емкость композита – 70.16 мг/г . Определено, что изотерма адсорбции более точно описывается моделью Фрейндлиха, а кинетика процесса соответствует модели псевдвторого порядка. Вычисленные значения энергии Гиббса ($\Delta G^\circ = -13.76 - -10.93 \text{ кДж/моль}$ при $298\text{--}318 \text{ К}$) указывают на протекание спонтанного процесса [103].

В работе [104] показано, что обработка ЛСП различными химическими реагентами или воздействием отрицательных температур, наоборот, снижает сорбционные характеристики по красителю Methylene blue. Так, определено, что нативная измельченная ЛСП имеет значение сорбционной емкости по указанному красителю 93.0 мг/г . После обработки растворами ($1\% \text{ NaOH}$, $2\% \text{ NaOH}$, $2\% \text{ NaHCO}_3$) или низкой температурой значения сорбционной емкости составили 72, 51, 59 и 68 мг/г соответственно.

Для сорбционного извлечения красителя марки «Basic blue 9» использовалась нативная ЛСП. Начальные концентрации красителя составили $19.2\text{--}320 \text{ мг/дм}^3$, дозировка СМ – 4 г/дм^3 , температура среды – $5\text{--}45 \text{ }^\circ\text{C}$. Выявлено, что с увеличением температуры в указанном интервале значения максимальной сорбционной емкости увеличиваются с 41.46 до 60.90 мг/г . Определено, что во всех случаях изотермы адсорбции более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика адсорбции соответствует модели псевдвторого порядка. Термодинамические параметры свидетельствуют о протекании физической спонтанной эндотермической адсорбции [105].

Для удаления красителя марки «Congo red» исследовался композиционный СМ, полученный модификацией ЛСП наночастицами железа и MnO . Выявлено, что модификация ЛСП способствовала получению пористой микроструктуры и увеличению площади поверхности с 1.18 до $47.14 \text{ м}^2/\text{г}$. Значение максимальной сорбционной емкости красителя на композите составила $Q_{\text{max}} = 45.66 \text{ мг/г}$. Изотермы адсорбции хорошо

описываются моделями Фрейндлиха и Хэлси ($R^2 = 0.996$), а кинетика процесса – моделью псевдвторого порядка ($R^2 = 0.999$) [106].

Изучена адсорбция красителя марки «Acid Red 1» (AR1) на ЛСП. Проведенными исследованиями установлено, что оптимальные условия для наибольшего обесцвечивания (84.2% эффективность) раствора, содержащего 40 мг/дм³ красителя, получены при 100 мин времени контакта и pH = 2 при комнатной температуре. Оптимальное значение дозировки СМ составило 2.6 г/дм³. Процесс адсорбции обоих адсорбентов наилучшим образом соответствовал модели Фрейндлиха, а кинетика процесса – модели псевдвторого порядка [107].

Нативная ЛСП использовалась для удаления красителя марки «Orange 16» из модельных растворов. Эксперименты проводились с варьированием параметров процесса. Выявлено, что оптимальное значение pH для извлечения красителя составило pH = 1. Количество сорбированного красителя на единицу массы ЛСП увеличилось с 1.65 до 13.24 мг/дм³ при увеличении начальной концентрации красителя с 24.7 до 197.6 мг/дм³ при температуре 278 К. Значения максимальной сорбционной емкости по красителю, вычисленные из уравнения Ленгмюра, составили $Q_{\max} = 17.0\text{--}22.1$ мг/г при температурах 278–318 К. В зависимости от температуры водной среды изотермы адсорбции более точно описываются моделями Темкина (278 К) или Ленгмюра (298, 318 К). Кинетика процесса соответствует модели псевдвторого порядка ($R^2 = 0.9998$). Термодинамические параметры указывают на то, что сорбция красителя Orange 16 на ЛСП была спонтанным, эндотермическим и энтропийно-обусловленным процессом [108].

Нативная ЛСП также применялась для исследования адсорбции красителя марки «Methyl violet». Определено, что максимальная сорбционная емкость СМ при 30 °С составила 92.59 мг/г. Модель Фрейндлиха и модель псевдвторого порядка более точно описывали изотерму адсорбции и кинетические зависимости [109].

Краситель марки «Reactive black 5» также сорбировался нативной ЛСП из модельных растворов. Выявлено, что при начальной концентрации красителя 50 мг/дм³, pH = 4, дозировке СМ 40 г/дм³, эффективность извлечения через 210 мин сорбционного процесса составила 85%. Изотерма адсорбции хорошо соответствует модели Фрейндлиха ($R^2 = 0.9553$), а кинетика процесса – модели псевдвторого порядка. Определено, что внутримолекулярная диффузия является стадией, контролирующей скорость процесса [110].

ЛСП промывалась и кипятилась в течение 2 ч в скороварке при температуре 130 °С, затем модифицировалась 10% раствором H₂SO₄ в течение 6 ч при температуре 60 °С. После химической обработки СМ высушивался в течение 2 ч при температуре 105 °С и использовался для удаления красителя марки «Direct orange 26». Определено, что при начальной концентрации красителя 800 мг/дм³ сорбционная емкость СМ составила 11 мг/г. Выявлено, что изотермы адсорбции более точно описываются моделью Фрейндлиха, а кинетика процесса соответствует модели псевдвторого порядка ($R^2 = 0.993$) [111].

Модифицированная раствором серной кислоты ЛСП применялась для сорбции красителя марки «Astrozon red GTLN» с варьированием параметров процесса. Модификация позволила увеличить максимальную сорбционную емкость СМ: так, для нативной ЛСП данный показатель при 30 °С составил 47.45 мг/г, модифицированной – 284.45. Определены оптимальные значения pH и дозировки модификата – 7.4 и 10 г/дм³ соответственно. Найдено, что модель Ленгмюра более точно описывает изотерму адсорбции, а кинетические исследования показали соответствие модели псевдвторого порядка [112].

Исследовалось удаление красителей марок «Brilliant green» и «Methyl orange» с использованием ЛСП в качестве СМ. Выявлено, что эффективность удаления красителей повышалась с увеличением времени и дозы адсорбента и уменьшалась с увеличением концентрации красителей и размера частиц СМ. Установлено, что эффективность удаления красителя Brilliant green составила 98% при начальной концентрации красителя 50 ppm, дозе СМ 2 г/дм³, размере частиц 75 мкм и pH = 7 при времени контакта 1 ч. Эффективность извлечения красителя Methyl orange достигала 54% при начальной концентрации красителя 10 ppm, доза СМ 4 г/дм³, pH = 3 при том же размере частиц и времени контактирования. Определено, что изотермы адсорбции хорошо описываются моделью Ленгмюра, а кинетические зависимости – моделью псевдвторого порядка [113].

В работе [114] обработанная щелочью ЛСП использовалась для обесцвечивания реальных окрашенных сточных вод текстильного производства. Определено, что максимальная сорбционная емкость смеси красителей на модифицированном СМ составила 169.5 мг/г при 30 °С и pH = 2.5. При содержании красителей 5500 мг/дм³ эффективная дозировка СМ составляет 20 г/дм³. Определено, что при различных

концентрациях красителей в сточной воде (967–20360 мг/дм³) изотермы более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетические зависимости, как и в большинстве случаев, соответствуют модели псевдвторого порядка.

Меланин, выделенный из ЛСП, также исследовался в качестве СМ для извлечения красителей из водных сред. В работе [115] определены сорбционные емкости меланинов из ЛСП: по красителю «Methylene blue» – 190.9 мг/г, по красителю «Methyl orange» – 302.1 мг/г, а также по желатину – 114.7 мг/г и йоду – 38.4%. Указывается, что меланины обладают большей сорбционной способностью по красителям, чем ЛСП. В частности, по красителю Methyl orange данный показатель для нативной ЛСП составил 61.7 мг/г, что почти в 5 раз меньше, чем для меланина [116].

Нефтепродукты. ЛСП, модифицированная, как указано в [88–90], также использовалась для извлечения эмульсий нефтепродуктов из воды. Для этого к эмульсиям нефтепродуктов (бензин, дизельное топливо, керосин) в водопроводной воде с начальной концентрацией 25 мг/дм³ добавлялись образцы ЛСП, подвергнутые кислотнo-щелочной или низкотемпературной обработке, в дозировке 10 г/дм³. Время контактирования составило 60 мин. Определено, что после указанного промежутка времени, наибольшая эффективность извлечения керосина, бензина и дизельного топлива достигалась образцом ЛСП, модифицированного кислотнo-щелочной обработкой, и составила 73.8, 77.5 и 85.7% соответственно [117, 118].

Модифицированные образцы ЛСП также исследовали в качестве нефтесорбента. Обработка ЛСП проводилась 1, 5 или 10% растворами серной, соляной или фосфорной кислоты, либо гидроксида натрия или кальция. Способность модификаторов ЛСП извлекать нефть исследовалась на модельных растворах с концентрацией нефти в воде 100, 300 и 500 мг/дм³. Определено, что использование нативно образца ЛСП позволило извлечь от 68.7 до 93.1% нефти. Использование ЛСП, обработанной 1% раствором H₂SO₄, позволила удалить от 82.7–96.7%, раствором HCl – 85.3–96.5%, раствором H₃PO₄ – 81.8–96.1%, раствором NaOH или Ca(OH)₂ – 78.6–96.1% нефти [119].

Также исследовалось удаление фенола нативными и модифицированными образцами ЛСП. В работе [120] определено, что максимальная сорбционная емкость нативной ЛСП по фенолу составляет 20 мг/г. Увеличить максимальную сорбционную емкость до значения 61 мг/г удалось модификацией ЛСП 0.5 Н раствором оксалата аммония. Обработка производилась выдерживанием ЛСП в растворе модификатора при комнатной температуре в течение 24 ч с последующей отмывкой водой и сушкой материала в сушилке при температуре 110 °С [120]. В работе [121] указывается, что эффективность удаления фенола из воды образцом ЛСП, прошедшим кислотнo-щелочную обработку составляет 39%.

Показано увеличение эффективности извлечения бисфенола А (БФА) ЛСП, модифицированной раствором H₂SO₄. Определено, что обработка раствором серной кислоты порошка ЛСП способствует повышению общей площади поверхности с 6.106 до 27.145 м²/г и появлению на поверхности СМ кислородсодержащих функциональных группировок. Также выявлено, что модификация привела к увеличению адсорбции БФА с 20.56% до 87.81%. Результаты исследований показали, что кинетика адсорбции БФА подчиняется фрактально-подобной кинетической модели Хилла для всех экспериментальных условий. Равновесные данные хорошо подходят для изотермической модели Хилла-Сипса с коэффициентом детерминации R² > 0.999. Термодинамические параметры указывают на протекание физической адсорбции, а основными механизмами процесса является внутричастичная диффузия и пленочное сопротивление массопереносу БФА [122].

Другие органические соединения. Нативная и модифицированная обработкой в 0.1 М растворах метанола и HNO₃ ЛСП исследовалась в качестве СМ для удаления фармакологического препарата «Хлорохин» из модельных растворов. Определено, что значения максимальной сорбционной емкости для нативной и модифицированной ЛСП составили 168.09 (рН = 6) и 185.91 мг/г (рН = 7) соответственно, при температуре 45 °С. Выявлено, что изотермы адсорбции хлорохина более точно описываются моделью Фрейндлиха, а кинетика процесса в обоих случаях соответствует модели псевдвторого порядка [123, 124].

Нативная ЛСП использовалась для удаления лекарственного средства метилтиониний хлорида, также используемого в качестве красителя под названием Метиленовый синий, в статических условиях с использованием методологии Бокса-Бенкена. Определено, что сорбционная емкость ЛСП по сорбату возросла с 8.96 до 52.50 мг/г, когда начальная концентрация препарата увеличилась с 20 до 150 мг/дм³. Результаты экспериментов показывают значительное увеличение эффективности адсорбции с 19.83 до 88.33%, когда значения рН увеличились с 2 до 4 соответственно, с последующим небольшим увеличением для рН = 12 (95.97%). Результаты, полученные из кинетических и изотермических исследований, показывают, что

адсорбция метилтиониний хлорида на ЛСП соответствует модели кинетики псевдо-второго порядка ($R^2 > 0.99$) и модели Темкина ($R^2 = 0.97$), соответственно. Термодинамическое исследование показало, что процесс адсорбции был эндотермическим, спонтанным и имел физическую природу. Получено уравнение регрессии, которое связывало эффективность адсорбции с выбранными рабочими параметрами – начальной концентрацией загрязнителя, дозировкой ЛСП и рН [125].

Композиционный СМ на основе ЛСП, покрытый небольшим количеством полианилина, использовался для удаления салицилата натрия из водных растворов. Определено, что сорбционное равновесие достигалось в течение 60 мин при рН = 5. Максимальная сорбционная емкость композита по салицилату натрия составила 28.75 мг/г. Экспериментальные результаты показывают, что кинетическая модель псевдо-второго порядка и модель Ленгмюра обеспечили хорошее соответствие всем экспериментальным данным. Рассчитанные термодинамические параметры (ΔG° от -20.58 до -21.37 при 293–313 К, $\Delta H^\circ = -12.77$ кДж/моль $\Delta S^\circ = 26.77$ Дж/моль·К) свидетельствуют о том, что процесс адсорбции является спонтанным и экзотермическим по своей природе. Кроме того, приготовленный композит показал хорошую способность к регенерации и отличную пригодность к повторному использованию после четырех циклов [126].

