

УДК 635.262:641:547.992

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШЕЛУХИ ЧЕСНОКА В ПРОДУКТАХ ПИТАНИЯ И В КАЧЕСТВЕ СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА (ОБЗОР МИРОВОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

© К.И. Шайхиева¹, С.В. Свергузова², И.Г. Шайхиев¹, А.А. Фазулина¹, А.В. Святченко^{2*}

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

² Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, Белгород, 308012, Россия, sv.anastasiaa@mail.ru

В статье обобщены литературные данные по использованию измельченной шелухи чеснока (*Allium sativum* L.) в качестве функционального ингредиента в продуктах питания и сорбционных материалов для удаления различных ионов металлов, красителей и антибиотиков из водных сред. В статье представлена краткая информация о количестве отходов, образующихся при переработке чеснока и способах повторного использования. Кратко приведены сведения о составе и терапевтическом действии головок и шелухи чеснока. Показано, что добавление порошка чесночной шелухи и экстрактов из нее способствует увеличению функциональных характеристик различных продуктов питания. Приведены параметры адсорбционных процессов и значения параметров сорбции для различных загрязняющих веществ. Показано, что сорбционные характеристики шелухи чеснока для различных загрязняющих веществ могут быть улучшены путем модификации различными химическими реагентами. Определено, что модель Ленгмюра в большинстве случаев точнее описывает изотермы адсорбции загрязняющих веществ, а кинетика процесса точнее следует модели псевдовторного порядка.

Ключевые слова: чеснок, шелуха головок чеснока, состав, продукты питания, ионы металлов, красители, антибиотики, адсорбция, модификация.

Для цитирования: Шайхиева К.И., Свергузова С.В., Шайхиев И.Г., Фазулина А.А., Святченко А.В. Использование шелухи чеснока в продуктах питания и в качестве сорбционного материала (обзор мировой литературы) // Химия растительного сырья. 2026. №3. С. 52–72. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260317832>.

Введение

В настоящее время в мировом пространстве наблюдается устойчивая тенденция увеличения производства различных растительных продуктов питания. Данное обстоятельство обусловлено увеличением численности населения планеты. По прогнозам, численность народонаселения к 2050 году 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 от переработки сельскохозяйственного сырья, как правило, не находят должного вторичного использования, банально сжигаются, запахиваются в почву, используются в качестве подстилки для содержания животных или же сгнивают в местах образования. В то же время предложено большое количество различных направлений использования сельскохозяйственных отходов в качестве вторичных материальных ресурсов. В частности, возможно выделение целлюлозы [3], лигнина [4], пищевых волокон [5], полифенольных соединений [6], каротиноидов [7], различных антиоксидантов [8], витаминов [9], пигментов [10], эфирных масел [11] и целого ряда других ценных химических соединений [12]. Также возможно использование сельскохозяйственных растительных отходов в качестве наполнителя в

* Автор, с которым следует вести переписку.

конструкционных полимерных композитах [13], в строительных композиционных материалах [14, 15], сорбционных материалов для извлечения загрязняющих веществ из водных сред [16–18], для получения метана, биоэтанола [19] и др.

Одним из перспективных направлений утилизации растительных отходов сельскохозяйственного производства является их использование в качестве компонентов в рецептурах для производства различных продуктов питания [20–23]. Данное обстоятельство обусловлено наличием в составе отходов от переработки сельскохозяйственного сырья различных биологически активных веществ (БАВ), обладающих различными свойствами – нутрицевтическими, фармацевтическими, питательными, вкусовыми и т.д.

Вторым по объемам выращивания в мире среди луковичных растений после лука является чеснок обыкновенный (*Allium sativum* L.) – многолетнее травянистое растение; вид рода Лук подсемейства Луковые (*Allioideae*) семейства Амариллисовые (*Amaryllidaceae*). Луковица растения сложная, образует в пазухах своих чешуй от 2 до 50 луковичек, именуемых зубчиками, каждая из которых покрыта жесткой кожистой чешуей. Луковица округлая, несколько приплюснутая, к середине овально-ребристая. Луковицы могут быть по цвету белыми, желтоватыми, темно-фиолетовыми, розово-фиолетовыми. С помощью луковичек чеснок размножается вегетативно, что и используется в культуре. Внешние луковички продолговатые, к середине утолщенные; наружная поверхность выпуклая, внутренняя – вогнутая. Листья неполые, узкие, ланцетовидно-вытянутые, желобчатые, с нижней стороны с килем, заостренные к концу, цельнокрайные, прямостоячие или поникающие, достигающие в длину до 100 см. Каждый последующий лист прорастает изнутри предыдущего, тем самым образуя ложный стебель, более прочный, чем у репчатого лука. Цветенос высотой от 60 до 150 см, почти до половины одет листовыми влагалищами, до цветения на конце закручивается в спираль и заканчивается соцветием в виде зонтика, который до цветения покрыт пленчатой перепонкой. Соцветие – простой шаровидный зонтик, состоящий из стерильных цветков, воздушных размножающихся луковичек-бульбочек и плотного покрывала (обертки). Цветки на длинных цветоножках, с простым венчиковидным околоцветником, состоящим из шести лепестков. Лепестки околоцветника белые или бледно-лиловые, с одной жилкой, гладкие, имеют длину около 3 мм [24].

Мировое производство чеснока увеличилось с 27.6 млн тонн в 2017 году до примерно 30.1 млн т на сегодняшний день [25]. Крупнейшим производителем луковиц чеснока является Китай. В 2016 году там выращено 21187.13 тыс т. За ним с крупным отставанием следуют Индия – 1400 тыс. т, Бангладеш – 381.8 тыс. т. Россия занимала 6-е место, вырастив 262.2 тыс. т [24].

Химический состав головок и шелухи *Allium sativum*

Общеизвестно, что дольки чеснока содержат различные биологически активные вещества (БАВ). Кроме БАВ чеснок является богатым источником питательных веществ, содержащих клетчатку, жиры, сахара, витамины, белок, фосфор, кальций, йод, калий, серу и кремний. Также чеснок – богатый источник минералов, витаминов и других жизненно важных элементов, способствующих хорошему здоровью. Анализ 100 г свежих головок чеснока (117 ккал) показал, что они имеют следующий примерный состав: 67.8% воды, 27.4% углеводов, 3.5% белка, 0.3% жира, 1% золы, 0.7% клетчатки [26].

Минеральный состав представлен, мг/100 г: Ca (181), Fe (1,7), Mg (25), Na (17), P (153), K (401), Zn (1.16), Cu (0.299), Mn (1.67), Se (0.0142) [27]. Также идентифицировано наличие следующих витаминов, мг/100 г: С – 31.2, В1 – 0.2, В2 – 0.11, В3 – 0.7, В5 – 0.596, В6 – 1.24, Е – 0.08, К – 0.0017. В составе чеснока обнаружены различные аминокислоты, мг/100 г: триптофан – 0.066, изолейцин – 0.217, лейцин – 0.308, лизин – 0.273, метионин – 0.076, цистеин – 0.065, фенилаланин – 0.0183, тирозин – 0.081, валин – 0.291, аргинин – 0.634, гистидин – 0.113, аланин – 0.132, аспарагиновая кислота – 0.489, глутаминовая кислота – 0.805, глицин – 0.2, пролин – 0.1 и серин – 0.19. Суммарное содержание насыщенных жирных кислот составило 0.089 г/100 г, ненасыщенных жирных кислот – 0.249 г/100 г [27]. Кроме того, в составе чеснока идентифицированы различные флавоноиды, такие как, в частности, тангеретин, нобилетин, рутин, нарингин, нарингенин и др. [28], а также полифенольные соединения, такие как, в частности, хлорогеновая, 4-гидроксibenзойная, кофейная, ванильная, п-кумаровая, феруловая, синаповая кислоты и др. [29].

В составе луковиц чеснока, в свежих бульбах, также идентифицированы различные серосодержащие соединения, которые не встречаются у других луковичных, такие как аллиин (сульфоксид S-аллилцистеина), аллицин, Е-аджоен, Z-аджоен, 2-винил-4Н-1,3-дитиин, 3-винил-4Н-1,2-дитиин, диаллилсульфид, диаллилдисульфид, диаллилтрисульфид, аллилметилсульфид, аллилмеркаптан, аллилиетилтрисульфид,

аллилпропилдисульфид, тиакремон, гамма-глутамилцистеин, S-аллилцистеин, S-аллил-меркаптоцистеин и N-ацетилцистеин и др. [26–32]. Более подробная информация о содержащихся в составе бульбочек чеснока химических соединениях приведена в обзоре [33].

Благодаря острому вкусу, обусловленному наличием в его составе сероорганических соединений, а также широкой гаммы БАВ, чеснок широко используется во всем мире в пищу как приправа к различным блюдам и как функциональная пища [34–39]. В последние годы мировой спрос на функциональный чеснок резко возрос, представив на рынке несколько продуктов, таких как сухой чеснок, чесночное масло, выдержанный чеснок, черный чеснок и инулин.