Также ЛСП и другие сельскохозяйственные отходы (скорлупа семян тыквы, скорлупа грецкого ореха и скорлупа арахиса) исследовалась в качестве СМ для удаления гербицида 2,4,6-трихлорфенола (фенаклор) из модельных растворов. Результаты показали, что увеличение дозировки адсорбентов с 5 до 25 г/дм³ значительно увеличило эффективность адсорбции сорбата из растворов, содержащих фенаклор в количестве 0.1–0.5 ммоль/дм³. Выявлено, что адсорбция сильно зависела от рН, адсорбционная емкость резко снижалась при рН > 7. Определено, что эффективность удаления фенаклора повышалась с увеличением ионной силы раствора. Процесс адсорбции был быстрым, и он достиг равновесия примерно через 45 мин. Найдено, что экспериментальные данные очень хорошо соответствуют модели Фрейндлиха, а кинетика адсорбции следует механизму псевдодовторого порядка. Эффективность адсорбции гербицида следовала убывающей последовательности: скорлупа семян тыквы > скорлупа арахиса > ЛСП > скорлупа грецкого ореха. Эффективность десорбции биосорбентов составляла приблизительно 80%, что свидетельствует о том, что слабые силы связывания, такие как притяжение Ван-дер-Ваальса или диполь-дипольные взаимодействия, являются доминирующими для адсорбции молекул 2,4,6-трихлорфенола исследованными сельскохозяйственными отходами [127].

Использование компонентов биомассы подсолнечника в качестве сорбционного материала

В процессе переработки биомассы подсолнечника остается большое количество целлюлозосодержащих отходов в виде стеблей, листьев, головок растения. Последние нашли применение в качестве кормовой добавки вкупе с другими растениями, для силосования [128, 129], получения биотоплив [130–132], активированных углей [133, 134] и др.

Определен состав стеблей *Helianthus annuus*, который показал высокое содержание в них целлюлозы (32.6–48%), несколько меньше – в стеблях растения гемицеллюлозы (4.4–32%) и лигнина (2.5–23.3%) [135]. Содержание биополимеров в стеблях подсолнечника зависит от многих параметров, таких как сорт растения, состава почвы, места произрастания, содержания удобрений и влаги в почве, количество солнечных дней и т.д. Как сама масса нативных и модифицированных стеблей подсолнечника, так и его некоторые составляющие, например сердцевина, также исследовались в качестве СМ для удаления различных загрязняющих веществ из водных сред.

Ионы металлов. Исследована адсорбция ионов Co^{2+} биомассой измельченных стеблей подсолнечника в динамических условиях. Определено, что общая площадь измельченных стеблей растения составила 1.62 м²/г. Исследовалось влияние концентрации ионов Co^{2+} на входе (20–60 ppm), скорости потока подачи (8–19 см³/мин) и высоты сорбционного слоя (5–15 см), исходного рН раствора (3–5) и размера частиц на кривые прорыва. Самая высокая сорбционная емкость слоя (11.68 мг/г) была получена при начальной концентрации ионов Co^{2+} 40 ppm, высоте слоя 5 см и скорости потока 8 см³/мин, рН = 6.5 и размере частиц 0.25–0.5 мм [136].

Два образца СМ, полученных из стеблей подсолнечника кипячением или обработкой формальдегидом использовались для удаления ионов Cr(VI) из модельных растворов. Определено, что наибольшая эффективность сорбции ионов Cr(VI) достигается при рН = 2. Определено, что СМ, полученный кипячением стеблей растения, имеет значение максимальной сорбционной емкости по ионам Cr(VI) 5.37 мг/г, образец,

обработанный формальдегидом – 4.81 мг/г. Изотермы адсорбции на прокипяченных стеблях хорошо описываются моделью Дубинина-Радушкевича, модифицированных формальдегидом – моделью Фрейндлиха. Энергия адсорбции для двух случаев составила 1.37 и 1.70 кДж/моль соответственно, что указывает на протекание физической адсорбции [137].

Модифицированная полианилином сердцевина стеблей подсолнечника также исследовалась для удаления ионов Cr(VI) из водных растворов. Определено, что изотермы адсорбции подчинялись модели Ленгмюра, а рассчитанные значения сорбционной емкости варьировались от 27.73 до 42.96 мг/г при повышении температуры от 298 до 338 К. Термодинамический анализ показал, что удаление ионов Cr(VI) с помощью композитного СМ является эндотермическим процессом ($\Delta H^\circ = 37.38$ кДж/моль) [138].

Немодифицированные и модифицированные стебли подсолнечника были исследованы на предмет адсорбции ионов Cu^{2+} . В экспериментах в статических условиях изучалось влияние доз нативного СМ (2–6 г/дм³) с постоянной начальной концентрацией Cu^{2+} 100 мг/дм³ и размером частиц менее 1.18 мм. Определено, что с увеличением количества СМ эффективность извлечения ионов меди увеличивалась – с 69% (2 г/дм³) до 80% (6 г/дм³) в течение 60 мин контактирования. В динамических условиях изучалось влияние размера частиц, расхода входящего потока (2–6 дм³/ч), глубины слоя (25–35 см) и начальной концентрации металла (100 и 150 мг/дм³) мг/л. Определено, что эффективность удаления ионов Cu^{2+} достигает 100% при размере частиц 2.36–4.75 мм, высоте слоя 35 см и расходе входящего потока 4 дм³/ч. Показано, что обработка СМ раствором HNO_3 способствует увеличению сорбционных характеристик [139].

Исследован сорбционный потенциал стеблей подсолнечника для удаления ионов U(VI) из водного раствора. Определено, что при дозировке СМ 2,0 г/дм³, исходной концентрации ионов U(VI) 20 мг/дм³, pH = 5.0 и времени контакта 10 ч сорбционная емкость составила 6.96 мг/г при 298 К. Вычисленная из уравнения Ленгмюра максимальная сорбционная емкость составила 327.04 мг/г. Изотермы адсорбции более точно описывались уравнением Ленгмюра-Фрейндлиха, а кинетика процесса соответствовала модели псевдвторого порядка. Выявлено, что сорбционный процесс имеет эндотермическую и спонтанную природу взаимодействия. Основными процессами являлись ионный обмен, а также комплексообразование [140].

Сравнивая значения максимальной сорбционной емкости измельченных стеблей подсолнечника по ионам U(VI) и Pb^{2+} , можно отметить гораздо большее значение показателя по ионам урана по сравнению с ионами свинца ($Q_{\max} = 67.59$) в идентичных условиях проведения процесса [141]. Еще меньшее значение максимальной сорбционной емкости наблюдается по ионам Cu^{2+} ($Q_{\max} = 15.70$) [142]. Как показали проведенные эксперименты, при адсорбции названных ионов из бинарных смесей совместно с ионами U(VI) преобладающими сорбируемыми ионами являются ионы урана.

Измельченная биомасса подсолнечника, за исключением семян, исследовалась в качестве СМ для извлечения ионов Cd^{2+} и Pb^{2+} в статических условиях. Результаты экспериментов показали, что максимальное удаление ИТМ наблюдалось при pH = 5. В течение 150 мин контактирования были сорбированы 87 и 97% ионов Cd^{2+} и Pb^{2+} соответственно. Выявлено, что изотермы описывались моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствовала модели псевдвторого порядка. Значения максимальной сорбционной емкости для ионов Cd^{2+} и Pb^{2+} и при оптимальных условиях составили 70 и 182 мг/г соответственно [143].

Также проводились исследования по сорбционному удалению ионов Cd^{2+} , Cr(III), Cu^{2+} и Zn^{2+} биомассой стеблей подсолнечника. Определены значения сорбционной емкости по названным ионам, которые расположились в следующий ряд, мг/г: Cd^{2+} (42.18) > Zn^{2+} (30.73) > Cu^{2+} (29.30) > Cr(III) (25.07). Определено, что температура влияет на сорбционные характеристики: ионы Cd^{2+} , Cu^{2+} и Zn^{2+} хуже сорбировались на стеблях подсолнечника при более высокой температуре. В то же время выявлено, что скорости адсорбции ИТМ довольно высокие. В течение 60 мин контактирования 60–80% этих ионов были сорбированы на поверхности СМ [144].

Измельченные стебли и листья подсолнечника, а также скорлупа грецкого ореха, картофельные очистки и стручки рапса исследовались для сорбционного извлечения ионов Cd^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} , Mn(II), Ni^{2+} и Zn^{2+} из модельных растворов. Определены значения Q_{\max} по названным ИТМ биомассой компонентов подсолнечника, вычисленные из уравнений Ленгмюра, которые расположились в следующий ряд, мг/г: Cd (83.3) > Fe (71.4) > Mn (47.6) > Zn (45.40) > Cu (30.3) > Ni (27.0). Выявлено, что по всем исследованным ИТМ, кроме ионов Ni^{2+} , биомасса подсолнечника уступает по значениям сорбционной емкости картофельным очисткам и кроме ионов Cu^{2+} превосходя по данному показателю скорлупу грецких орехов и стручки рапса. Установлено, что суммарное значение Q_{\max} по всем исследуемым ИТМ составляет 50.8 мг/г. Определено,

что все изотермы адсорбции более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетические зависимости соответствуют модели псевдвторого порядка [145].

Кроме стеблей и листьев одним из компонентов биомассы подсолнечника к отходам возможно отнести и головки растения после выделения семян. Головки *Helianthus annuus* также возможно использовать в качестве СМ для удаления ИТМ из водных растворов. В частности, показано, что измельченные головки подсолнечника, модифицированные формальдегидом, сорбируют ионы Cr(VI) [146] и Ni²⁺ [147]. Определено, что при pH = 2.0, дозе СМ 4.0 г/дм³, концентрации ионов Cr(VI) 100 мг/дм³ при 25 °С при 180 об./мин через 2 ч контакта сорбционная емкость реагента составила 7.85 мг/г [146]. По ионам Ni²⁺ эффективность удаления составила 65–75.9% при дозе адсорбента 20.0 г/дм³, исходной концентрации ионов никеля 100 мг/дм³ и температуре 25 °С [147].

Красители. Стебли подсолнечника также исследовались в качестве СМ для удаления различных красителей из водных сред [101]. В частности, проведено несколько исследований по сорбционному удалению красителя марки Methylene blue из модельных растворов. Так, исследовалась возможность извлечения названного красителя из модельных растворов с начальной концентрацией 25 или 100 мг/дм³ нативными или обработанными в поле СВЧ волн мощностью 300–600 Вт. Выявлено, при начальной концентрации красителя 25 мг/дм³ СВЧ обработка не влияет на эффективность сорбции красителя, в то же время при начальной концентрации красителя 100 мг/дм³ СВЧ обработка мощностью 450–600 Вт в течение 6 мин позволила увеличить эффективность очистки на 46% – с 39 до 85% [148].

Также исследовано влияние модификации стеблей подсолнечника 10% раствором NaOH на адсорбцию красителя Methylene blue. Выявлено, что обработка СМ щелочным раствором способствует увеличению максимальной сорбционной емкости с 0.35 до 0.52 ммоль/г. Вычисленные термодинамические параметры процесса ($\Delta G^\circ = -6.37$ кДж/моль и $E_a = 5.82$ кДж/моль) свидетельствуют о протекании самопроизвольной физической адсорбции. Также вычисленное значение коэффициента Био $B_i = 1.812$ свидетельствуют о том, что лимитирующей стадией процесса является смешанная диффузия [149].

Для адсорбции и дальнейшего фотокаталитического разложения под действием облучения видимым светом красителя Methylene blue, на поверхности измельченных стеблей подсолнечника наносились частицы Cu₂O. Выявлено, что композитный материал способствовал удалению 72.7% красителя при начальной концентрации последнего в растворе 50 мг/дм³, в то время как нативные измельченные стебли *Helianthus annuus* позволяют извлечь краситель на 15.6% меньше. Фотокаталитическая деградация красителя хорошо описывалась уравнением кинетики псевдопервого порядка в рамках модели Ленгмюра-Хиншельвуда [150].

Кроме самой биомассы стебля в работе [151] в качестве СМ исследовалась волокнистая сердцевина стебля подсолнечника. Материал характеризовался следующим содержанием: 34.17% целлюлозы, 5.39% гемицеллюлозы, 17.24% пектина и 3.65% лигнина. Определено, что максимальная сорбционная емкость сердцевины стебля подсолнечника по красителю Methylene blue составила 346.32 мг/г. Также определено, что 97% красителя сорбируется после 30-минутного времени контакта при температурах от 35 до 70 °С и в широком диапазоне pH = 3.5–12, указывая на то, что сердцевина стеблей растения обладает кислотостойкостью и малочувствительна к температурам [151].