Многочисленными исследованиями выявлен широкий спектр терапевтического действия чеснока [40–42]. Указывается, что чеснок обладает противовирусными [43], противобактериальными [44, 45], противотуберкулезными [46], противоканцерогенными [47–52], антиоксидантными [41, 53, 54], противодиабетическими [55], противогенотоксическими [56] и другими фармакологическими свойствами [27, 41, 57–59]. Выявлено, что чеснок оказывает положительное действие на сердечно-сосудистую систему человека [60–62]. Кроме того, включение чеснока в рационы при выращивании сельскохозяйственных животных и птиц оказывает положительное действие на здоровье последних [63, 64].

При переработке зубчиков чеснока образуются отходы – шелуха чеснока (ШЧ), которая представляет собой внешние сухие чешуи, формирующиеся вокруг головки чеснока и отдельных зубчиков. Эти тонкие, бумагоподобные оболочки выполняют защитную функцию, предохраняя мякоть чеснока от механических повреждений, воздействия патогенных микроорганизмов и преждевременного высыхания. С ботанической точки зрения ШЧ является видоизмененным листом растения, который в процессе созревания теряет влагу и приобретает характерную жесткую, хрупкую структуру.

На крупных перерабатывающих предприятиях, специализирующихся на производстве чесночного порошка, пасты, масла и других продуктов, образуются значительные объемы этих отходов. В настоящее время, как говорилось выше, в мире выращивается более 30.1 млн т головок чеснока. Выявлено, что при переработке 1 кг луковиц чеснока производится около 760 г зубчиков и образуется 240 г внешней и внутренней шелухи. Это огромное количество отходов чеснока сжигается без дальнейшего использования или банально запахивается в землю [65]. Кроме ШЧ в разряд отходов также переходят стебли, солома, стрелки, корни растения.

Однако учитывая большое количество БАВ в составе отходов от переработки чеснока, последние являются перспективными вторичными материальными ресурсами для использования в различных отраслях народного хозяйства. Пути валоризации чесночных отходов приведены, в частности, в обзорных статьях [66–71].

ШЧ в больших количествах образуется на перерабатывающих предприятиях. Избавление от ШЧ производится на специальных пневматических аппаратах, которые имеют эффективность 99.9% по сравнению с ручной очисткой [72]. Визуально ШЧ имеет белый или светло-бежевый цвет с характерным перламутровым блеском. Ее текстура напоминает тонкую бумагу или пергамент, которая легко ломается и крошится при механическом воздействии. После измельчения шелуха превращается в легкий, воздушный порошок, который может быть дополнительно обработан различными методами в зависимости от целевого применения. Одной из важных характеристик ШЧ является ее относительная химическая стабильность. Благодаря низкому содержанию влаги (2–4%) и наличию природных консервантов в виде серосодержащих соединений она может храниться до 36 месяцев при температуре 15–25 °С и относительной влажности не более 60% без значительного изменения своих антиоксидантных и функциональных свойств.

Определено, что в настоящее время только 5–7% этого сырья находит применение, остальные 93–95% отправляются на утилизацию без дальнейшего использования, что создает дополнительную нагрузку на полигоны промышленных отходов или сжигается. Хотя исследовано множество путей практического использования ШЧ, такие как, в частности, для получения технического углерода для применения в конденсаторах [73], для извлечения пектинов [74] и целлюлозы [75], для получения биоразлагаемой посуды [76] и др. [71, 77].

Содержание химических веществ в ШЧ зависит от многих вышеуказанных параметров и варьируется в широких пределах в зависимости от происхождения чеснока: 4.21–5.36% влаги, 15.18–16.53% минеральных веществ, 7.38–8.11% белка, 58.77–63.46% пищевых волокон, 20.56–21.64% углеводов, 0.52–0.78% жира [78]. В работе [79] сообщается, что содержание влаги в ШЧ составляет 19.2%, пищевых волокон – 62.1%,

углеводов – 8.5%, протеинов – 2.61%, жирных кислот – 0.22%, зольность – 7.37%. Также в ШЧ определено содержание минеральных элементов: Ca (20610 мг/кг), K (9081 мг/кг), S (1635 мг/кг), Mg (950 мг/кг), Al (826 мг/кг), P (721 мг/кг), Fe (682 мг/кг), Na (123 мг/кг), Mn (35.4 мг/кг), Cr (18.40 мг/кг), B (18.0 мг/кг), Zn (12.9 мг/кг), Cu (2.09 мг/кг), Mo (1.480 мг/кг) и Se (0.058 мг/кг) [79, 80]. Несколько иные результаты получены в работе [81]. Так, в этой работе определено содержание минеральных элементов в ШЧ, которое составило, мг/100 г сухой массы: Ca (6074), K (1786), Mg (542), Na (30.2), Fe (5.74), Zn (2.51), Cu (0.816) и Mn (0.382).

Методом хромато-масс-спектрометрии в экстрактах из наружной и внутренней ШЧ идентифицировано более 400 органических соединений, где основными из углеводов являются гексоза, маннитол и лактоза. ШЧ также богата пектином (27%), комбинированной рамнозой (11.42%) и галактозой (5.6%) [82].

Выявлено несколько незаменимых аминокислот, включая аргинин, лейцин, лизин, валин, глицин и таурин, триптофан, аллизин. Также были обнаружены заменимые аминокислоты: аспарагин, аланин и цитруллин. Были идентифицированы производные аминокислот, такие как пролин-бетаин, и небольшие пептиды, такие как L-пролил-L-пролин и глицилпролин, L-изолейцил-L-пролин, аспартил-пролин, N-ацетил-лейцин и цистеинилглицин, а также глутатион и его производные, включая S-(формилметил)глутатион и S-(гидроксиметил)глутатион [79].

Также идентифицированы некоторые органические кислоты, такие как фенольные: p-кумаровая, феруловая, аскорбиновая, яблочная, кофейная и дигидрокофейная, глутаровая, лимонная, хинная, глутаминовая, малоновая, азелаиновая и ферулоил-глюкозы. Из жирных кислот идентифицированы следующие кислоты: 2-децендиовая, пальмитиновая, пальмитолеиновая, стеариновая, лауриловая, олеиновая, миристиновая и миристолеиновая. Кроме того, выявлено несколько сероорганических соединений, включая аллиин и аллицин, дипропилдисульфид, аллилсульфид, диэтилсульфид, S-аллил-L-цистеин и гомоцистеинсульфиную кислоту [83].

В работе [84] белки, полученные из внешней и внутренней ШЧ, были подвергнуты протеомному анализу с использованием белков *Brachypodium distachyon* от UniProt в качестве эталона. Этот анализ выявил в общей сложности 67 белков во внешней и внутренней ШЧ. Определено, что 61 белок был извлечен из внешней кожуры и 43 – из внутренней. Категоризация по биологическому процессу показала, что среди 55 белков, идентифицированных в этой категории, девять были связаны с реакцией на стимул, включая хитиназы, пероксидазы и белки теплового шока. Категоризация по классу белков выявила восемь белков, связанных с ферментами, модифицирующими белки, все из которых были членами сериновых и цистеиновых уникальных для внешней и внутренней шелухи, соответственно.

Наличие широкой гаммы БАВ в ШЧ способствует приданию последней различных терапевтических свойств. Отмечается, что порошок ШЧ обладает антиоксидантным [54, 85–87], антидиабетическим, антикарциногенным, антимикробным и противовирусным, кардиопротекторным, противовоспалительным и другими свойствами [71, 80]. Выявлено, что ШЧ в качестве ингредиента кормов положительно воздействует на экосистему рубца, антиоксидантный статус, иммунный ответ, паразитарную инфекцию, показатели роста и качество продукции жвачных животных [88, 89] и птиц [90].

Использование шелухи чеснока и экстрактов из нее в рецептуре различных продуктов питания

Наличие огромного количества БАВ в составе ШЧ делает последнюю ценным компонентом, обладающим нутрицевтическими и функциональными свойствами, для изготовления различных продуктов питания [91]. Наиболее потребляемыми продуктами в мире являются хлеб и хлебобулочные изделия. Для улучшения функциональных характеристик хлеба в рецептуру включают различные добавки, включая и отходы сельскохозяйственного производства [92–95].

Однако как показал обзор мировой литературы, публикаций по использованию ШЧ в рецептурах для изготовления хлеба практически отсутствуют. В работе [96] исследовались качественные характеристики и функциональность при добавлении 2–8% порошка ШЧ в формовый хлеб. Выявлено, что значения pH и содержание влаги снижались по мере увеличения количества добавленного чесночного порошка. Что касается цвета, то по мере увеличения количества порошка ШЧ значения L, a и b, характеризующие насыщенность цвета и оттенок корки хлеба, уменьшались, показывая тенденцию к потемнению. Твердость увеличивалась по мере увеличения количества добавленного чесночного порошка, а эластичность, связность и вязкость уменьшались. Способность 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH) и 2,2'-азино-бис-3-этилбензтиазолин-6-сульфоновой кислоты (ABTS) поглощать свободные радикалы и общее содержание полифенолов

значительно увеличивалась по мере увеличения дозы порошка ШЧ в хлебе. В сенсорном тесте цвет, вкус, аромат и общее предпочтение были самыми высокими в изделии с 2% порошка ШЧ. Также выявлено отсутствие существенной разницы между контрольной группой и изделием, в состав которого входило 4% ШЧ. Определено, что добавление порошка ШЧ позволяет получать хлебобулочные изделия, обладающие высокими антиоксидантными свойствами и различными физиологически активными веществами [96].

В работе [97] исследовали приправу с использованием измельченной до 300 мкм смеси из ШЧ и лука (3 : 2), высушенной в течение 24 ч при 50 °С. Полученный продукт сравнивали с тремя коммерческими приправами. Анализ приправы на основе ШЧ и лука показал значительно более низкие значения натрия (60 мг/100 г) и NaCl (4.7%) по сравнению с тремя коммерческими приправами, которые показали значения натрия (137 мг/100 г; 69 мг/100 г и 237 мг/100 мг соответственно) и NaCl (54.8, 33 и 70% соответственно). Напротив, значения содержания белков, фенольных соединений и антиоксидантной активности показали значительно более высокие показатели по сравнению с коммерческими приправами [97].

Гораздо чаще в продуктах питания исследовался в качестве ингредиента экстракт из порошка ШЧ. Экстракты из ШЧ получают обработкой последнего водой, водно-спиртовыми растворами и сверхкритической экстракцией с использованием в качестве экстрагентов CO₂ и др. Как показали многочисленные исследования, экстракты из ШЧ имеют в своем составе большое количество химических веществ, выявленных в самой шелухе. Так, в частности, оценивалось содержание БАВ в экстрактах из ШЧ, полученных методами мацерации и турбулизации и водные или водно-спиртовые растворы (50 и 70%) в качестве растворителя. Определено, что содержание танинов, в зависимости от метода экстрагирования, составило 434–1689 мг ТАЕ/г, флавоноидов – 0.3768–0.9063 мг/100 см³, фенольных соединений – 3910–14657 мг GAE/100г, антоцианинов – 0.1358–1.3204 мг/100 см³ [98].

В работе [99] оценено влияние двух предварительных обработок по отношению к ШЧ, таких как ферментация с использованием *Lactobacillus plantarum* и термическая обработка (обжарка в течение 10 мин) и двух экстракционных растворителей (70% растворы этанола и метанола в воде) на общее содержание фенолов (TPC), общее содержание флавоноидов (TFC), антиоксидантную способность (AC) и антимикробную активность (AA). Результаты показали, что экстракт из нативной ШЧ содержал значительные количества фенольных соединений (50.41 мг GAE/г) и флавоноидов (47.58 мг GAE/г), но был дополнительно улучшен как биологической, так и термической обработкой. Этанольный экстракт из ферментированной в течение 48 ч ШЧ показал самые высокие значения содержания фенолов (140.65 мг GAE/г) и флавоноидов (68.8 мг QE/г). Экстракты показали высокую активность против штаммов, вызывающих порчу пищевых продуктов (*Escherichiacoli*, *Salmonellatyphimurium*, *Staphylococcusaureus* и *Listeriainnocua*, *Bacilluscereus*) [99, 100].

Данное обстоятельство подтверждено исследованиями в реальных пищевых продуктах. В частности, этанольный экстракт из ШЧ в различных концентрациях (2.7 мг/см³, 5.4 мг/см³ и 10.8 мг/см³) добавлялся в говяжий фарш. Последний проходил обработку в СВЧ-печи, инокулировался бактериями (*Staphylococcusaureus*, *Escherichiacoli*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* и *Proteus vulgaris*) и хранился при температуре 4 °С в течение 9 дней. В дальнейшем было оценено влияние сырого экстракта из ШЧ на перекисное окисление липидов и рост микроорганизмов. Кроме того, сырой экстракт из ШЧ продемонстрировал антиоксидантную активность, которая снизила содержание тиобарбитуровой кислоты с 11.23 мг малональдегида/кг мышц в контрольном образце мяса до 2.62 мг малональдегида/кг мышц в образце, обработанном 10.8 мг экстракта на 9-й день эксперимента. Антибактериальная активность экстракта в отношении испытуемых бактерий, инокулированных в вареную говядину, показала, что при концентрации 10.8 мг экстракта/100 г мяса экстракт снижал популяцию бактерий *Staphylococcusaureus*, *Escherichiacoli* и *Proteus vulgaris* в 10 раз по сравнению с контролем при 9 днях хранения [101].

Исследовано влияние экстракта ШЧ, полученного обработкой последнего в 80% этаноле в воде при соотношении 1 : 10 соответственно, в течение 24 ч в количестве 2 и 4% на качество бургеров из анчоуса во время холодного хранения. Выявлено, что экстракт способствовал предотвращению окисления липидов по сравнению с контролем. Определено, что показатели перекисного числа, содержания тиобарбитуровой кислоты и pH бургеров с введенными экстрактами показали более низкие значения в сравнении с таковыми в контрольном изделии. Сенсорные результаты показали, что использование 2 и 4% экстракта ШЧ продлило срок хранения бургеров из анчоуса на 3 дня [102].

Высокая антибактериальная активность, высокие терапевтические эффекты, содержание большого количества БАВ, малое количество публикаций в области использования ШЧ и ее экстрактов делают данное направление весьма перспективной областью исследований.

Использование шелухи чеснока в качестве сорбционного материала для извлечения загрязняющих веществ из водных сред

Другим направлением использования целлюлозосодержащих отходов от переработки сельскохозяйственного сырья является их применение в качестве сорбционных материалов для удаления различных загрязняющих веществ из водных сред [16–18, 103–113].

Одним из нетрадиционных направлений использования ШЧ является возможность ее применения в качестве сорбционных материалов для извлечения различных загрязняющих веществ из природных и сточных вод [114, 115]. Наличие большого количества БАВ, имеющих в своем составе различные функциональные группировки, предполагает хорошие сорбционные характеристики, в частности, по ионам металлов.

Удаление ионов металлов нативной и модифицированной шелухой чеснока

В мировой литературе выявлено несколько публикаций по использованию нативной и модифицированной ШЧ для удаления ионов металлов из водных сред. В приведенной ниже информации, для удобства освоения материала, ионы металлов расположены в алфавитном порядке.

В частности, исследована адсорбция ионов Cd^{2+} из модельных растворов с начальной концентрацией 5, 10 и 20 мг/г ШЧ. Выявлено, что при дозе сорбента ШЧ 1 г/дм³, времени контактирования 1 ч и температуре 288 °С максимальная сорбционная емкость составила 4.78, 9.43 и 19.64 мг/г при вышеназванных начальных концентрациях соответственно. Выявлено, что изотермы адсорбции наиболее точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели псевдовторого порядка [116].

Определено, что теоретическая максимальная сорбционная емкость нативной ШЧ составляет 74.63 мг/г. В работе [117] изучено биосорбционное поведение ионов Cd^{2+} на ШЧ в присутствии цитрата натрия с концентрацией последнего 0.01 моль/дм³. Результаты показывают, что присутствие цитрата натрия оказывает значительное ингибирующее действие на адсорбционное поведение ионов Cd^{2+} при оптимальном значении pH 4.0, что можно объяснить конкурентным сродством к ионам Cd^{2+} со стороны цитратного лиганда. Определено, что в присутствии цитрата натрия максимальная сорбционная емкость ШЧ по ионам Cd^{2+} снижается до 60.11 мг/г. Определено, что изотермы адсорбции Cd^{2+} на ШЧ в присутствии цитрата натрия соответствуют модели Ленгмюра ($R^2 = 0.998$), а кинетика процесса соответствует модели псевдовторого порядка ($R^2 = 0.999$). Вычисленные термодинамические величины ($E_a = 3.26$ кДж/моль, $\Delta G = 0.026$ – 0.543 кДж/моль при 288–318 К) свидетельствуют о протекании спонтанной физической адсорбции [117]. Указывается, что мерсеризация ШЧ увеличивает сорбционные характеристики по ионам Cd^{2+} [118].

Исследовано удаление ионов Cr(VI) из водных сред с использованием модифицированной раствором азотной кислоты ШЧ. Проведенные исследования показали лучшее соответствие изотерм модели Ленгмюра ($R^2 = 0.9956$). Максимальная сорбционная емкость составила 31.7 мг/г. Выявлено, что кинетика процесса хорошо согласуется с кинетической моделью псевдовторого порядка ($R^2 = 0.9918$). Термодинамические исследования показали, что стадия удерживания была эндотермической и самопроизвольной по своей природе ($\Delta H^\circ = 118.292$ Дж/моль, $\Delta G^\circ = -117.41$ кДж/моль, $\Delta S^\circ = 394.39$ Дж/моль·К). Положительное значение энтропии показало, что процесс биосорбции проходил с высокой степенью случайности на поверхности модифицированного сорбционного материала [119].