В работе [152] получен СМ путем смешения гидрогеля из целлюлозы, выделенной из сердцевины стебля подсолнечника, и монтмориллонита. Определено, что максимальная сорбционная емкость реагента по красителю Methylene blue составила 263.3 мг/г, а эффективность извлечения красителя при его начальной концентрации в растворе 1 г/дм³ превышает 87.5%. Определено, что изотермы адсорбции красителя на композитном СМ соответствуют модели Ленгмюра, а кинетика процесса подчиняется модели псевдвторого порядка. Вычисленные термодинамические параметры ($\Delta G^\circ = -7.01 - -8.19$ при 293–313 К, $\Delta H^\circ = 3.09$ кДж/моль $\Delta S^\circ = 33.94$ Дж/моль·К) свидетельствуют о протекании спонтанной экзотермической физической адсорбции [152].

Определенный цикл работ проведен и по изучению адсорбции красителя марки «Congo red» нативными и модифицированными стеблями подсолнечника. В работе [153] показано, что измельченные нативные стебли растения имеют значение Q_{max} по названному красителю 0.37 ммоль/г. Выявлено, что полученная изотерма адсорбции красителя Congo red относится к изотермам пятого типа по классификации БДДТ или S-типу по классификации Гильса. Адсорбция более точно описывается моделью Фрейндлиха, а процесс протекает на гетерогенной поверхности СМ [153].

Для увеличения эффективности удаления красителя стебли подсолнечника обрабатывались раствором NaOH. Выявлено, что химическая модификация позволяет повысить эффективность сорбции Congo red на 29% по сравнению с нативной биомассой стеблей растения [154]. Сравнимая степень удаления двух вышеупомянутых красителей – Methylene blue и Congo red, в работе [155] констатировали, что сорбция красителя Methylene blue на нативной и модифицированной 10% раствором NaOH биомассе стеблей подсолнечника протекает более эффективно.

Также нативные стебли *Helianthus annuus* использовались для извлечения красителей марок «Acid red 114» и «Basic blue 3» из модельных растворов. Время контактирования СМ с сорбатами составляло 1 ч при постоянном перемешивании с частотой 200 об./мин и pH = 7. Определено, что сорбционная емкость по красителю Acid red 114 составила 9.94 мг/г, по красителю Basic blue 3 – 4.92 мг/г. Указывается, что изотермы адсорбции хорошо описываются моделью Ленгмюра [156].

Кроме красителей измельченные стебли подсолнечника использовались для извлечения эмульсии подсолнечного масла, имитирующей сточные воды масложирового производства. Концентрация масла составила 200 мг/дм³, дозировка СМ варьировалась от 0.05 до 0.6 мг на 30 см³ эмульсии. Определено, что наилучшая эффективность извлечения (77%) достигается при дозировке стеблей подсолнечника 0.3 г/30 см³ [157].

Также определена максимальная сорбционная емкость измельченных стеблей подсолнечника по отношению к бензину марки АИ-92. Экспериментально определено, что данный показатель по бензину составил 3.78 г/г после 25 мин контактирования [158]. Определены также значения максимальной сорбционной емкости сердцевины стеблей подсолнечника по сырой нефти и некоторым нефтепродуктам в зависимости от фракционного состава СМ. Определено, что значения максимальной сорбционной емкости для сердцевины стебля растения фракции 1–4 мм составили: по сырой нефти – 13.0 г/г, по дизельному топливу – 14.72 г/г, по керосину – 10.79 г/г и по моторному маслу SAE 15W/40. Для фракции размером 4–8 мм данные показатели составили 9.56, 6.49, 6.79 и 8.11 г/г соответственно [158].

Заключение

Обобщены литературные данные по использованию отходов от переработки семян подсолнечника (жмых, шрот и лузга) и компонентов биомассы (стебли, листья, головки) в качестве сорбционных материалов для извлечения различных загрязняющих веществ (ионы металлов, красители, нефтепродукты, лекарственные препараты, пестициды и др.) из водных сред. Приведены данные по составу отходов переработки семян подсолнечника и компонентов биомассы, а также кратко приведена информация о путях их использования в различных отраслях народного хозяйства. Выявлено, что наибольшее количество публикаций посвящено исследованиям использования лузги семян подсолнечника в качестве сорбционного материала для удаления загрязняющих веществ из модельных и реальных сточных вод. Приведены данные по значениям максимальной сорбционной емкости и эффективности удаления загрязнителей лузгой семян подсолнечника, а также стеблями растения. Определено, что изотермы адсорбции в большинстве случаев хорошо описываются моделями Ленгмюра и Фрейндлиха, а кинетика процессов в подавляющем случае соответствует модели псевдвторого порядка.

Финансирование

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение №10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Bach J.P., Ziegler U., Deuschl G., Dodel R., Doblhammer-Reiter R. Projected numbers of people with movement disorders in the years 2030 and 2050 // *Movement Disorders*. 2011. Vol. 26, no. 12. Pp. 2286–2290. <https://doi.org/10.1002/mds.23878>.
2. Agapkin A.M., Makhotina I.A., Ibragimova N.A., Goryunova O.B., Izembayeva A.K., Kalachev S.L. The problem of agricultural waste and ways to solve it // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 981. Article 022009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/2/022009>.
3. Worku L.A., Bachheti A., Bachheti R.K., Reis C.R., Chandel A.K. Agricultural residues as raw materials for pulp and paper production: overview and applications on membrane fabrication // *Membranes*. 2023. Vol. 13, no. 2. Article 228. <https://doi.org/10.3390/membranes13020228>.
4. Meraj A., Singh S.P., Jawaid M., Nasef M.M., Alomar T.S., Al Masoud N.L. A review on eco-friendly isolation of lignin by natural deep eutectic solvents from agricultural wastes // *Journal of Polymers and the Environment*. 2023. Vol. 31, no. 8. Pp. 3283–3316. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02817-x>.
5. Sagar N.A., Pareek S., Sharma S., Yahia E.M., Lobo M.G. Fruit and vegetable waste: Bioactive compounds, their extraction, and possible utilization // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2018. Vol. 17, no. 3. Pp. 512–531. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>.
6. Aziz S., Narayana K.K., Oberoi H.S. Recovery and utilisation of bioactive compounds from agricultural waste // *Utilisation of Bioactive Compounds from Agricultural and Food Processing Waste*. 2017. Pp. 127–158.
7. Kumar K., Yadav A.N., Kumar V., Vyas P., Dhaliwal H.S. Food waste: a potential bioresource for extraction of nutraceuticals and bioactive compounds // *Bioresources and Bioprocessing*. 2017. Vol. 4. Pp. 1–14. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0148-6>.
8. Blasi A., Verardi A., Lopresto C.G., Siciliano S., Sangiorgio P. Lignocellulosic agricultural waste valorization to obtain valuable products: an overview // *Recycling*. 2023. Vol. 8. Article 61. <https://doi.org/10.3390/recycling8040061>.
9. Jiménez-López C., Fraga-Corral M., Carpena M., García-Oliveira P., Echave J., Pereira A.G., Lourenço-Lopes C., Prieto M.A., Simal-Gandara J. Valorization of agricultural residues as a source of antioxidant phenolic compounds in a circular and sustainable bioeconomy // *Food and Function*. 2020. Vol. 11, no. 6. Pp. 4853–4877. <https://doi.org/10.1039/D0FO00937G>.
10. Megha, Singh N. New technologies for efficient value extraction from agricultural waste // *Agricultural Waste Recycling for Sustainable Development: From Waste to Wealth*. 2024. Pp. 109–129. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61133-9_5.
11. Peng S., Jiang Y., Chen Z., Osman A.I., Farghali M., Rooney D.W., Yap P.S. Recycling of municipal, agricultural, and industrial wastes into energy, fertilizer, food, and building materials and economic feasibility: A review // *Environmental Chemistry Letters*. 2023. Vol. 21, no. 2. Pp. 765–801. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01551-5>.
12. Ahmed T., Noman M., Qi Y., Shahid M., Hussain S., Masood H.A., Xu L., Ali H.M., Negm S., El-Kott A.F., Yao Y., Qi X. Fertilization of microbial composts: A technology for improving stress resilience in plants // *Plants*. 2023. Vol. 12. Article 3550. <https://doi.org/10.3390/plants12203550>.
13. Khalife E., Sabouri M., Kaveh M., Szymanek M. Recent advances in the application of agricultural waste in construction // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 6. Article 2355. <https://doi.org/10.3390/app14062355>.
14. Ganasen N., Bahrami A., Loganathan K. A Scientometric analysis review on agricultural wastes used as building materials // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Article 426. <https://doi.org/10.3390/buildings13020426>.
15. Mohite A.S., Jagtap A.R., Awhad M.S., More A. Recycling of key agricultural crop residues and its application in polymer industry: A review in the context of waste-energy nexus // *Energy Nexus*. 2022. Vol. 7. Article 100134. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100134>.
16. Alsulaili A., Elsayed K., Refaie A. Utilization of agriculture waste materials as sustainable adsorbents for heavy metal removal: a comprehensive review // *Journal of Engineering Research*. 2023. Vol. 12. Pp. 691–703. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.09.018>.
17. Farhadi A., Ameri A., Tamjidi S. Application of agricultural wastes as a low-cost adsorbent for removal of heavy metals and dyes from wastewater: a review study // *Physical Chemistry Research*. 2021. Vol. 9, no. 2. Pp. 211–226. <https://doi.org/10.22036/pcr.2021.256683.1852>.
18. Karić N., Maia A.S., Teodorović A., Atanasova N., Langergraber G., Crini G., Ribeiro A.R.L., Đolić M. Bio-waste valorisation: Agricultural wastes as biosorbents for removal of (in) organic pollutants in wastewater treatment // *Chemical Engineering Journal Advances*. 2022. Vol. 9. Article 100239. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100239>.
19. Ashfaq M.M., Tüzemen G.B., Nur A. Utilization of agricultural biomass through thermochemical processes for sustainable hydrogen and bioenergy: A critical review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 84. Pp. 1068–1084. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.295>.
20. Alengebavi A., Ran Y., Osman A.I. Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: A review // *Environmental Chemistry Letters*. 2024. Vol. 22. Pp. 2641–2668. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01789-1>.
21. Farooq U., Kozinski J.A., Khan M.A., Athar M. Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents – a review of the recent literature // *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101, no. 14. Pp. 5043–5053. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.030>.