Изучалось удаление ионов Cu^{2+} из водного раствора ШЧ в зависимости от различных параметров, таких как значения pH и температуры среды, начальной концентрации иона металла и температуры. Выявлено, что точка нулевого заряда для ШЧ находилась в диапазоне от 4.55 до 4.75. Определено, что изотермы адсорбции одинаково аппроксимировались моделям Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радushkevicha ($R^2 = 0.983$), а кинетика процесса соответствовала модели псевдовторого порядка. Адсорбционная емкость ШЧ составила 66.7 мг/г при pH = 5.3 и T = 303 К. Термодинамические параметры ($E_a = 7.5$ кДж/моль (303 К), $\Delta G^\circ = -117.41$ кДж/моль, $\Delta H^\circ = 11.8$ кДж/моль и $\Delta S^\circ = 95.0$ Дж/моль·К) показали, что адсорбция ионов Cu^{2+} на ШЧ была спонтанной и эндотермической [120].

Также ШЧ, обработанная 2 N раствором HCl, исследовалась для извлечения ионов Mn(VII) из модельных растворов. Определено, что при начальной концентрации ионов Mn(VII) 20–100 ppm, pH = 5–6, дозировке сорбента 1–5 г/дм³ и времени взаимодействия 3 ч степень извлечения сорбата составляла 100% [121].

Нативная и мерсеризированная ШЧ использовалась для удаления ионов Pb²⁺ из модельных растворов. Найдено, что при pH = 3–7, начальной концентрации ионов свинца 10 мг/дм³; времени контактирования 15 мин, дозировке сорбционных материалов 10 г максимальная сорбционная емкость нативной ШЧ составила 51.73 мг/г, модифицированной – 109.05 мг/г [122].

Исследована адсорбция для извлечения ионов тербия в сверхнизких концентрациях из промышленных сточных вод. Обнаружено, что ионы Tb³⁺ в концентрации 5.34 нг/см³ могут быть адсорбированы на ШЧ, модифицированной кальцием в течение 10 мин с эффективностью адсорбции 99.2% при pH = 3.5. Выявлено, что изотермы адсорбции ионов Tb³⁺ описываются моделью Ленгмюра; кинетика процесса соответствует модели псевдоторгового порядка. Для более глубокого изучения механизма адсорбции, помимо ИК-Фурье-спектроскопии с ослабленным полным внутренним отражением и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, было проведено квантово-химическое моделирование на основе теории функционала плотности с использованием программного обеспечения Gaussian 16. Полученные результаты моделирования показали, что ионы Tb³⁺ могут обмениваться ионами с катионами в модификате ШЧ, такими как Ca²⁺ и –C(O)OH [123].

ШЧ модифицировалась ионами Fe³⁺, Ti⁴⁺ и Ce³⁺ с использованием процесса катионного обмена и применялась для адсорбции ионов W⁶⁺. Выявлено, что оптимальным значением для всех трех модификатов является интервал pH = 1–4. При pH = 2.5 максимальная адсорбционная емкость модифицированных образцов шелухи составили 91.5, 83 и 84 мг/г ионов W⁶⁺ соответственно. Сосуществующие анионы, такие как хлорид-ион, сульфат-ион и карбонат-ион, показали незначительное влияние на адсорбцию ионов вольфрама, в то время как фторид-ион и фосфат-ион резко ингибировали адсорбцию. Раствор NaOH с концентрацией 0.1 М эффективно элюировал адсорбированный вольфрам, а концентрация элюированного раствора превышала исходную концентрацию вольфрамата почти в 6, 19.9 и 22 раза соответственно [124].

Приведенные выше сведения по сорбционной емкости ШЧ имеют несопоставимые показатели, так как были проведены в различных условиях. В этой связи вызывает интерес сведения по сорбционным характеристикам по ионам металлов, проведенных в одинаковых условиях.

Так, нативная ШЧ исследовалась для удаления ионов Pb²⁺, Cu²⁺ и Ni²⁺. Проводились серийные эксперименты по исследованию влияния pH, температуры, времени и начальной концентрации ионов металлов на адсорбцию одного иона тяжелого металла ШЧ. Также была исследована конкурентная адсорбция бинарной смеси (ионы Pb²⁺/Cu²⁺ и Pb²⁺/Ni²⁺) исследуемым сорбционным материалом. Выявлено, что с увеличением значений pH эффективность поглощения исследуемых ионов увеличивается, достигая максимума при pH = 5.5. С увеличением температуры с 30 до 60 °C эффективность поглощения ионов Cu²⁺ и Ni²⁺ уменьшалась, по ионам Pb²⁺ – практически не изменялась. Результаты экспериментов показали, что процесс адсорбции достигает равновесия в течение 20 мин, а кинетика процесса соответствует модели псевдоторгового порядка. Выявлено, что ШЧ имела значительно более высокое значение максимальной сорбционной емкости по ионам Pb²⁺ (209 мг/г), чем по ионам Cu²⁺ (37 мг/г) и Ni²⁺ (32 мг/г). Выявлено, что эффективность адсорбции и поглощающая способность одного иона металла снижались в присутствии другого иона металла [125].

Исследовано применение ШЧ для извлечения ионов Cd²⁺, Ni²⁺, Pb²⁺ и Zn²⁺ из водных растворов в динамических условиях. Эксперименты проводились в колонке с неподвижным слоем сорбционного материала и было изучено влияние различных скоростей потока (от 2.0 до 3.3 см³/мин) на проскок. Значения максимальной емкости по ионам Pb²⁺ составили 490.68 мг/г, Cd²⁺ – 472.78 мг/г, Ni²⁺ – 135.17 мг/г, Zn²⁺ – 55.08 мг/г. Показана возможность регенерации отработанной ШЧ 0.5 M раствором HNO₃ и повторного использования до четырех раз в последовательных циклах сорбции-десорбции [126].

ШЧ использовалась для адсорбции ионов As(III), Cd²⁺, Fe²⁺, Hg²⁺, Pb²⁺ и Sn²⁺ из многокомпонентных систем при различных соотношениях адсорбент/ион металла. Для оптимизации условий изучалось влияние pH, времени контакта, температуры и концентрации сорбента и сорбата. Эксперименты проводились при температуре 50 °C. Обнаружено, что максимальное удаление ионов металлов достигается при pH = 5, а время установления сорбционного равновесия составило 30 мин. Изотермы адсорбции хорошо согласуются с моделью Ленгмюра; кинетические параметры были рассчитаны с использованием модели псевдоторгового

порядка. Установлено, что значения максимальной сорбционной емкости по названным ионам металлов возможно расположить в следующий ряд: Pb^{2+} (10.5 мг/г) $> Fe^{2+}$ (8.46 мг/г) $> Sn^{2+}$ (7.13 мг/г) $> Hg^{2+}$ (5.12 мг/г) $> As(III)$ (2.30 мг/г) $> Cd^{2+}$ (1.47 мг/г) [127].

Кроме катионов металлов и металлоидов, отходы от переработки чеснока исследовались в качестве сорбционных материалов для удаления и анионов из водных сред. Так, в частности, исследовано удаление фосфат-ионов ШЧ из раствора кислотного выщелачивания непосредственно в кислых условиях при $pH = 1-2$. Результаты показали, что оптимальным pH для адсорбции фосфат-ионов было значение $pH = 1.5$, адсорбционное равновесие достигалось через 240 мин, а максимальная адсорбционная емкость для фосфат-ионов составляла 1.40 ммоль/г и 0.81 ммоль/г при равновесном $pH = 1.5$ и $pH = 6.5$ соответственно. Раствор NaOH был эффективен для элюирования адсорбированных фосфат-ионов, и элюированный раствор содержал в основном Na_3PO_4 и NaOH. Выявлена возможность сохранения 85% от исходной адсорбционной емкости после пяти циклов адсорбции и десорбции [128].

ШЧ модифицировалась путем введения циркония (IV), демонстрирующего довольно хорошие свойства поглощения фторид-анионов. Выявлено, что изотермы адсорбции соответствуют модели Ленгмюра, а максимальная адсорбционная емкость при равновесном $pH = 2$ и $pH = 6$ составляли 1.10 и 0.89 моль/кг. Оценка влияния анионов показала, что нитрат-ионы и сульфат-ионы не оказывают отрицательного влияния на адсорбцию фторид-ионов, тогда как фосфат-ионы влияют незначительно. Кинетика адсорбции фторид-ионов модифицированной ШЧ хорошо описывается моделью псевдвторого порядка [129]. Исследована эффективность удаления фторид-ионов из артезианской воды в динамических условиях ШЧ, обработанной ионами Zr(IV). Выявлено, что 1 кг модифицированной шелухи способствует получению 2.4 м³ обесфторенной воды. Показана возможность регенерации с использованием 1 М раствора NaOH. Три цикла сорбции-десорбции показали небольшое ухудшение адсорбционной способности. Рассчитанная стоимость 1 кг адсорбента не превышает 0.50 долл. США [130].

Удаление красителей и других органических соединений шелухой чеснока

Проведены исследования по извлечению красителей из водных растворов отходами от переработки чеснока. Так, оценивался потенциал ШЧ для удаления красителя «Methylene blue» из водных растворов в статических условиях. Исследовалось влияние параметров процесса – времени контакта, начальной концентрации (25–200 мг/дм³), pH (4–12) и температуры (303, 313 и 323 К) на сорбционные характеристики. Определено, что изотермы адсорбции хорошо согласуются с моделью Фрейндлиха. Максимальные адсорбционные емкости моно слоя составили 82.64, 123.45 и 142.86 мг/г при 303, 313 и 323 К соответственно. Кинетические параметры процесса одинаково описывались моделями псевдопервого и псевдвторого порядков [131].