22. Sahoo J.K., Hota A., Singh C., Barik S., Sahu N., Sahoo S.K., Sahoo H. Rice husk and rice straw based materials for toxic metals and dyes removal: A comprehensive and critical review // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2023. Vol. 103, no. 20. Pp. 9131–9153. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.2003349>.
23. Ahmed M.J., Anastopoulos I., Kalderis D., Haris M., Usman M. Insight into the wheat residues-derived adsorbents for the remediation of organic and inorganic aquatic contaminants: A review // *Environmental Research*. 2024. Vol. 250. Article 118507. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118507>.
24. Chuah T.G., Jumariah A., Azni I., Katayon S., Choong S.T. Rice husk as a potentially low-cost biosorbent for heavy metal and dye removal: an overview // *Desalination*. 2005. Vol. 175, no. 3. Pp. 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.10.014>.
25. Syuhadah N., Rohasliney H. Rice husk as biosorbent: a review // *Health and the Environment Journal*. 2012. Vol. 3, no. 1. Pp. 89–95.
26. Yefremova S., Kablanbekov A., Satbaev B., Zharmenov A. Rice husk-based adsorbents for removal of metals from aqueous solutions // *Materials*. 2023. Vol. 16. Article 7353. <https://doi.org/10.3390/ma16237353>.
27. Шайхиев И.Г., Гальблауб О.А., Гречина А.С. Использование отходов от переработки ячменя в качестве сорбционных материалов для удаления поллютантов из водных сред (обзор литературы) // *Вестник Технологического университета*. 2017. Т. 20, №23. С. 110–117.
28. Shaikhiev I.G., Svergzuzova S.V., Galimova R.Z., Grechina A.S. Using wastes of buckwheat processing as sorption materials for the removal of pollutants from aqueous media: a review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945. Article 012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/945/1/012044>.
29. Свергузова С.В., Шайхиев И.Г., Гречина А.С., Шайхиева К.И. Использование отходов от переработки биомассы овса в качестве сорбционных материалов для удаления поллютантов из водных сред (обзор литературы) // *Экономика строительства и природопользования*. 2018. №2 (67). С. 51–60.
30. Shaikhiev I.G., Svergzuzova S.V., Shaikhieva K.I., Deberdeev T.R. Using rye (*Secale cereale*) processing wastes as sorption materials for removing pollutants from aquatic environments // *Polymer Science, Series D*. 2023. Vol. 16, no. 3. Pp. 651–656.
31. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzuzova S.V. Components of millet biomass as sorption materials to remove various pollutants from aqueous media (a brief literature review) // *Materials International*. 2024. Vol. 6, no 4. Article 37. <https://doi.org/10.33263/Materials64.037>.
32. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzuzova S.V. Using sorghum waste and biomass components to remove pollutants from aquatic environments (a literature review) // *Materials International*. 2024. Vol. 6, no. 4. Article 33. <https://doi.org/10.33263/Materials64.033>.
33. Iwuozor K.O., Oyekunle I.P., Oladunjoye I.O., Ibitogbe E.M., Olorunfemi T.S. A review on the mitigation of heavy metals from aqueous solution using sugarcane bagasse // *Sugar Technology*. 2022. Vol. 24, no. 4. Pp. 1167–1185. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01051-w>.
34. Lemessa G., Gabbiye N., Alemayehu E. Waste to resource: Utilization of waste bagasse as an alternative adsorbent to remove heavy metals from wastewaters in sub-Saharan Africa: A review // *Water Practice & Technology*. 2023. Vol. 18, no. 2. Pp. 393–407. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.011>.
35. Шайхиева К.И., Степанова С.В., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В. Использование нативного и модифицированных образцов жомы сахарной свеклы (*Beta vulgaris*) в качестве сорбционных материалов для удаления загрязняющих веществ из водных сред // *Химия растительного сырья*. 2024. №3. С. 49–70. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240313555>.
36. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzuzova S.V. Onion (allium cepa) processing waste as a sorption material for removing pollutants from aqueous media // *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2022. Vol. 12, no. 3. Pp. 3173–3185. <https://doi.org/10.33263/BRIAC123.31733185>.
37. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzuzova S.V. Use of garlic processing by-products to remove pollutants from aqueous media // *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2022. Vol. 12, no. 4. Pp. 4518–4528.
38. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzuzova S.V. Using cucurbits by-products as reagents for disposal of pollutants from water environments (a literature review) // *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2021. Vol. 11, no. 5. Pp. 12689–12705. <https://doi.org/10.33263/BRIAC115.1268912705>.
39. Onyango C., Nyairo W., Tchieta G.P., Shikuku V.O. Watermelon rind based adsorbents for the removal of water pollutants: a critical review // *Frontiers in Environmental Chemistry*. 2025. Vol. 6. Article 1568695. <https://doi.org/10.3389/fenvc.2025.1568695>.
40. Akpomie K.G., Conradie J. Banana peel as a biosorbent for the decontamination of water pollutants. A review // *Environmental Chemistry Letters*. 2020. Vol. 18, no. 4. Pp. 1085–1112. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00995-x>.
41. Gómez-Aguilar D.L., Rodríguez-Miranda J.P., Salcedo-Parra O.J. Fruit peels as a sustainable waste for the biosorption of heavy metals in wastewater: A review // *Molecules*. 2022. Vol. 27, no. 7. Article 2124. <https://doi.org/10.3390/molecules27072124>.
42. Шайхиев И.Г., Свергузова С.В., Шайхиева К.И., Сиссе Х., Воронина Ю.С. Использование кожуры мандаринов в качестве сорбционных материалов для удаления загрязняющих веществ из водных сред // *Химия растительного сырья*. 2023. №1. С. 61–75. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230111931>.
43. Шайхиев И.Г., Свергузова С.В., Шайхиева К.И., Сапронова Ж.А. Использование скорлупы грецкого ореха (*Juglans regia*) в качестве сорбционных материалов для удаления поллютантов из природных и сточных вод // *Химия растительного сырья*. 2020. №2. С. 5–18. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020025622>.

44. Shaikhiev I., Shaykhieva K., Sverguzova S., Fomina E., Vinogradenko Y., Fediuk R., Gunasekaran M., Amran M., Svintsov A.P., de Azevedo A.R.G. Removing pollutants from sewage waters with ground apricot kernel shell material // *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 10. <https://doi.org/10.3390/ma15103428>.
45. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И., Свергузова С.В., Винограденко Ю.А. Удаление загрязнителей из сточных вод измельченной скорлупой косточек абрикосов // *Химия растительного сырья*. 2021. №3. С. 39–54. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021038405>.
46. Подсолнечник однолетний [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Подсолнечник_однолетний.
47. Бондаренко Ю.П. Тенденции и перспективы расширения производства семян подсолнечника в региональном пространстве России // *Региональные агросистемы: экономика и социология*. 2024. №2. С. 4–14.
48. Petraru A., Ursachi F., Amariei S. Nutritional characteristics assessment of sunflower seeds, oil and cake. Perspective of using sunflower oilcakes as a functional ingredient // *Plants*. 2021. Vol. 10, no. 11. Article 2487. <https://doi.org/10.3390/plants10112487>.
49. Харьков В.В., Тунцев Д.В., Кузнецов М.Г. Термохимическая переработка лузги подсолнечника // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2018. Т. 13, №4. С. 130–134.
50. Щербачков В.Г., Ксандопуло С.Ю., Александрова А.В. Сорбционные свойства плодовой оболочки современного подсолнечника к растительному маслу и другим неполярным органическим жидкостям // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2003. №5-6. С. 27–28.
51. Bykov A.V., Kvan O.V., Miroshnikov S.A., Duskaev G.K. Experimental studies on the evaluation of ultrasonic effects on the structure, composition and nutrition of sunflower husks // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 677, no. 5. Article 052054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052054>.
52. Reffae A.S., El-Nashar D.E., Yaseen A.A., Abd-El-Messieh S.L. Sunflower seed husk as green agro-waste filler for EPDM rubber // *Egyptian Journal of Chemistry*. 2021. Vol. 64, no. 10. Pp. 5853–5861. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2021.71142.3562>.
53. Кудинов П.И. Покровные ткани семян подсолнечника и их влияние на технологию // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 1993. №1-2. С. 5–10.
54. Cancalon P. Chemical composition of sunflower seed hulls // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1971. Vol. 48, no. 10. Pp. 629–632.
55. Khamrakulova M.K., Turgunov E.O. Sunflower husk recycling and environmental efficiency: innovative approaches // *Web of Discoveries: Journal of Analysis and Inventions*. 2024. Vol. 2, no. 12. Pp. 1–5.
56. Quaranta N., Unsen M., López H., Giansiracusa C., Roether J.A., Boccaccini A.R. Sunflower husk ash as a raw material for ceramic products // *Ceramics International*. 2011. Vol. 37, no. 1. Pp. 377–385. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.09.015>.
57. Irez A.B. Development of sustainable sunflower husk-reinforced polypropylene composites: An experimental study of mechanical and thermal performance // *Journal of Polymer Science*. 2024. Vol. 62, no. 15. Pp. 3471–3484. <https://doi.org/10.1002/pol.20240162>.
58. Kluska J., Matej-Lukowicz K., Nawrot N. Characterization of sunflower waste carbonization: energy balance and water holding properties // *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Article 11234. <https://doi.org/10.3390/su162411234>.
59. Anastopoulos I., Ighalo J.O., Igwegbe C.A., Giannakoudakis D.A., Triantafyllidis K.S., Pashalidis I., Kalderis D. Sunflower-biomass derived adsorbents for toxic/heavy metals removal from (waste) water // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 342. Article 117540. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117540>.
60. Peña-Guzmán C., Otálvaro-Álvarez Á., Jiménez-Ariza T. Use of oilseed crops biomass for heavy metal treatment in water // *Oil Crop Science*. 2024. Vol. 9. Pp. 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2024.07.001>.
61. Lahmar A., Nouacer S., Djellabi R., Hattab Z., Berredjem Y., Guerfi K. Modeling and assessment of adsorption ability of mussel powdered sunflower seed shell for Cr (VI) removal in batch and bed column systems // *Desalination and Water Treatment*. 2021. Vol. 226. Pp. 276–291. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27257>.
62. Жашуева К.А., Сиволобова Н.О. Применение лузги подсолнечника в качестве адсорбента для очистки сточных вод от тяжелых металлов // *Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Инновационные технологии и технические средства для АПК»*. Воронеж, 2016. Т. 2. С. 10–15.
63. Федотов А.А., Руденко Е.Ю. Получение адсорбентов из подсолнечной лузги для удаления хрома (VI) из сточных вод // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022. Т. 12, №4(43). С. 506–513.
64. Тертышник Э.Г., Уваров А.Д., Епифанов А.О. Использование композитных сорбентов на основе гексацианоферратов переходных металлов, внедрённых в лузгу подсолнечника, для извлечения радиоцезия из природных вод // *АНРИ*. 2014. №4. С. 65–72.
65. Зевацкая А.А., Щетинская О.С. Изучение сорбционной активности шелухи подсолнечника по отношению к ионам меди (II) // *Электронный сборник статей по материалам XLIX студенческой международной научно-практической конференции «Научное сообщество студентов XXI столетия. Естественные науки»*. Новосибирск, 2017. Т. 2 (48). С. 41–44.
66. Stanković S., Šoštarčić T., Bugarčić M., Janičević A., Pantović-Spačić K., Lopičić Z. Adsorption of Cu (II) ions from synthetic solution by sunflower seed husks // *Acta Periodica Technologica*. 2019. Vol. 50. Pp. 268–277. <https://doi.org/10.2298/APT1950268S>.
67. Осокин В.М., Сомин В.А., Комарова Л.Ф. Сорбенты на основе лузги подсолнечника для очистки воды от соединений меди // *Ползуновский вестник*. 2014. №3. С. 257–258.

68. Сиволобова Н.О., Грачева Н.В., Жашуева К.А., Сикорская А.В. Адсорбционные материалы на основе лузги подсолнечника // Инженерный вестник Дона. 2017. №1 (44). С. 1–8.
69. Лысенко А.В., Ветчинова Д.В., Фрундина Д.А. Изучение адсорбции ионов железа (III) отходами растительного происхождения в зависимости от температуры // Сборник научных статей 5-й Международной молодежной научной конференции «Будущее науки-2017». 2017. Т. 3. С. 319–322.
70. Карунина Е.В., Гончарова В.В. Перспективы использования лузги подсолнечника для разработки каталитического сорбента обезжелезивания природной воды // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения». Томск, 2018. С. 10–12.
71. Tadayon Y., Bahrololoom M.E., Javadpour S. An experimental study of sunflower seed husk and zeolite as adsorbents of Ni (II) ion from industrial wastewater // Water Resources and Industry. 2023. Vol. 30. Article 100214. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100214>.
72. Адонина Т.В., Лупандина Н.С., Василенко М.И. Очистка сточных вод, содержащих тяжелые металлы, натуральными органическими сорбентами // Сборник докладов III Международной научно-технической конференции «Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды». Белгород, 2017. С. 3–7.
73. Hussein A.A. Adsorption of lead ions from aqueous solution by using sunflower husks // International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology. 2019. Vol. 3, no. 8. Pp. 7–11.
74. Yılmaz C.E., Aslani M.A.A., Aslani C.K. *Helianthus annuus* çekirdeği kabuklarında toryum sorpsiyonunun taguchi metodu kullanılarak incelenmesi // Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi. 2019. Vol. 21(63). Pp. 741–747.
75. Воронин Н.А. Сорбция ионов цинка лузгой гречихи и подсолнечника // Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь». Барнаул, 2021. Т. 1-2. С. 261–263.
76. Bozecka A., Bozecki P., Sanak-Rydlewska S. Removal of Pb (II) and Cd (II) ions from aqueous solutions with selected organic wastes // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2016. Vol. 52, no. 1. Pp. 380–396.
77. Жашуева К.А., Сиволобова Н.О., Грачева Н.В., Сикорская А.В. Очистка воды от ионов тяжелых металлов адсорбентами на основе растительных отходов // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, №7. С. 142–143.
78. Сикорская А.В., Сиволобова Н.О., Крючихина Е.А. Очистка сточных вод от тяжелых металлов природными сорбентами // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения». Томск, 2017. С. 125–127.
79. Сиволобова Н.О., Грачева Н.В., Желтобрюхов В.Ф., Букреева К.Е. Очистка сточных вод адсорбентами на основе растительных отходов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. №1. С. 104–112.
80. Патент №2650978 (РФ). Способ получения сорбента из лузги подсолнечника / Н.В. Грачева, Н.О. Сиволобова, В.Ф. Желтобрюхов, А.В. Сикорская, К.А. Жашуева. – 18.04.2018.
81. Abdulhussein S.A. Single and binary adsorption of Cu (II) and Ni (II) ions from aqueous solutions by sunflower seed husk // Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences. 2019. Vol. 26, no. 1. Pp. 35–43. <https://doi.org/10.33261/jaaru.2019.26.1.005>.
82. Abdulhusain N.A., Mokif L.A. The removal performance of bio-sorption on sunflower seed husk for copper and lead ions from aqueous solutions // Journal of Ecological Engineering. 2023. Vol. 24, no. 5. Pp. 110–117. <https://doi.org/10.12911/22998993/161452>.
83. Abood M.M., Istiaque F., Azhari N.N. Remediation of heavy metals using selected agricultural waste: sunflower husk and durian leaves // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 557, no. 1. Article 012080. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/557/1/012080>.
84. Усипбекова Е.Ж., Рахым А.Б., Сейлханова Г.А., Жагипарова А.Д., Кенесова А.К., Османжан Г.О. Исследование адсорбции ионов меди и цинка сорбентами на основе растительных отходов – жмыха и лузги семян подсолнуха // Eurasian Journal of Ecology. 2021. Т. 67, №2. С. 22–30. <https://doi.org/10.26577/EJE.2021.v67.i2.02>.
85. Сомин В.А., Куталова А.В. Умягчение подземных вод сорбционно-ионообменными материалами из отходов растениеводства // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности промышленных регионов». Кемерово, 2017. С. 100–103.
86. Simón D., Palet C., Costas A., Cristóbal A. Agro-industrial waste as potential heavy metal adsorbents and subsequent safe disposal of spent adsorbents // Water. 2022. Vol. 14. Article 3298. <https://doi.org/10.3390/w14203298>.
87. Ольшанская Л.Н., Собгайда Н.А., Валиев Р.Ш. Извлечение тяжелых металлов из загрязненных стоков с использованием адсорбентов и фитосорбентов // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19, №11. С. 18–23.
88. Ямансарова Э.Т., Громыко Н.В., Халикова И.Р., Абдуллин М.И. Применение новых сорбционных материалов для очистки природной воды от ионов тяжелых металлов и органических веществ // Научный журнал «Апробация». 2014. №12(27). С. 10–12.