ШЧ модифицировали окислением H_2O_2 , смесью $HNO_3/C_6H_8O_7$ и щелочным омылением NaOH. Нативная и модифицированная ШЧ оценивались в качестве сорбционного материала для удаления красителя «Rhodamine B». Результаты показали, что кислотное окисление может привести к увеличению удельной площади поверхности и возникновению кислородсодержащих групп на поверхности сорбционного материала. При исходной концентрации родамина В 15 мг/дм³, модифицированная ШЧ имеет в 3.5 раза большую сорбционную емкость по красителю в сравнении с нативной. Определено, что кинетика процесса подчиняется модели псевдвторого порядка ($R^2 = 0.9999$), а изотермы адсорбции при различных температурах наиболее точно описываются моделью Темкина. Показано, что адсорбция красителя зависела от значений pH , и 95.8% адсорбированного красителя могло быть элюировано 0.1 М раствором NaOH [132].

Исследовалась эффективность и производительность адсорбента на основе ШЧ для удаления красителя марки «Direct Red 12B» из модельных сточных вод. Определено, что кинетическая модель псевдвторого порядка лучше соответствует условиям с хорошим коэффициентом корреляции, а изотермы адсорбции хорошо согласуются с моделью Ленгмюра. Эффективность удаления красителя более 99 % была достигнута в течение 25 мин при дозе адсорбента 4 г/дм³ и начальной концентрации красителя 50 мг/дм³. Максимальная сорбционная емкость ШЧ по красителю, вычисленная из уравнения модели Ленгмюра, составила 38 мг/г. Рассчитанные термодинамические параметры ($\Delta G = -95.39, -111.2, -130.16$ и -160.91 кДж/моль при 298, 308, 318 и 328 К соответственно, $\Delta H = 54.45$ кДж/моль, $\Delta S = 213.621$ Дж/моль·К) протекающего процесса адсорбции указывают на эндотермический характер процесса [133].

Также оценивалась способность ШЧ поглощать краситель марки «Congo red» из водных растворов. Определено, что изотермы адсорбции хорошо согласуются с моделью Ленгмюра ($R^2 = 0.9746$), а кинетика

процесса соответствует модели псевдвторого порядка ($R^2 = 0.9991$). Максимальная адсорбционная емкость по красителю составила 15.22 мг/г при $pH = 5$. При начальной концентрации красителя 25 мг/дм³, дозировке ШЧ 0.7 г/дм³, времени контактирования 15 мин эффективность удаления красителя составляет более 88% [134].

Изучено влияние различных условий адсорбции на эффективность удаления красителя Congored ШЧ, обработанной Na₂CO₃. Выявлено, что оптимальными условиями для эффективной адсорбции красителя с помощью модификата ШЧ являются: $pH = 7$, продолжительность равновесного контакта – 90 мин, начальная концентрация Congored – 50 мг/дм³, дозировка адсорбента – 0.10 г/см³ и температура 298 К. Определено, что максимальная сорбционная емкость модифицированной шелухи составила 52.6 мг/г. Исследования кинетики адсорбции предполагают протекание хемосорбции, процесс следует модели псевдвторого порядка, а термодинамика адсорбции указывает на то, что процесс является спонтанным [135].

Изучали адсорбцию красителя марки «Eriochrome Black T» на нативной и промытой водой ШЧ. Изучено влияние нескольких параметров, влияющих на процесс адсорбции, таких как pH , температура, время контакта, доза адсорбента и начальная концентрация красителя. Выявлено, что модель Ленгмюра и модель кинетики псевдвторого порядка прекрасно объяснили данные о равновесии. Термодинамические параметры нативной и промытой шелухи показали, что адсорбция красителя была благоприятным, спонтанным и физическим процессом. Максимальная эффективность удаления красителя нативной (96%) и промытой (82%) шелухой наблюдалось при $pH = 2$. Аналогично, максимальная адсорбционная емкость составила 99.5 и 89.4 мг/г соответственно. Снижение сорбционных характеристик шелухи после промывки объясняются снижением площади поверхности с 14.0 до 13.02 м²/г [136].

ШЧ исследовалась в качестве адсорбента для очистки сточных вод, содержащих катионный краситель марки «Crystal violet» в динамических условиях. Шелуху обрабатывали NaOH в соотношении 1 : 1.5 для модификации поверхности и увеличения ее пористости. Установлено, что оптимальная эффективность удаления красителя достигалась при скорости потока 3 см³/мин, высоте сорбционного слоя 3 см и начальной концентрации 100 мг/дм³. Вычисленная максимальная сорбционная емкость составила 99.9 мг/г по отношению к красителю. Кинетика процесса хорошо согласуется с моделями Томаса и Юн-Нельсона. Показана возможность регенерации модифицированной ШЧ 0.01 М раствором HCl [136].

Проводились исследования по удалению красителей марок «Crystal violet», «Basic fuchsin» и «Solochrome black-T», а также индикаторов «Murexide» и «Patton and Reeder's indicator» при начальных концентрациях в растворе 20–100 ppm нативной ШЧ. Определено, что pH не оказывает никакого влияния на сорбционные характеристики по окрашенным поллютантам. Выявлено, что при дозировке шелухи 20 г/дм³ при всех начальных концентрациях красителей и индикаторов, эффективность удаления всех составила 100%. Также установлено, что увеличение температуры растворов с комнатной до 75 °C не оказывало влияния на эффективность сорбции [121].

Несколько публикаций посвящены исследованию адсорбции фенола нативной ШЧ в статических [137] и динамических [138] условиях. При проведении экспериментов в статических условиях определены условия, при которых достигается наибольшая эффективность удаления фенола (80%) с начальной концентрацией 50 мг/дм³: $pH = 2$, дозировка адсорбента – 2.1 г/дм³, время контакта – 7 ч и скорость перемешивания – 135 об./мин. Выявлено, что процесс сорбции является спонтанным и экзотермическим. Кинетика адсорбции описывается кинетической модели псевдвторого порядка [137]. При проведении экспериментов в динамических условиях выбраны три значения высоты слоя сорбента, загруженного в колонку (5, 10 и 15 см), его массы 3.220 г, 6.410 г и 9.234 г (для соответствующей высоты слоя) при различной скорости потока (15–25 м³/мин) и начальных концентраций фенола (50 до 150 мг/дм³). Найдено, что в момент проскока количество адсорбированного фенола при начальной концентрации 50 мг/дм³ при объемных скоростях потока 15, 20 и 25 см³/мин составило 120, 90 и 50 мг. Определено, что кинетика процесса более точно описывается моделью Юна-Нельсона ($R^2 = 0.9886$) при всех переменных параметрах процесса. Показано, что низкие скорости потока будут поддерживать производительность в течение более длительного времени в пределах уровней проскока с более высокой удельной скоростью адсорбции, повышая эффективность использования ШЧ [138].

ШЧ также хорошо зарекомендовала в качестве сорбционного материала для удаления хинолоновых антибиотиков из водных сред. Так, в работе [139] ШЧ модифицировалась обработкой раствором HNO₃. Сравнение сорбционных характеристик нативной и модифицированной шелухи показало, что увеличение суммарной поверхности модификата привело к значительному улучшению адсорбционной емкости

(~ в 10 раз). Результаты показали, что модифицированная ШЧ обладает более высоким сродством к хинолонам, чем нативный образец. Степень удаления антибиотиков составила от 86.3 до 95.1% [139].

ШЧ, насыщенная тербием, европием и тербием/европием (Тб-ЧШ, Еу-ЧШ и Тб/Еу-ЧШ), исследована в качестве сорбционных материалов для извлечения энрофлоксацина из водных растворов. Обнаружено, что адсорбционная способность Тб/Еу-ЧШ (769 мг/г) по отношению к энрофлоксацину была значительно выше по сравнению с нативной шелухой (29.8 мг/г) и превосходила Тб-ЧШ (580 мг/г) и Еу-ЧШ (421 мг/г). Кроме того, было обнаружено, что Тб/Еу-ЧШ обладает высокой эффективностью при значениях pH от 6.0–8.0. Определено, что сверхчистая вода, содержащая 5% аммиака, могла элюировать $98.1 \pm 1.5\%$ абсорбированного энрофлоксацина из Тб/Еу-ЧШ [140].

Таким образом, в статье обобщены литературные данные по использованию измельченной ШЧ (*Allium sativum* L.) в качестве ингредиента в продуктах питания и в качестве сорбционных материалов для удаления ионов различных металлов, таких как As(III), Cd²⁺, Cr(VI), Cu²⁺, Fe²⁺, Hg²⁺, Mn(VII), Ni²⁺, Pb²⁺, Sn²⁺ и W(VI), красителей и антибиотиков из водных сред. В статье представлена краткая информация о количестве отходов, образующихся при переработке чеснока, их химическом составе и способах повторного использования. Показано, что добавление порошка ШЧ и экстрактов из нее способствует увеличению функциональных характеристик различных продуктов питания. Приведены параметры адсорбционных процессов и значения сорбционных параметров для удаления исследованных загрязняющих веществ. Показано, что сорбционные характеристики ШЧ по отношению к различным загрязняющим веществам могут быть улучшены путем химической модификации различными химическими реагентами. Определено, что модель Ленгмюра, в большинстве случаев, точнее описывает изотермы адсорбции загрязняющих веществ, а кинетика процесса чаще всего и точнее соответствует модели псевдоторгового порядка.

Финансирование

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 предоставите соответствующие ссылки на автора(ов), источник и Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. O'Sullivan J.N. Demographic delusions: world population growth is exceeding most projections and jeopardizing scenarios for sustainable futures // World. 2023. Vol. 4. Pp. 545–568. <https://doi.org/10.3390/world4030034>.
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. Khorairi A.N.S.A., Sofian-Seng N.S., Othaman R., Rahman H.A., Razali N.S.M., Lim S.J., Mustapha W.A.W. A review on agro-industrial waste as cellulose and nanocellulose source and their potentials in food applications // Food Reviews International. 2023. Vol. 39, no. 2. Pp. 663–688. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1926478>.
4. Meraj A., Singh S.P., Jawaid M., Nasef M.M., Alomar T.S., AlMasoud N. 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. Khanpit V.V., Tajane S.P., Mandavgane S.A. Dietary fibers from fruit and vegetable waste: Methods of extraction and processes of value addition // Biomass Conversion and Biorefinery. 2025. Vol. 15, no. 2. Pp. 1667–1686. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01980-2>.
6. Mir-Cerdà A., Nunez O., Granados M., Sentellas S., Saurina J. An overview of the extraction and characterization of bioactive phenolic compounds from agri-food waste within the framework of circular bioeconomy // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2023. Vol. 161. Article 116994. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116994>.
7. Kultys E., Kurek M.A. Green extraction of carotenoids from fruit and vegetable byproducts: a review // Molecules. 2022. Vol. 27. Article 518. <https://doi.org/10.3390/molecules27020518>.

8. García-González A.G., Rivas-García P., Escamilla-Alvarado C., Ramírez-Cabrera M.A., Paniagua-Vega D., Galván-Arzola U., Cano-Gómez J.J., Escárcega-González C.E. Fruit and vegetable waste as a raw material for obtaining functional antioxidants and their applications: A review of a sustainable strategy // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2025. Vol. 19, no. 1. Pp. 231–249. <https://doi.org/10.1002/bbb.2698>.
9. Sánchez M., Laca A., Laca A., Díaz M. Value-added products from fruit and vegetable wastes: a review // *CLEAN–Soil, Air, Water*. 2021. Vol. 49, no. 8. Article 2000376. <https://doi.org/10.1002/clen.202000376>.
10. Sharma M., Usmani Z., Gupta V.K., Bhat R. Valorization of fruits and vegetable wastes and by-products to produce natural pigments // *Critical Reviews in Biotechnology*. 2021. Vol. 41, no. 4. Pp. 535–563. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1873240>.
11. Grover S., Aggarwal P., Kumar A., Kaur S., Yadav R., Babbar N. Utilizing citrus peel waste: A review of essential oil extraction, characterization, and food-industry potential // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 15. Pp. 5043–5064. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05382-y>.
12. Rodriguez Garcia S.L., Raghavan V. Green extraction techniques from fruit and vegetable waste to obtain bioactive compounds – A review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022. Vol. 62, no. 23. Pp. 6446–6466. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1901651>.
13. Phiri R., Rangappa S.M., Siengchin S., Oladijo O.P., Dhakal H.N. Development of sustainable biopolymer-based composites for lightweight applications from agricultural waste biomass: A review // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2023. Vol. 6, no. 4. Pp. 436–450. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.04.004>.
14. Sangmesh B., Patil N., Jaiswal K.K., Gowrishankar T.P., Selvakumar K.K., Jyothi M.S., Jyothilakshmi R., Kumar S. Development of sustainable alternative materials for the construction of green buildings using agricultural residues: A review // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 368. Article 130457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130457>.
15. 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>.
16. Шайхиев И.Г. Использование растительных сельскохозяйственных отходов для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Ч. I // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. №3. С. 15–25.
17. Шайхиев И.Г. Использование растительных сельскохозяйственных отходов для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Ч. II // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. №4. С. 30–40.
18. 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>.
19. 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>.
20. Kapanoglu E., Nemli E., Tomas-Barberan F. New approaches to agricultural waste valorization and their applications // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022. Vol. 70, no. 23. Pp. 6787–6804. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07104>.
21. Федоров А.В., Шабунина М.В., Баракова Н.В. Использование вторичных ресурсов в хлебопечении – как способ достижения целей устойчивого развития // Труды ВНИИЖ. 2021. №1-2. С. 18–14. <https://doi.org/10.25812/VNIIG.2021.95.48.014>.
22. Mohamed K., Khalil E., Arafa S. Utilization of food industry by-products in producing high added value foods: a review // *Food Technology Research Journal*. 2023. Vol. 2, no. 1. Pp. 1–11. <https://doi.org/10.21608/ftmj.2023.309989>.
23. Wadhwa M., Bakshi M.P.S., Makkar H.P.S. Wastes to worth: value added products from fruit and vegetable wastes // *CABI Reviews*. 2015. Vol. 10. Pp. 1–25. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201510043>.
24. Елисеева Т., Ямпольский А. Чеснок (лат. *Allium sativum*) // Журнал здорового питания и диетологии. 2019. Т. 1, №7. С. 11–22.
25. Adelpour T., Mojtavavi S., Mahmoudabadi-Arani Z., Bozorgi-Koshalshahi M., Faramarzi M.A. Green valorization of garlic peel waste using halophilic laccase for efficient biomass delignification and biorefinery applications // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, no 1. Pp. 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99715-0>.
26. Okoro B.C., Dokunmu T.M., Okafor E., Sokoya I.A., Israel E.N., Olusegun D.O., Bella-Omunagbe M., Ebubechi U.M., Ugbo E.A., Iweala E.E.J. The ethnobotanical, bioactive compounds, pharmacological activities and toxicological evaluation of garlic (*Allium sativum*): A review // *Pharmacological Research-Modern Chinese Medicine*. 2023. Vol. 8. Article 100273. <https://doi.org/10.1016/j.prmcm.2023.100273>.
27. Verma T., Aggarwal A., Dey P., Chauhan A.K., Rashid S., Chen K.T., Sharma R. Medicinal and therapeutic properties of garlic, garlic essential oil, and garlic-based snack food: An updated review // *Frontiers in Nutrition*. 2023. Vol. 10. Article 1120377. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1120377>.
28. Berginc K., Milisav I., Kristl A. Garlic flavonoids and organosulfur compounds: impact on the hepatic pharmacokinetics of saquinavir and darunavir // *Drug Metabolism and Pharmacokinetics*. 2010. Vol. 25, no. 6. Pp. 521–530.
29. Skoczylas J., Jędraszczak E., Dziadek K., Dacewicz E., Kopeć A. Basic chemical composition, antioxidant activity and selected polyphenolic compounds profile in garlic leaves and bulbs collected at various stages of development // *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 18. Article 6653. <https://doi.org/10.3390/molecules28186653>.
30. Subroto E., Cahyana Y., Tensiska, Mahani, Filianty F., Lembong E., Wulandari E., Kurniati D., Saputra R.A., Faturachman F. Bioactive compounds in garlic (*Allium sativum* L.) as a source of antioxidants and its potential to