89. Ямансарова Э.Т., Громько Н.В., Халикова И.Р., Абдуллин М.И. Перспектива применения новых сорбционных материалов для улучшения экологического состояния водных ресурсов // Научный журнал НИУ ИТМО. Экономика и экологический менеджмент. 2015. №1. С. 265–270.
90. Громько Н.В., Ямансарова Э.Т. Новые сорбенты для очистки питьевой воды от загрязнений ионами тяжелых металлов // Новая наука: От идеи к результату. 2015. №7-2. С. 140–142.
91. Radenković M., Momčilović M., Petrović J., Mraković A., Relić D., Popović A., Živković S. Removal of heavy metals from aqueous media by sunflower husk: A comparative study of biosorption efficiency by using ICP-OES and LIBS // Journal of the Serbian Chemical Society. 2022. Vol. 87, no. 7-8. Pp. 939–952.
92. Касьянов Г.И., Марченко А.А., Ниживенко М.В. Сорбционная очистка водных объектов // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Достижения и проблемы современных тенденций переработки сельскохозяйственного сырья: технологии, оборудование, экономика». Краснодар, 2016. С. 166–170.
93. Ismail Z.Z., Hameed B.B. Sustainable application of agro-industrial biomass waste for water treatment: Recycling of sunflower seeds hulls for ammonium removal // The Journal of Solid Waste Technology and Management. 2016. Vol. 42, no. 4. Pp. 251–259. <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2016.251>.
94. Moyo M., Maringe A., Chigondo F., Nyamunda B.C., Sebata E., Shumba M. Adsorptive removal of nitrate ions from aqueous solutions using acid treated sunflower seed husk (*Helianthus annuus*) // International Journal of Advances in Science and Technology. 2012. Vol. 5, no. 6. Pp. 47–66.
95. Bharathi K.S., Ramesh S.T. Removal of dyes using agricultural waste as low-cost adsorbents: a review // Applied Water Science. 2013. Vol. 3. Pp. 773–790. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0117-y>.
96. Khatoun H., Rai J.P.N. Agricultural waste materials as biosorbents for the removal of heavy metals and synthetic dyes - a review // Octa Journal of Environmental Research. 2016. Vol. 4, no. 3. Pp. 1–22.
97. Al-Gheethi A.A., Azhar Q.M., Kumar P.S., Yusuf A.A., Al-Buriah A.K., Mohamed R.M.S.R., Al-Shaibani M.M. Sustainable approaches for removing Rhodamine B dye using agricultural waste adsorbents: A review // Chemosphere. 2022. Vol. 287. Article 132080. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132080>.
98. Anastopoulos I., Kyzas G.Z. Agricultural peels for dye adsorption: a review of recent literature // Journal of Molecular Liquids. 2014. Vol. 200. Pp. 381–389. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2014.11.006>.
99. Nasar A. Utilization of tea wastes for the removal of toxic dyes from polluted water - a review // Biomass Conversion and Biorefinery. 2023. Vol. 13. Pp. 1399–1415. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01205-y>.
100. Soldatkina L.M., Sagaidak E.V., Menchuk V.V. Adsorption of cationic dyes from aqueous solutions on sunflower husk // Journal of Water Chemistry and Technology. 2009. Vol. 31, no. 4. Pp. 238–243.
101. Anastopoulos I., Giannopoulos G., Islam A., Ighalo J.O., Iwuchukwu F.U., Pashalidis I., Kalderis D., Giannakoudakis D.A., Nair V., Lima E.C. Potential environmental applications of *Helianthus annuus* (sunflower) residue-based adsorbents for dye removal in (waste) waters // Biomass-Derived Materials for Environmental Applications. 2022. Pp. 307–318. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91914-2.00008-8>.
102. Ong S.T., Keng P.S., Lee S.L., Leong M.H., Hung Y.T. Equilibrium studies for the removal of basic dye by sunflower seed husk (*Helianthus annuus*) // International Journal of the Physical Sciences. 2010. Vol. 5, no. 8. Pp. 1270–1276.
103. Aldabagh I.S., Saad D.N., Ahmed E.I. Removal of methylene blue from aqueous solution by green synthesized silicon dioxide nanoparticles using sunflower husk // Chemical Engineering Journal Advances. 2024. Vol. 18. Article 100608. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2024.100608>.
104. Ковехова А.В., Земнухова Л.А., Арефьева О.Д. Сорбционные свойства продуктов переработки отходов производства подсолнечника // Вестник ДВО РАН. 2019. №6(208). С. 96–103.
105. Suteu D., Zaharia C., Malutan T. Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies of Basic Blue 9 dye sorption on agro-industrial lignocellulosic materials // Open Chemistry. 2012. Vol. 10, no. 6. Pp. 1913–1926.
106. Uygunoz D., Demir F., Ozen M.Y., Derun E.M. Sunflower waste–manganese iron oxide composite for hazardous dye removal // Chemical Data Collections. 2022. Vol. 40. Article 100893. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2022.100893>.
107. Alizadeh S., Seyyedi K. Removal of CI Acid red 1 (AR1) dye pollutant from contaminated waters by adsorption method using sunflower seed shells and pine cone as agro waste materials // Journal of Applied Chemical Research. 2019. Vol. 13, no. 4. Pp. 93–105.
108. Suteu D., Zaharia C., Malutan T. Removal of orange 16 reactive dye from aqueous solutions by waste sunflower seed shells // Journal of the Serbian Chemical Society. 2011. Vol. 76, no. 4. Pp. 607–624.
109. Hameed B.H. Equilibrium and kinetic studies of methyl violet sorption by agricultural waste // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 154, no. 1-3. Pp. 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.010>.
110. Osma J.F., Saravia V., Toca-Herrera J.L., Couto S.R. Sunflower seed shells: a novel and effective low-cost adsorbent for the removal of the diazo dye Reactive Black 5 from aqueous solutions // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 147, no. 3. Pp. 900–905. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.112>.
111. Tomczak E., Tosik P. Waste plant material as a potential adsorbent of a selected azo dye // Chemical and Process Engineering. 2017. Vol. 38, no. 2. Pp. 283–294. <https://doi.org/10.1515/cpe-2017-0021>.
112. Kocadagistan B., Kocadagistan E. The effects of sunflower seed shell modifying process on textile dye adsorption: kinetic, thermodynamic and equilibrium study // Desalination and Water Treatment. 2016. Vol. 57, no. 7. Pp. 3168–3178. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.980329>.
113. Jaber H.A., Jabbar M.F.A. Adsorption of cationic and anionic dyes from aqueous solution using sunflower husk // Chemistry & Chemical Technology. 2021, no. 4. Pp. 567–574.

114. Oguntimein G.B. Biosorption of dye from textile wastewater effluent onto alkali treated dried sunflower seed hull and design of a batch adsorber // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015. Vol. 3, no. 4. Pp. 2647–2661. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.09.028>.
115. Gracheva N.V., Zheltobryukhov V.F. Sorption properties of sunflower husk melanins // *Pharmaceutical Chemistry Journal*. 2019. Vol. 53. Pp. 337–341. <https://doi.org/10.1007/s11094-019-02002-2>.
116. Грачева Н.В., Сиволобова Н.О., Желтобрюхов В.Ф. Перспективы использования меланинов лузги подсолнечника для очистки сточных вод пищевых производств от анионных азокрасителей // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения». Томск, 2017. С. 323–325.
117. Ямансарова Э.Т., Громько Н.В., Абдуллин М.И., Куковинец О.С., Зворыгина О.Б. Исследование сорбционных свойств материалов на основе растительного сырья по отношению нефтяным загрязнениям воды // *Вестник Башкирского университета*. 2015. Т. 20, №4. С. 1209–1212.
118. Ямансарова Э.Т., Громько Н.В. Перспективные виды растительных сорбентов для удаления нефтепродуктов из природных вод // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. 2015. №1. С. 180–185.
119. Руденко Е.Ю., Мышова К.А. Очистка сточных вод от нефти подсолнечной лузгой, модифицированной кислотами и щелочами // *Сборник научных трудов по материалам 2-й Всероссийской научно-практической конференции «Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения»*. Саратов, 2020. С. 269–272.
120. Сомин В.А., Бетц С.А., Комарова Л.Ф. Использование отходов растениеводства при очистке воды от фенола // *Вода: химия и экология*. 2016. №4. С. 48–53.
121. Ямансарова Э.Т., Громько Н.В., Абдуллин М.И., Куковинец О.С., Зворыгина О.Б. Исследование сорбционных свойств материалов на основе растительного сырья по отношению к органическим и неорганическим примесям // *Вестник Башкирского университета*. 2016. Т. 21, №2. С. 314–318.
122. Hayoun B., Bourouina-Bacha S., Pazos M., Sanromán M.A., Benkhenouche-Bouchene H., Deflaoui O., Hamaidi-Maouche N., Bourouina M. Production of modified sunflowers seed shells for the removal of bisphenol A // *RSC Advances*. 2021. Vol. 11, no. 6. Pp. 3516–3533. <https://doi.org/10.1039/d0ra09137e>.
123. Ferreira I.A., Wernke G., Diório A., Bergamasco R., Vieira M. Sunflower seed husks as a cost-effective adsorbent for chloroquine removal from water // *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*. 2024. Vol. 59. Article e1907.
124. Ferreira I.A., Diório A., Vieira M. Bioadsorção de cloroquina em casca de semente de girassol com tratamento químico // *X Simposio de Tecnologia e Engenharia de Alimentos*. 2023. Pp. 1–10.
125. Hayoun B., Bourouina M., Pazos M., Sanromán M.A., Bourouina-Bacha S. Equilibrium study, modeling and optimization of model drug adsorption process by sunflower seed shells // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 9. Article 3271. <https://doi.org/10.3390/app10093271>.
126. Laktif T., Imgharn A., Hsini A., Elhoudi M., Aarab N., Laabd M., Lakhmiri R., Albourine A. Sunflower seed shells@ polyaniline: a novel composite for the removal of pharmaceutical pollutants from wastewater // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2024. Vol. 104, no. 9. Pp. 2195–2212. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2060086>.
127. Kuśmierk K., Świątkowski A., Dąbek L. Removal of 2,4,6-trichlorophenol from aqueous solutions using agricultural waste as low-cost adsorbents // *Environment Protection Engineering*. 2017. Vol. 43, no. 4. Pp. 149–163. <https://doi.org/10.5277/epe170412>.
128. Жакулин А.М. Эффективность применения современных удобрений на примере кормовых культур в условиях Кулундинского района // *Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета*. 2021. №1. С. 33–35.
129. Girgiri A.Y., Kolo U.M., Bislava M.B., Chana Z.M., Jibrin T.A., Shettima S.M. The effects of sowing methods on growth components, yield chemical composition and silage quality of sunflower forage // *Nigerian Journal of Animal Science and Technology*. 2024. Vol. 7, no. 2. Pp. 33–42.
130. Brazil O.A.V., Vilanova-Neta J.L., Silva N.O., Vieira I.M.M., Lima Á.S., Ruzene D.S., Silva D.P., Figueiredo R.T. Integral use of lignocellulosic residues from different sunflower accessions: Analysis of the production potential for biofuels // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 221. Pp. 430–438. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.274>.
131. Nargotra P., Sharma V., Gupta M., Kour S., Bajaj B.K. Application of ionic liquid and alkali pretreatment for enhancing saccharification of sunflower stalk biomass for potential biofuel-ethanol production // *Bioresource Technology*. 2018. Vol. 267. Pp. 560–568. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.070>.
132. Marques A.P., Paulo A., Caetano N.S. Assessment of the potential of sunflower grown in metal-contaminated soils for production of biofuels // *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 5. Article 1829. <https://doi.org/10.3390/su16051829>.
133. Jain M., Garg V.K., Kadirvelu K., Sillanpää M. Adsorption of heavy metals from multi-metal aqueous solution by sunflower plant biomass-based carbons // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2016. Vol. 13. Pp. 493–500. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0855-5>.
134. Baysal M., Bilge K., Yılmaz B., Papila M., Yürüm Y. Preparation of high surface area activated carbon from waste-biomass of sunflower piths: Kinetics and equilibrium studies on the dye removal // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. Vol. 6, no. 2. Pp. 1702–1713. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.02.020>.
135. Kindzer D., Kochubei V. Comparison of the energy properties of sunflower stalk fibers for solid biofuel production // *Journal of Chemistry*. 2025. Article 7990012. <https://doi.org/10.1155/joch/7990012>.