- improve the immune system: a review // Food Research. 2021. Vol. 5, no. 6. Pp. 1–11. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(6\).042](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(6).042).
31. Khubber S., Hashemifesharaki R., Mohammadi M., Gharibzahedi S.M.T. Garlic (*Allium sativum* L.): a potential unique therapeutic food rich in organosulfur and flavonoid compounds to fight with COVID-19 // Nutrition Journal. 2020. Vol. 19. Pp. 1–3. <https://doi.org/10.1186/s12937-020-00643-8>.
 32. Lawson L.D. Garlic: a review of its medicinal effects and indicated active compounds // Blood. 1998. Vol. 179. Pp. 176–209.
 33. Lanzotti V. The analysis of onion and garlic // Journal of Chromatography A. 2006. Vol. 1112, no. 1-2. Pp. 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.12.016>.
 34. Afzaal M., Saeed F., Rasheed R., Hussain M., Aamir M., Hussain S., Mohamed A.A., Alamri M.S., Anjum F.M. Nutritional, biological, and therapeutic properties of black garlic: A critical review // International Journal of Food Properties. 2021. Vol. 24, no. 1. Pp. 1387–1402. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1967386>.
 35. Chanda S., Kushwaha S., Tiwari R.K. Garlic as food, spice and medicine: a perspective // Journal of Pharmacy Research. 2011. Vol. 4, no. 6. Pp. 1857–1860.
 36. Koca I., Tasci B. Garlic as a functional food // VII International Symposium on Edible Alliaceae. 2015. Vol. 1143. Pp. 139–146. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1143.20>.
 37. Amarakoon S., Jayasekara D. A review on garlic (*Allium sativum* L.) as a functional food // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2017. Vol. 6, no. 6. Pp. 1777–1780.
 38. Eren E., Yılmaz N., Kalayci M.Z. Functional foods: garlic // Anadolu Tıbbi Dergisi. 2024. Vol. 2, no. 1. Pp. 15–21. <https://doi.org/10.5505/anadolud.2023.33042>.
 39. Sunanta P., Kontogiorgos V., Pankasemsuk T., Jantanasakulwong K., Rachtanapun P., Seesuriyachan P., Sommano S.R. The nutritional value, bioactive availability and functional properties of garlic and its related products during processing // Frontiers in Nutrition. 2023. Vol. 10. Article 1142784. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1142784>.
 40. Bayan L., Koulivand P.H., Gorji A. Garlic: a review of potential therapeutic effects // Avicenna Journal of Phytomedicine. 2014. Vol. 4, no. 1. Pp. 1–14.
 41. El-Saadony M.T., Saad A.M., Korma S.A., Salem H.M., Abd El-Mageed T.A., Alkafaas S.S., Elsalahaty M.I., Elkafas S.S., Mosa W.F.A., Ahmed A.E., Mathew B.T., Albastaki N.A., Alkuwaiti A.A., El-Tarabily M.K., AbuQamar S.F., El-Tarabily K.A., Ibrahim S.A. Garlic bioactive substances and their therapeutic applications for improving human health: A comprehensive review // Frontiers in Immunology. 2024. Vol. 15. Article 1277074. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1277074>.
 42. Rana S.V., Pal R., Vaiphei K., Sharma S.K., Ola R.P. Garlic in health and disease // Nutrition Research Reviews. 2011. Vol. 24, no. 1. Pp. 60–71. <https://doi.org/10.1017/S0954422410000338>.
 43. Rouf R., Uddin S.J., Sarker D.K., Islam M.T., Ali E.S., Shilpi J.A., Nahar L., Tiralonge E., Sarker S.D. Antiviral potential of garlic (*Allium sativum*) and its organosulfur compounds: A systematic update of pre-clinical and clinical data // Trends in Food Science & Technology. 2020. Vol. 104. Pp. 219–234. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.006>.
 44. Harris J.C., Cottrell S.L., Plummer S., Lloyd D. Antimicrobial properties of *Allium sativum* (garlic) // Applied Microbiology and Biotechnology. 2001. Vol. 57. Pp. 282–286. <https://doi.org/10.1007/s002530100722>.
 45. Bhatwalkar S.B., Mondal R., Krishna S.B.N., Adam J.K., Govender P., Anupam R. Antibacterial properties of organosulfur compounds of garlic (*Allium sativum*) // Frontiers in Microbiology. 2021. Vol. 12. Article 613077. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.613077>.
 46. Gebreyohannes G., Gebreyohannes M. Medicinal values of garlic: A review // International Journal of Medicine and Medical Sciences. 2013. Vol. 5, no. 9. Pp. 401–408. <https://doi.org/10.5897/IJMMS2013.0960>.
 47. Iciek M., Kwiecień I., Włodek L. Biological properties of garlic and garlic - derived organosulfur compounds // Environmental and Molecular Mutagenesis. 2009. Vol. 50, no. 3. Pp. 247–265. <https://doi.org/10.1002/em.20474>.
 48. Adaki S., Adaki R., Shah K., Karagir A. Garlic: review of literature // Indian Journal of Cancer. 2014. Vol. 51, no. 4. Pp. 577–581.
 49. Thomson M., Ali M. Garlic [*Allium sativum*]: a review of its potential use as an anti-cancer agent // Current Cancer Drug Targets. 2003. Vol. 3, no. 1. Pp. 67–81.
 50. Fleischauer A.T., Arab L. Garlic and cancer: a critical review of the epidemiologic literature // The Journal of Nutrition. 2001. Vol. 131, no. 3. Pp. 1032S–1040S.
 51. Dorant E., van den Brandt P.A., Goldbohm R.A., Hermus R.J., Sturmans F. Garlic and its significance for the prevention of cancer in humans: a critical view // British Journal of Cancer. 1993. Vol. 67, no. 3. Pp. 424–429.
 52. Khanum F., Anilakumar K.R., Viswanathan K.R. Anticarcinogenic properties of garlic: a review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2004. Vol. 44, no. 6. Pp. 479–488. <https://doi.org/10.1080/10408690490886700>.
 53. Melguizo-Rodríguez L., García-Recio E., Ruiz C., De Luna-Bertos E., Illescas-Montes R., Costela-Ruiz V.J. Biological properties and therapeutic applications of garlic and its components // Food & Function. 2022. Vol. 13, no. 5. Pp. 2415–2426. <https://doi.org/10.1039/d1fo03180e>.
 54. Kahyaoglu D.T. Comparison of the antioxidant activity of garlic cloves with garlic husk and stem: Determination of utilization potential of garlic agricultural wastes // Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences. 2021. Vol. 8, no. 2. Pp. 463–469. <https://doi.org/10.30910/turkjans.884541>.
 55. Padiya R., Banerjee S.K. Garlic as an anti-diabetic agent: recent progress and patent reviews // Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture. 2013. Vol. 5, no. 2. Pp. 105–127.

56. Morales-González J.A., Madrigal-Bujaidar E., Sánchez-Gutiérrez M., Izquierdo-Vega J.A., Valadez-Vega M.D.C., Álvarez-González I., Morales-González A., Madrigal-Santillán E. Garlic (*Allium sativum* L.): A brief review of its antigenotoxic effects // *Foods*. 2019. Vol. 8. Article 343. <https://doi.org/10.3390/foods8080343>.
57. Bongiorno P.B., Fratellone P.M., LoGiudice P. Potential health benefits of garlic (*Allium sativum*): a narrative review // *Journal of Complementary and Integrative Medicine*. 2008. Vol. 5, no. 1. Pp. 1–25.
58. Batiha G.E., Beshbishy A.M., Wasef L.G., Elewa Y.H.A., Al-Sagan, A.A., El-Hack M.A.A., Taha A.E., Abd-Elhakim Y.M., Devkota H.P. Chemical constituents and pharmacological activities of garlic (*Allium sativum* L.): A review // *Nutrients*. 2020. Vol. 12, no. 3. Article 872. <https://doi.org/10.3390/nu12030872>.
59. Ansary J., Forbes-Hernández T.Y., Gil E., Cinciosi D., Zhang J., Elexpuru-Zabaleta M., Simal-Gandara J., Giampieri F., Battino M. Potential health benefit of garlic based on human intervention studies: A brief overview // *Antioxidants*. 2020. Vol. 9, no. 7. Article 619. <https://doi.org/10.3390/antiox9070619>.
60. Banerjee S.K., Maulik S.K. Effect of garlic on cardiovascular disorders: a review // *Nutrition Journal*. 2002. Vol. 1. Pp. 1–14.
61. Rahman K., Lowe G.M. Garlic and cardiovascular disease: a critical review // *The Journal of Nutrition*. 2006. Vol. 136, no. 3. Pp. 736S–740S.
62. Varshney R., Budoff M.J. Garlic and heart disease // *The Journal of Nutrition*. 2016. Vol. 146, no. 2. Pp. 416S–421S. <https://doi.org/10.3945/jn.114.202333>.
63. Ding H., Ao C., Zhang X. Potential use of garlic products in ruminant feeding: A review // *Animal Nutrition*. 2023. Vol. 14. Pp. 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.04.011>.
64. Ogbuewu I.P., Okoro V.M., Mbajiorgu E.F., Mbajiorgu C.A. Beneficial effects of garlic in livestock and poultry nutrition: A review // *Agricultural Research*. 2019. Vol. 8. Pp. 411–426. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0390-y>.
65. Kallel F., Chaabouni S.E. Biovalorization of garlic waste to produce high value-added products // *Roots, Tubers, and Bulb Crop Wastes: Management by Biorefinery Approaches*. 2024. Pp. 309–332. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8266-0_14.
66. El-Mashad H.M., Zhang R., Pan Z. Onion and garlic // *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products*. 2019. Pp. 273–296. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00011-3>.
67. Jain M., Patil N., Mohammed A., Hamzah Z. Valorization of garlic (*Allium sativum* L.) byproducts: Bioactive compounds, biological properties, and applications // *Journal of Food Science*. 2025. Vol. 90, no. 3. Article e70152. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70152>.
68. Martín J.P.H., Ramáirez D.A., Camargo A.B. Overview of garlic waste management, circular economy and upcycling // *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*. 2025. Vol. 57, no. 1. Pp. 215–231.
69. Голубкина Н.А., Немтинов В.И., Терешонок В.И. Чеснок и продукты его переработки, перспективы использования // *Овощи России*. 2024. №6. С. 75–83. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-6-75-83>.
70. Qiu Z., Zheng Z., Xiao H. Sustainable valorization of garlic byproducts: From waste to resource in the pursuit of carbon neutrality // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025. Vol. 24, no. 2. Article e70151. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70151>.
71. Gul F., Ullah Z., Iqbal J., Abbasi B.A., Ijaz S., Uddin S., Yaseen T., Ali H., Jamil M., Kanwal S., Mahmood T. Bioactive phytochemicals from garlic (*Allium sativum* L.) by-products // *Bioactive Phytochemicals in By-products from Bulb, Flower and Fruit Vegetables*. 2025. Pp. 23–83. https://doi.org/10.1007/978-3-031-77399-0_2.
72. Unal H.G. Design and performance analysis of a pneumatic garlic peeling machine // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2024. Article 2790839. <https://doi.org/10.1155/2024/2790839>.
73. Zhang Q., Han K., Li S., Li M., Ren K. Synthesis of garlic skin-derived 3D hierarchical porous carbon for high-performance supercapacitors // *Nanoscale*. 2018. Vol. 10, no. 5. Pp. 2427–2437.
74. Şen E., Göktürk E., Uğuzdoğan E. Pectin extraction from garlic waste under dual acid condition // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022. Vol. 46, no. 12. Article e17150. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17150>.
75. Reddy J.P., Rhim J.W. Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from garlic skin // *Materials Letters*. 2014. Vol. 129. Pp. 20–23. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.019>.
76. Hernández-Varela J.D., Chanona-Pérez J.J., Resendis-Hernández P., Victoriano L.G., Méndez-Méndez J.V., Cárdenas-Pérez S., Benavides H.C. Development and characterization of biopolymers films mechanically reinforced with garlic skin waste for fabrication of compostable dishes // *Food Hydrocolloids*. 2022. Vol. 124. Article 107252. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107252>.
77. Qiu Z., Zheng Z., Xiao H. Sustainable valorization of garlic byproducts: From waste to resource in the pursuit of carbon neutrality // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025. Vol. 24, no. 2. Article e70151. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70151>.
78. Velciov A.B., Danci M., Cozma A., Lalescu V.D., Rădulescu L., Popescu G.S., Rada M. Evaluation of some nutritional compounds of garlic (*Allium sativum* L.) peel waste // *Scientific Papers. Series B. Horticulture*. 2024. Vol. 68, no. 2. Pp. 1–10.
79. Zhivkova V. Determination of nutritional and mineral composition of wasted peels from garlic, onion and potato // *Carpathian Journal of Food Science & Technology*. 2021. Vol. 13, no. 3. Pp. 1–13. <https://doi.org/10.34302/crpfst/2021.13.3.11>.
80. Azmat F., AliImran A., Islam F., Afzaal M., Zahoor T., Akram R., Aggarwal S., Rehman M., Naaz S., Ashraf S., Hussain G., Suleria H.A.R., Ali Q., Bibi M., Batool F., Gul F., Amjad N., Shah M.A. Valorization of the phytochemical