136. Oguz E., Ersoy M. Biosorption of cobalt (II) with sunflower biomass from aqueous solutions in a fixed bed column and neural networks modelling // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014. Vol. 99. Pp. 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.10.004>.
137. Jain M., Garg V.K., Kadirvelu K. Chromium (VI) removal from aqueous system using *Helianthus annuus* (sunflower) stem waste // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 162, no. 1. Pp. 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.048>.
138. Liu X., Wang B., Jing G., Qiao Y. Kinetics, isotherms, and mechanism of Cr (VI) adsorption by polyaniline/sunflower stem pith composite adsorbent // *Desalination and Water Treatment*. 2019. Vol. 141. Pp. 197–207. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23313>.
139. Hussein B.I. Removal of copper ions from waste water by adsorption with modified and unmodified sunflower stalks // *Journal of Engineering*. 2010. Vol. 16, no. 3. Pp. 5411–5421.
140. Ai L., Luo X., Lin X., Zhang S. Biosorption behaviors of uranium (VI) from aqueous solution by sunflower straw and insights of binding mechanism // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013. Vol. 298. Pp. 1823–1834. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2613-9>.
141. Ai L., Luo X., Lin X., Mei Q. Extended study of sunflower straw in the selective adsorption behaviors and mechanisms for U (VI) and Pb (II) // *Chemistry and Industry of Forest Products*. 2014. Vol. 34, no. 2. Pp. 9–16. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2417.2014.02.002>.
142. Ai L., Luo X., Wang Y., Mei Q. Selective adsorption of U(VI) and Cu(II) ions by sunflower straw // *CI ESC Journal*. 2014. Vol. 65, no. 4. Pp. 1450–1461.
143. Jalali M., Aboulghazi F. Sunflower stalk, an agricultural waste, as an adsorbent for the removal of lead and cadmium from aqueous solutions // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2013. Vol. 15. Pp. 548–555. <https://doi.org/10.1007/s10163-012-0096-3>.
144. Sun G., Shi W. Sunflower stalks as adsorbents for the removal of metal ions from wastewater // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1998. Vol. 37, no. 4. Pp. 1324–1328.
145. Feizi M., Jalali M. Removal of heavy metals from aqueous solutions using sunflower, potato, canola and walnut shell residues // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2015. Vol. 54. Pp. 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.03.027>.
146. Jain M., Garg V.K., Kadirvelu K. Chromium removal from aqueous system and industrial wastewater by agricultural wastes // *Bioremediation Journal*. 2013. Vol. 17, no. 1. Pp. 30–39. <https://doi.org/10.1080/10889868.2012.731450>.
147. Jain M., Garg V.K., Kadirvelu K. Removal of Ni (II) from aqueous system by chemically modified sunflower biomass // *Desalination and Water Treatment*. 2014. Vol. 52, no. 28-30. Pp. 5681–5695. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.811112>.
148. Алтынников В.С., Сыса В.И. СВЧ модификация сорбционного материала из отхода растениеводства в технологии очистки сточных вод от красителей // *Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 300-летию РАН*. 2022. С. 22–26.
149. Евтушевко Е.И., Локтионова Е.В., Шайхиев И.Г., Сапронова Ж.А. Кинетика и механизм адсорбции красителя метиленового голубого измельченной биомассой подсолнечника // *Chemical Bulletin*. 2024. Т. 7, №3. С. 78–92. <https://doi.org/10.58224/2619-0575-2024-7-3-78-92>.
150. Liu X., Zhang H., Jing G. Synthesis of visible light-responsive cuprous oxide/sunflower stem pith hybrid materials for detoxification of methylene blue // *Water Science & Technology*. 2022. Vol. 86, no. 11. Pp. 3041–3050. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.389>.
151. Ma X., Liu Y., Zhang Q., Sun S., Zhou X., Xu Y. A novel natural lignocellulosic biosorbent of sunflower stem-pith for textile cationic dyes adsorption // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 331. Article 129878. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129878>.
152. Yan C., Wu F., Zhou X., Luo J., Jiang K. Superadsorbent aerogel based on sunflower stem pith cellulose and layered double hydroxides modified montmorillonite for methylene blue removal from water solution // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 257. Article 128749. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128749>.
153. Свергузова С.В., Сапронова Ж.А., Локтионова Е.В., Сыса В.И., Шайхиев И.Г. Использование растительного сорбента для извлечения красителя конго красный из модельных растворов // *Chemical Bulletin*. 2021. Т. 4, №1. С. 44–55.
154. Локтионова Е.В., Андросик А.Е., Сыса В.И. Очистка модельных сточных вод от красителя конго-красного отходом растениеводства // *Сборник докладов Всероссийской научной конференции «Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования»*. Белгород, 2021. С. 168–171.
155. Свергузова С.В., Локтионова Е.В. Влияние щелочной обработки на сорбционные свойства биомассы подсолнечника // *Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология»*. Белгород, 2020. С. 169–172.
156. Montes-Alba E.J., de Jesús Camargo-Vargas G., Agudelo-Valencia R.N., Dévora-Isiordia G.E. Adsorption study of Acid Red 114 and Basic Blue 3 on sunflower stalk // *Journal of Water Resource and Protection*. 2019. Vol. 11, no. 1. Pp. 68–81. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.111005>.
157. Локтионова Е.В., Омелянова С.С., Сыса В.И., Лушников А.С. Очистка модельных сточных вод масложировой промышленности отходом растениеводства // *Сборник докладов Международной научно-технической*

- конференции «Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология». Белгород, 2023. С. 105–110
158. Локтионова Е.В., Свергузова С.В., Жабский В.В. Определение емкости отхода растениеводства по бензину // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире». Казань, 2021. С. 304–306.

Поступила в редакцию 3 июля 2025 г.

После переработки 10 сентября 2025 г.

Принята к публикации 26 января 2026 г.

Shaikhiev I.G.¹, Sverguzova S.V.^{2*}, Sapronova Zh.A.², Shaikhiyeva K.I.¹, Loktionova E.V.² USE OF WASTE FROM PROCESSING AND COMPONENTS OF BIOMASS OF ANNUAL SUNFLOWER (*HELIANTHUS ANNUUS*) AS A SORPTION MATERIAL FOR EXTRACTING POLLUTANTS FROM AQUATIC ENVIRONMENTS

¹ Kazan National Research Technological University, st. K. Marxa, 68, Kazan, 420015, Russia

² V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, st. Kostyukova, 46, Belgorod, 308012, Russia, pe@intbel.ru

The article summarizes the literature data on the use of waste from the processing of seeds and components of sunflower (*Helianthus annuus* L.) biomass as sorption materials for the extraction of various pollutants from aquatic environments. It briefly presents information on the volumes of sunflower seed cultivation in the Russian Federation. It presents data on the composition of cake, meal and husk of sunflower seeds and biomass components. It is shown that the mass fraction of crude fiber, according to various sources, ranges from 17.09 to 30.1%, which determines the high sorption properties of the material, and in the husk of sunflower seeds the proportion of crude fiber reaches 67%. It briefly presents information on the ways of their use in various sectors of the national economy. It was revealed that the greatest number of publications are devoted to the use of sunflower seed husk (SSH) as a sorbent for the removal of pollutants from model and real wastewater. The article presents information on the possibility of extracting chromium (VI), copper (II), iron (III), nickel (II), lead (II), zinc (II) and other ions using sunflower seed processing products. Cases of extracting organic compounds from solutions, such as dyes, petroleum products and other organic substances, are described. Data on the values of the maximum sorption capacity and the efficiency of extracting pollutants from LSP and plant stems are presented. It is determined that adsorption isotherms are well described in most cases by the Langmuir and Freundlich models, and the kinetics of the processes in the overwhelming majority of cases obeys the pseudo-second-order model.

Keywords: sunflower, *Helianthus annuus*, seed processing waste, biomass components, pollutants, aquatic environment, removal.

For citing: Shaikhiev I.G., Sverguzova S.V., Sapronova Zh.A., Shaikhiyeva K.I., Loktionova E.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 2, pp. 57–83. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260217572>.

References

1. Bach J.P., Ziegler U., Deuschl G., Dodel R., Doblhammer-Reiter R. *Movement Disorders*, 2011, vol. 26, no. 12, pp. 2286–2290. <https://doi.org/10.1002/mds.23878>.
2. Agapkin A.M., Makhotina I.A., Ibragimova N.A., Goryunova O.B., Izembayeva A.K., Kalachev S.L. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 981, article 022009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/2/022009>.
3. Worku L.A., Bachheti A., Bachheti R.K., Reis C.R., Chandel A.K. *Membranes*, 2023, vol. 13, no. 2, article 228. <https://doi.org/10.3390/membranes13020228>.
4. Meraj A., Singh S.P., Jawaid M., Nasef M.M., Alomar T.S., Al Masoud N.L. *Journal of Polymers and the Environment*, 2023, vol. 31, no. 8, pp. 3283–3316. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02817-x>.
5. Sagar N.A., Pareek S., Sharma S., Yahia E.M., Lobo M.G. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 512–531. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>.
6. Aziz S., Narayana K.K., Oberoi H.S. *Utilisation of Bioactive Compounds from Agricultural and Food Processing Waste*, 2017, pp. 127–158.
7. Kumar K., Yadav A.N., Kumar V., Vyas P., Dhaliwal H.S. *Bioresources and Bioprocessing*, 2017, vol. 4, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0148-6>.
8. Blasi A., Verardi A., Lopresto C.G., Siciliano S., Sangiorgio P. *Recycling*, 2023, vol. 8, article 61. <https://doi.org/10.3390/recycling8040061>.

* Corresponding author.

9. Jiménez-López C., Fraga-Corral M., Carpena M., García-Oliveira P., Echave J., Pereira A.G., Lourenço-Lopes C., Prieto M.A., Simal-Gandara J. *Food and Function*, 2020, vol. 11, no. 6, pp. 4853–4877. <https://doi.org/10.1039/D0FO00937G>.
10. Megha, Singh N. *Agricultural Waste Recycling for Sustainable Development: From Waste to Wealth*, 2024, pp. 109–129. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61133-9_5.
11. Peng S., Jiang Y., Chen Z., Osman A.I., Farghali M., Rooney D.W., Yap P.S. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, vol. 21, no. 2, pp. 765–801. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01551-5>.
12. Ahmed T., Noman M., Qi Y., Shahid M., Hussain S., Masood H.A., Xu L., Ali H.M., Negm S., El-Kott A.F., Yao Y., Qi X. *Plants*, 2023, vol. 12, article 3550. <https://doi.org/10.3390/plants12203550>.
13. Khalife E., Sabouri M., Kaveh M., Szymanek M. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 6, article 2355. <https://doi.org/10.3390/app14062355>.
14. Ganasen N., Bahrami A., Loganathan K. *Buildings*, 2023, vol. 13, article 426. <https://doi.org/10.3390/buildings13020426>.
15. Mohite A.S., Jagtap A.R., Awhad M.S., More A. *Energy Nexus*, 2022, vol. 7, article 100134. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100134>.
16. Alsulaili A., Elsayed K., Refaie A. *Journal of Engineering Research*, 2023, vol. 12, pp. 691–703. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.09.018>.
17. Farhadi A., Ameri A., Tamjidi S. *Physical Chemistry Research*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 211–226. <https://doi.org/10.22036/pcr.2021.256683.1852>.
18. Karić N., Maia A.S., Teodorović A., Atanasova N., Langergraber G., Crini G., Ribeiro A.R.L., Đolić M. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2022, vol. 9, article 100239. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100239>.
19. Ashfaq M.M., Tüzemen G.B., Nur A. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 84, pp. 1068–1084. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.295>.
20. Alengebavi A., Ran Y., Osman A.I. *Environmental Chemistry Letters*, 2024, vol. 22, pp. 2641–2668. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01789-1>.
21. Farooq U., Kozinski J.A., Khan M.A., Athar M. *Bioresource Technology*, 2010, vol. 101, no. 14, pp. 5043–5053. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.030>.
22. Sahoo J.K., Hota A., Singh C., Barik S., Sahu N., Sahoo S.K., Sahoo H. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2023, vol. 103, no. 20, pp. 9131–9153. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.2003349>.
23. Ahmed M.J., Anastopoulos I., Kalderis D., Haris M., Usman M. *Environmental Research*, 2024, vol. 250, article 118507. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118507>.
24. Chuah T.G., Jumariah A., Azni I., Katayon S., Choong S.T. *Desalination*, 2005, vol. 175, no. 3, pp. 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.10.014>.
25. Syuhadah N., Rohasliney H. *Health and the Environment Journal*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 89–95.
26. Yefremova S., Kablanbekov A., Satbaev B., Zharmenov A. *Materials*, 2023, vol. 16, article 7353. <https://doi.org/10.3390/ma16237353>.
27. Shaykhiyev I.G., Gal'blaub O.A., Grechina A.S. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 23, pp. 110–117. (in Russ.).
28. Shaikhiev I.G., Svergzova S.V., Galimova R.Z., Grechina A.S. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 945, article 012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/945/1/012044>.
29. Svergzova S.V., Shaykhiyev I.G., Grechina A.S., Shaykhiyeva K.I. *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya*, 2018, no. 2 (67), pp. 51–60. (in Russ.).
30. Shaikhiev I.G., Svergzova S.V., Shaikhieva K.I., Deberdeev T.R. *Polymer Science, Series D*, 2023, vol. 16, no. 3, pp. 651–656.
31. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzova S.V. *Materials International*, 2024, vol. 6, no. 4, article 37. <https://doi.org/10.33263/Materials64.037>.
32. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzova S.V. *Materials International*, 2024, vol. 6, no. 4, article 33. <https://doi.org/10.33263/Materials64.033>.
33. Iwuozor K.O., Oyekunle I.P., Oladunjoye I.O., Ibitogbe E.M., Olorunfemi T.S. *Sugar Technology*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 1167–1185. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01051-w>.
34. Lemessa G., Gabbiye N., Alemayehu E. *Water Practice & Technology*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 393–407. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.011>.
35. Shaykhiyeva K.I., Stepanova S.V., Shaykhiyev I.G., Svergzova S.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2024, no. 3, pp. 49–70. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240313555>. (in Russ.).
36. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzova S.V. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 3173–3185. <https://doi.org/10.33263/BRIAC123.31733185>.
37. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzova S.V. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 4518–4528.
38. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzova S.V. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 12689–12705. <https://doi.org/10.33263/BRIAC115.1268912705>.
39. Onyango C., Nyairo W., Tchieta G.P., Shikuku V.O. *Frontiers in Environmental Chemistry*, 2025, vol. 6, article 1568695. <https://doi.org/10.3389/fenvc.2025.1568695>.

40. Akpomie K.G., Conradie J. *Environmental Chemistry Letters*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 1085–1112. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00995-x>.
41. Gómez-Aguilar D.L., Rodríguez-Miranda J.P., Salcedo-Parra O.J. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 7, article 2124. <https://doi.org/10.3390/molecules27072124>.
42. Shaykhiyev I.G., Sverguzova S.V., Shaykhiyeva K.I., Sisse Kh., Voronina Yu.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2023, no. 1, pp. 61–75. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230111931>. (in Russ.).
43. Shaykhiyev I.G., Sverguzova S.V., Shaykhiyeva K.I., Saponova Zh.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 2, pp. 5–18. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020025622>. (in Russ.).
44. Shaikhiev I., Shaykhiyeva K., Sverguzova S., Fomina E., Vinogradenko Y., Fediuk R., Gunasekaran M., Amran M., Svintsov A.P., de Azevedo A.R.G. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 10. <https://doi.org/10.3390/ma15103428>.
45. Shaykhiyev I.G., Shaykhiyeva K.I., Sverguzova S.V., Vinogradenko Yu.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2021, no. 3, pp. 39–54. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021038405>. (in Russ.).
46. *Podsolnechnik odnoletniy* [Annual sunflower]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Подсолнечник_однолетний. (in Russ.).
47. Bondarenko Yu.P. *Regional'nyye agrosistemy: ekonomika i sotsiologiya*, 2024, no. 2, pp. 4–14. (in Russ.).
48. Petraru A., Ursachi F., Amariei S. *Plants*, 2021, vol. 10, no. 11, article 2487. <https://doi.org/10.3390/plants10112487>.
49. Khar'kov V.V., Tuntsev D.V., Kuznetsov M.G. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 130–134. (in Russ.).
50. Shcherbakov V.G., Ksandopulo S.Yu., Aleksandrova A.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiyayu*, 2003, no. 5-6, pp. 27–28. (in Russ.).
51. Bykov A.V., Kvan O.V., Miroshnikov S.A., Duskaev G.K. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 677, no. 5, article 052054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052054>.
52. Reffae A.S., El-Nashar D.E., Yaseen A.A., Abd-El-Messieh S.L. *Egyptian Journal of Chemistry*, 2021, vol. 64, no. 10, pp. 5853–5861. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2021.71142.3562>.
53. Kudinov P.I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya*, 1993, no. 1-2, pp. 5–10. (in Russ.).
54. Cancalon P. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1971, vol. 48, no. 10, pp. 629–632.
55. Khamrakulova M.K., Turgunov E.O. *Web of Discoveries: Journal of Analysis and Inventions*, 2024, vol. 2, no. 12, pp. 1–5.
56. Quaranta N., Unsen M., López H., Giansiracusa C., Roether J.A., Boccaccini A.R. *Ceramics International*, 2011, vol. 37, no. 1, pp. 377–385. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.09.015>.
57. Irez A.B. *Journal of Polymer Science*, 2024, vol. 62, no. 15, pp. 3471–3484. <https://doi.org/10.1002/pol.20240162>.
58. Kluska J., Matej-Lukowicz K., Nawrot N. *Sustainability*, 2024, vol. 16, article 11234. <https://doi.org/10.3390/su162411234>.
59. Anastopoulos I., Ighalo J.O., Igwegbe C.A., Giannakoudakis D.A., Triantafyllidis K.S., Pashalidis I., Kalderis D. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, vol. 342, article 117540. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117540>.
60. Peña-Guzmán C., Otaño-Álvarez Á., Jiménez-Ariza T. *Oil Crop Science*, 2024, vol. 9, pp. 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2024.07.001>.
61. Lahmar A., Nouacer S., Djellabi R., Hattab Z., Berredjem Y., Guerfi K. *Desalination and Water Treatment*, 2021, vol. 226, pp. 276–291. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27257>.
62. Zhashuyeva K.A., Sivolobova N.O. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Innovatsionnyye tekhnologii i tekhnicheskkiye sredstva dlya APK»*. [Proceedings of the International scientific and practical conference of young scientists and specialists "Innovative technologies and technical means for the agro-industrial complex"]. Voronezh, 2016, vol. 2, pp. 10–15. (in Russ.).
63. Fedotov A.A., Rudenko Ye.Yu. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2022, vol. 12, no. 4(43), pp. 506–513. (in Russ.).
64. Tertyschnik E.G., Uvarov A.D., Yepifanov A.O. *ANRI*, 2014, no. 4, pp. 65–72. (in Russ.).
65. Zevatskaya A.A., Shchetinskaya O.S. *Elektronnyy sbornik statey po materialam XLIX studencheskoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchnoye soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Yestestvennyye nauki»*. [Electronic collection of articles based on the materials of the XLIX student international scientific and practical conference "Scientific community of students of the 21st century. Natural Sciences"]. Novosibirsk, 2017, vol. 2 (48), pp. 41–44. (in Russ.).
66. Stanković S., Šoštarić T., Bugarić M., Janićijević A., Pantović-Spajić K., Lopičić Z. *Acta Periodica Technologica*, 2019, vol. 50, pp. 268–277. <https://doi.org/10.2298/APT1950268S>.
67. Osokin V.M., Somin V.A., Komarova L.F. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 3, pp. 257–258. (in Russ.).
68. Sivolobova N.O., Gracheva N.V., Zhashuyeva K.A., Sikorskaya A.V. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2017, no. 1 (44), pp. 1–8. (in Russ.).
69. Lysenko A.V., Vetchinova D.V., Frundina D.A. *Sbornik nauchnykh statey 5-y Mezhdunarodnoy molo-dezhnoy nauchnoy konferentsii «Budushcheye nauki-2017»*. [Collection of scientific articles of the 5th International Youth Scientific Conference "Future of Science-2017"]. 2017, vol. 3, pp. 319–322. (in Russ.).
70. Karunina Ye.V., Goncharova V.V. *Sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Ekologiya i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennyye problemy i puti resheniya»*. [Collection of works of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists, graduate students and students "Ecology and safety in the technosphere: modern problems and solutions"]. Tomsk, 2018, pp. 10–12. (in Russ.).

71. Tadayon Y., Bahrololoom M.E., Javadpour S. *Water Resources and Industry*, 2023, vol. 30, article 100214. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100214>.
72. Adonina T.V., Lupandina N.S., Vasilenko M.I. *Sbornik dokladov III Mezhduнародной nauchno-tekhnicheskoj konferentsii «Energo- i resursosberegayushchiye ekologicheski chistyye khimiko-tekhnologicheskiye protsessy zashchity okruzhayushchey sredy»*. [Collection of reports of the III International scientific and technical conference "Energy- and resource-saving environmentally friendly chemical-technological processes for environmental protection"]. Belgorod, 2017, pp. 3–7. (in Russ.).
73. Hussein A.A. *International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 2019, vol. 3, no. 8, pp. 7–11.
74. Yılmaz C.E., Aslani M.A.A., Aslani C.K. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2019, vol. 21(63), pp. 741–747.
75. Voronin N.A. *Materialy XVIII Vserossiyskoj na-uchno-tekhnicheskoj konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Nauka i molodezh'»*. [Proceedings of the XVIII All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists "Science and Youth"]. Barnaul, 2021, vol. 1-2, pp. 261–263. (in Russ.).
76. Bozecka A., Bozecki P., Sanak-Rydlowska S. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 380–396.
77. Zhashuyeva K.A., Sivolobova N.O., Gracheva N.V., Sikorskaya A.V. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 7, pp. 142–143. (in Russ.).
78. Sikorskaya A.V., Sivolobova N.O., Kryuchikhina Ye.A. *Sbornik trudov Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Ekologiya i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennyye problemy i puti resheniya»*. [Collection of works of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists, post-graduates and students "Ecology and safety in the technosphere: modern problems and solutions"]. Tomsk, 2017, pp. 125–127. (in Russ.).
79. Sivolobova N.O., Gracheva N.V., Zheltobryukhov V.F., Bukreyeva K.Ye. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2019, no. 1, pp. 104–112. (in Russ.).
80. Patent 2650978 (RU). 18.04.2018. (in Russ.).
81. Abdulhussein S.A. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 35–43. <https://doi.org/10.33261/jaaru.2019.26.1.005>.
82. Abdulhusain N.A., Mokif L.A. *Journal of Ecological Engineering*, 2023, vol. 24, no. 5, pp. 110–117. <https://doi.org/10.12911/22998993/161452>.
83. Abood M.M., Istiaque F., Azhari N.N. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 557, no. 1, article 012080. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/557/1/012080>.
84. Usipbekova Ye.Zh., Rakhym A.B., Seylkanova G.A., Zhagiparova A.D., Kenesova A.K., Osmanzhan G.O. *Eurasian Journal of Ecology*, 2021, vol. 67, no. 2, pp. 22–30. <https://doi.org/10.26577/EJE.2021.v67.i2.02>. (in Russ.).
85. Somin V.A., Kutalova A.V. *Materialy Mezhduнародной nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nyye voprosy okhrany okruzhayushchey sredy i obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti promyshlennykh regionov»*. [Proceedings of the International scientific and practical conference "Topical issues of environmental protection and ensuring environmental safety of industrial regions"]. Kemerovo, 2017, pp. 100–103. (in Russ.).
86. Simón D., Palet C., Costas A., Cristóbal A. *Water*, 2022, vol. 14, article 3298. <https://doi.org/10.3390/w14203298>.
87. Ol'shanskaya L.N., Sobgayda N.A., Valiyev R.Sh. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2015, vol. 19, no. 11, pp. 18–23. (in Russ.).
88. Yamansarova E.T., Gromyko N.V., Khalikova I.R., Abdullin M.I. *Nauchnyy zhurnal «Aprobatsiya»*, 2014, no. 12(27), pp. 10–12. (in Russ.).
89. Yamansarova E.T., Gromyko N.V., Khalikova I.R., Abdullin M.I. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Ekonomika i ekologicheskij menedzhment*, 2015, no. 1, pp. 265–270. (in Russ.).
90. Gromyko N.V., Yamansarova E.T. *Novaya nauka: Ot idei k rezul'tatu*, 2015, no. 7-2, pp. 140–142. (in Russ.).
91. Radenković M., Momčilović M., Petrović J., Mraković A., Relić D., Popović A., Živković S. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2022, vol. 87, no. 7-8, pp. 939–952.
92. Kas'yanov G.I., Marchenko A.A., Nizhivenko M.V. *Sbornik materialov mezhduнародной nauchno-prakticheskoy konferentsii «Dostizheniya i problemy sovremennykh tendentsiy pererabotki sel'skokhozyaystvennogo syr'ya: tekhnologii, oborudovaniye, ekonomika»*. [Collection of materials of the international scientific and practical conference "Achievements and problems of modern trends in processing agricultural raw materials: technologies, equipment, economics"]. Krasnodar, 2016, pp. 166–170. (in Russ.).
93. Ismail Z.Z., Hameed B.B. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 2016, vol. 42, no. 4, pp. 251–259. <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2016.251>.
94. Moyo M., Maringe A., Chigondo F., Nyamunda B.C., Sebata E., Shumba M. *International Journal of Advances in Science and Technology*, 2012, vol. 5, no. 6, pp. 47–66.
95. Bharathi K.S., Ramesh S.T. *Applied Water Science*, 2013, vol. 3, pp. 773–790. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0117-y>.
96. Khatoon H., Rai J.P.N. *Octa Journal of Environmental Research*, 2016, vol. 4, no. 3, pp. 1–22.
97. Al-Gheethi A.A., Azhar Q.M., Kumar P.S., Yusuf A.A., Al-Buriah A.K., Mohamed R.M.S.R., Al-Shaibani M.M. *Chemosphere*, 2022, vol. 287, article 132080. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132080>.
98. Anastopoulos I., Kyzas G.Z. *Journal of Molecular Liquids*, 2014, vol. 200, pp. 381–389. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2014.11.006>.

99. Nasar A. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, vol. 13, pp. 1399–1415. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01205-y>.
100. Soldatkina L.M., Sagaidak E.V., Menchuk V.V. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2009, vol. 31, no. 4, pp. 238–243.
101. Anastopoulos I., Giannopoulos G., Islam A., Ighalo J.O., Iwuchukwu F.U., Pashalidis I., Kalderis D., Giannakoudakis D.A., Nair V., Lima E.C. *Biomass-Derived Materials for Environmental Applications*, 2022, pp. 307–318. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91914-2.00008-8>.
102. Ong S.T., Keng P.S., Lee S.L., Leong M.H., Hung Y.T. *International Journal of the Physical Sciences*, 2010, vol. 5, no. 8, pp. 1270–1276.
103. Aldabagh I.S., Saad D.N., Ahmed E.I. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2024, vol. 18, article 100608. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2024.100608>.
104. Kovekhova A.V., Zemnukhova L.A., Aref'yeva O.D. *Vestnik DVO RAN*, 2019, no. 6(208), pp. 96–103. (in Russ.).
105. Suteu D., Zaharia C., Malutan T. *Open Chemistry*, 2012, vol. 10, no. 6, pp. 1913–1926.
106. Uygunoz D., Demir F., Ozen M.Y., Derun E.M. *Chemical Data Collections*, 2022, vol. 40, article 100893. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2022.100893>.
107. Alizadeh S., Seyyedi K. *Journal of Applied Chemical Research*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 93–105.
108. Suteu D., Zaharia C., Malutan T. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2011, vol. 76, no. 4, pp. 607–624.
109. Hameed B.H. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 154, no. 1-3, pp. 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.010>.
110. Osma J.F., Saravia V., Toca-Herrera J.L., Couto S.R. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 147, no. 3, pp. 900–905. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.112>.
111. Tomczak E., Tosik P. *Chemical and Process Engineering*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 283–294. <https://doi.org/10.1515/cpe-2017-0021>.
112. Kocadagistan B., Kocadagistan E. *Desalination and Water Treatment*, 2016, vol. 57, no. 7, pp. 3168–3178. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.980329>.
113. Jaber H.A., Jabbar M.F.A. *Chemistry & Chemical Technology*, 2021, no. 4, pp. 567–574.
114. Oguntimein G.B. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 2647–2661. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.09.028>.
115. Gracheva N.V., Zheltobryukhov V.F. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2019, vol. 53, pp. 337–341. <https://doi.org/10.1007/s11094-019-02002-2>.
116. Gracheva N.V., Sivolobova N.O., Zheltobryukhov V.F. *Sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Ekologiya i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennyye problemy i puti resheniya»*. [Collection of works of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists, graduate students and students "Ecology and safety in the technosphere: modern problems and solutions"]. Tomsk, 2017, pp. 323–325. (in Russ.).
117. Yamansarova E.T., Gromyko N.V., Abdullin M.I., Kukovinets O.S., Zvorygina O.B. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2015, vol. 20, no. 4, pp. 1209–1212. (in Russ.).
118. Yamansarova E.T., Gromyko N.V. *Obrazovaniye i nauka v sovremennom mire. Innovatsii*, 2015, no. 1, pp. 180–185. (in Russ.).
119. Rudenko Ye.Yu., Myshova K.A. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam 2-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Ekologicheskyy monitoring opasnykh promyshlennykh ob"yektov: sovremennyye dostizheniya, perspektivy i obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti naseleniya»*. [Collection of scientific papers based on the materials of the 2nd All-Russian scientific and practical conference "Environmental monitoring of hazardous industrial facilities: modern achievements, prospects and ensuring environmental safety of the population"]. Saratov, 2020, pp. 269–272. (in Russ.).
120. Somin V.A., Betts S.A., Komarova L.F. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2016, no. 4, pp. 48–53. (in Russ.).
121. Yamansarova E.T., Gromyko N.V., Abdullin M.I., Kukovinets O.S., Zvorygina O.B. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2016, vol. 21, no. 2, pp. 314–318. (in Russ.).
122. Hayoun B., Bourouina-Bacha S., Pazos M., Sanromán M.A., Benkhenouche-Bouchene H., Deflaoui O., Hamaidi-Maouche N., Bourouina M. *RSC Advances*, 2021, vol. 11, no. 6, pp. 3516–3533. <https://doi.org/10.1039/d0ra09137e>.
123. Ferreira I.A., Wernke G., Diório A., Bergamasco R., Vieira M. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 2024, vol. 59, article e1907.
124. Ferreira I.A., Diório A., Vieira M. *X Simposio de Tecnologia e Engenharia de Alimentos*, 2023, pp. 1–10.
125. Hayoun B., Bourouina M., Pazos M., Sanromán M.A., Bourouina-Bacha S. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 9, article 3271. <https://doi.org/10.3390/app10093271>.
126. Laktif T., Imgharn A., Hsini A., Elhoudi M., Aarab N., Laabd M., Lakhmiri R., Albourine A. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2024, vol. 104, no. 9, pp. 2195–2212. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2060086>.
127. Kuśmierk K., Świątkowski A., Dąbek L. *Environment Protection Engineering*, 2017, vol. 43, no. 4, pp. 149–163. <https://doi.org/10.5277/epe170412>.
128. Zhakulin A.M. *Vestnik molodezhnoy nauki Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 33–35. (in Russ.).

129. Girgiri A.Y., Kolo U.M., Bislava M.B., Chana Z.M., Jibrin T.A., Shettima S.M. *Nigerian Journal of Animal Science and Technology*, 2024, vol. 7, no. 2, pp. 33–42.
130. Brazil O.A.V., Vilanova-Neta J.L., Silva N.O., Vieira I.M.M., Lima Á.S., Ruzene D.S., Silva D.P., Figueiredo R.T. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 221, pp. 430–438. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.274>.
131. Nargotra P., Sharma V., Gupta M., Kour S., Bajaj B.K. *Bioresource Technology*, 2018, vol. 267, pp. 560–568. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.070>.
132. Marques A.P., Paulo A., Caetano N.S. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 5, article 1829. <https://doi.org/10.3390/su16051829>.
133. Jain M., Garg V.K., Kadirvelu K., Sillanpää M. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, vol. 13, pp. 493–500. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0855-5>.
134. Baysal M., Bilge K., Yilmaz B., Papila M., Yürüm Y. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 1702–1713. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.02.020>.
135. Kindzer D., Kochubei V. *Journal of Chemistry*, 2025, article 7990012. <https://doi.org/10.1155/joch/7990012>.
136. Oguz E., Ersoy M. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, vol. 99, pp. 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.10.004>.
137. Jain M., Garg V.K., Kadirvelu K. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 162, no. 1, pp. 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.048>.
138. Liu X., Wang B., Jing G., Qiao Y. *Desalination and Water Treatment*, 2019, vol. 141, pp. 197–207. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23313>.
139. Hussein B.I. *Journal of Engineering*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 5411–5421.
140. Ai L., Luo X., Lin X., Zhang S. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013, vol. 298, pp. 1823–1834. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2613-9>.
141. Ai L., Luo X., Lin X., Mei Q. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2014, vol. 34, no. 2, pp. 9–16. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2417.2014.02.002>.
142. Ai L., Luo X., Wang Y., Mei Q. *CI ESC Journal*, 2014, vol. 65, no. 4, pp. 1450–1461.
143. Jalali M., Aboulghazi F. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2013, vol. 15, pp. 548–555. <https://doi.org/10.1007/s10163-012-0096-3>.
144. Sun G., Shi W. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, vol. 37, no. 4, pp. 1324–1328.
145. Feizi M., Jalali M. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2015, vol. 54, pp. 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.03.027>.
146. Jain M., Garg V.K., Kadirvelu K. *Bioremediation Journal*, 2013, vol. 17, no. 1, pp. 30–39. <https://doi.org/10.1080/10889868.2012.731450>.
147. Jain M., Garg V.K., Kadirvelu K. *Desalination and Water Treatment*, 2014, vol. 52, no. 28-30, pp. 5681–5695. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.811112>.
148. Altyinnikov V.S., Sysa V.I. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konfe-rentsii molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova, posvyashchennoy 300-letiyu RAN*. [Collection of reports of the International scientific and technical conference of young scientists of the BSTU named after V.G. Shukhov, dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences]. 2022, pp. 22–26. (in Russ.).
149. Yevtushevko Ye.I., Loktionova Ye.V., Shaykhiyev I.G., Saponova Zh.A. *Chemical Bulletin*, 2024, vol. 7, no. 3, pp. 78–92. <https://doi.org/10.58224/2619-0575-2024-7-3-78-92>. (in Russ.).
150. Liu X., Zhang H., Jing G. *Water Science & Technology*, 2022, vol. 86, no. 11, pp. 3041–3050. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.389>.
151. Ma X., Liu Y., Zhang Q., Sun S., Zhou X., Xu Y. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 331, article 129878. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129878>.
152. Yan C., Wu F., Zhou X., Luo J., Jiang K. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, vol. 257, article 128749. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128749>.
153. Svergzuzova S.V., Saponova Zh.A., Loktionova Ye.V., Sysa V.I., Shaykhiyev I.G. *Chemical Bulletin*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 44–55. (in Russ.).
154. Loktionova Ye.V., Androsik A.Ye., Sysa V.I. *Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Bezopasnost', zashchita i okhrana okruzhayushchey prirodnoy sredy: fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya»*. [Collection of reports of the All-Russian scientific conference "Safety, protection and conservation of the natural environment: fundamental and applied research"]. Belgorod, 2021, pp. 168–171. (in Russ.).
155. Svergzuzova S.V., Loktionova Ye.V. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ratsional'noye ispol'zova-niye prirodnykh resursov i pererabotka tekhnogennogo syr'ya: fundamental'nyye problemy nauki, materialovedeniye, khimiya i biotekhnologiya»*. [Collection of reports of the International scientific and technical conference "Rational use of natural resources and processing of technogenic raw materials: fundamental problems of science, materials science, chemistry and biotechnology"]. Belgorod, 2020, pp. 169–172. (in Russ.).
156. Montes-Alba E.J., de Jesús Camargo-Vargas G., Agudelo-Valencia R.N., Dévora-Isiordia G.E. *Journal of Water Resource and Protection*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 68–81. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.111005>.
157. Loktionova Ye.V., Omel'yanova S.S., Sysa V.I., Lushnikov A.S. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ratsional'noye ispol'zova-niye prirodnykh resursov i pererabotka tekhnogennogo syr'ya: fundamental'nyye problemy nauki, materialovedeniye, khimiya i biotekhnologiya»*. [Collection of reports of the International scientific and technical conference "Rational use of natural resources and processing of technogenic raw

materials: fundamental problems of science, materials science, chemistry and biotechnology"]. Belgoro, 2023, pp. 105–110. (in Russ.).

158. Loktionova Ye.V., Sverguzova S.V., Zhabskiy V.V. *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Innovatsionnyye tekhnologii zashchity okruzhayushchey sredy v sovremennom mire»*. [Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation “Innovative technologies for environmental protection in the modern world”]. Kazan', 2021, pp. 304–306. (in Russ.).

Received July 3, 2025

Revised September 10, 2025

Accepted January 26, 2026

Сведения об авторах

Шайхиев Ильдар Гильманович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной экологии, ildars@inbox.ru

Свергузова Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленной экологии, pe@intbel.ru

Сапронова Жанна Ануаровна – доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой промышленной экологии, sapronova.2016@yandex.ru

Шайхиева Карина Ильдаровна – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной экологии, shaikhiyak@gmail.ru

Локтионова Екатерина Владимировна – аспирант, pe@intbel.ru

Information about authors

Shaikhiyak Ildar Gilmanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Environmental Engineering, ildars@inbox.ru

Sverguzova Svetlana Vasilievna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Industrial Ecology, pe@intbel.ru

Sapronova Zhanna Anuarovna – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Ecology, sapronova.2016@yandex.ru

Shaikhiyak Karina Ildarovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Environmental Engineering, shaikhiyak@gmail.ru

Loktionova Ekaterina Vladimirovna – postgraduate student, pe@intbel.ru