- profile, nutritional composition, and therapeutic potentials of garlic peel: a concurrent review // International Journal of Food Properties. 2023. Vol. 26, no. 1. Pp. 2642–2655. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2251713>.
81. Velciov A.B., Popescu G.S., Cozma A., Brei L., Stoin D., Lalescu V.D., Rădulescu L., Megyesi C.I., Rada M. Preliminary research on garlic peel powder as a source of essential mineral elements // Journal of Agroalimentary Processes & Technologies. 2024. Vol. 30, no. 4. Pp. 1–7. <https://doi.org/10.59463/JAPT.2024.2.48>.
 82. Abdel - Fattah A.F., Edrees M. A study on the composition of garlic skins and the structural features of the isolated pectic acid // Journal of the Science of Food and Agriculture. 1972. Vol. 23, no. 7. Pp. 871–877. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740230708>.
 83. Lasalvia A., Cairone F., Cesa S., Maccelli A., Crestoni M.E., Menghini L., Carradori S., Marinacci B., Gallorini M., Elsallabi O., Pesce M., Patruno A. Characterization and valorization of ‘sulmona red garlic’ peels and small bulbs // Antioxidants. 2022. Vol. 11, no. 11. Article 2088. <https://doi.org/10.3390/antiox11112088>.
 84. Singiri J.R., Swetha B., Ben-Natan A., Grafi G. What worth the garlic peel // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23, no. 4. Article 2126. <https://doi.org/10.3390/ijms23042126>.
 85. Kahyaoglu D.T. Comparison of the antioxidant activity of garlic cloves with garlic husk and stem: Determination of utilization potential of garlic agricultural wastes // Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences. 2021. Vol. 8, no. 2. Pp. 463–469. <https://doi.org/10.30910/turkjans.884541>.
 86. Toledano-Medina M.A., Pérez-Aparicio J., Moreno-Rojas R., Merinas-Amo T. Evolution of some physicochemical and antioxidant properties of black garlic whole bulbs and peeled cloves // Food chemistry. 2016. Vol. 199. Pp. 135–139. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.128>.
 87. Min J.H., Jeong J.H., Park Y.U., Lee J.S., Lee S.J., Chang W.B. Quality characteristics of garlic peel according to processing methods // Food Science and Preservation. 2020. Vol. 27, no. 1. Pp. 32–37. <https://doi.org/10.11002/kjfp.2020.27.1.32>.
 88. Ding H., Ao C., Zhang X. Potential use of garlic products in ruminant feeding: A review // Animal Nutrition. 2023. Vol. 14. Pp. 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.04.011>.
 89. Zhu W., Su Z., Xu W., Sun H.X., Gao J.F., Tu D.F., Ren C.H., Zhang Z.J., Cao H.G. Garlic skin induces shifts in the rumen microbiome and metabolome of fattening lambs // Animal. 2021. Vol. 15, no. 5. Article 100216. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100216>.
 90. Kim Y.J., Jin S.K., Yang H.S. Effect of dietary garlic bulb and husk on the physicochemical properties of chicken meat // Poultry Science. 2009. Vol. 88, no. 2. Pp. 398–405. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00179>.
 91. Hitlamani V., Inamdar A.A. Valorization and the potential use of garlic (*Allium sativum* L.) skin in food industries // Food and Humanity. 2024. 100437. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100437>.
 92. Hashmi M.S., Akhtar S., Ismail T. Biochemical characterization of vegetables wastes and development of functional bread: Vegetablesâ€™ wastes based functional bread // Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences. 2021. Vol. 10(4). Pp. 691–696.
 93. Pop A., Petrut G., Muste S., Paucean A., Muresan C., Salanta L., Man S. Addition of plant materials rich in phenolic compounds in wheat bread in terms of functional food aspects. // Hop and Medicinal Plants. 2016. Vol. 24, no. 1-2. Pp. 37–44.
 94. Федоров А.В., Шабунина М.В., Баракова Н.В. Использование вторичных ресурсов – в хлебопечении – как способ достижения целей устойчивого развития // Вестник ВНИИЖ. 2021. № 1-2. С. 18–24.
 95. Subiria-Cueto R., Coria-Oliveros A.J., Wall-Medrano A., Rodrigo-Garcia J., González-Aguilar G.A., Martínez-Ruiz N.D.R., Alvarez-Parrilla E. Antioxidant dietary fiber-based bakery products: a new alternative for using plant-by-products // Food Science and Technology. 2021. Vol. 42. ctaAR57520. <https://doi.org/10.1590/fst.57520>.
 96. Lee M.H. Quality characteristics and antioxidant properties of pan bread with garlic peel powder // Culinary Science & Hospitality Research. 2022. Vol. 28, no. 9. Pp. 14–23. <https://doi.org/10.20878/cshr.2022.28.9.002>.
 97. Mendez-Trujillo V., Romero M.R., Mendoza D.G., Ibarra M.N., Pavon D.R. Aprovechamiento de residuos de la hortaliza de ajo (*Allium sativum* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.), para el desarrollo de un sazón bajo en sodio // Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales. 2024. Vol. 11, no. 1. Pp. 23–31.
 98. dos Santos P.C.M., da Silva L.M.R., Magalhaes F.E.A., Cunha F.E.T., Ferreira M.J.G., de Figueiredo E.A.T. Garlic (*Allium sativum* L.) peel extracts: from industrial by-product to food additive // Applied Food Research. 2022. Vol. 2, no. 2. Article 100186. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100186>.
 99. Hernández-Montesinos I.Y., Carreón-Delgado D.F., Ocaranza-Sánchez E., Ochoa-Velasco C.E., Suárez-Jacobo Á., Ramírez-López C. Garlic (*Allium sativum*) peel extracts and their potential as antioxidant and antimicrobial agents for food applications: Influence of pretreatment and extraction solvent // International Journal of Food Science and Technology. 2023. Vol. 58, no. 12. Pp. 6794–6805. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16652>.
 100. Bonilla-Luque O.M., Silva B.N., Ezzaky Y., Possas A., Achemchem F., Cadavez V., Gonzales-Barron U., Valero A. Meta-analysis of antimicrobial activity of Allium, Ocimum, and Thymus spp. confirms their promising application for increasing food safety // Food Research International. 2024. Vol. 188. Article 114408. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114408>.
 101. Ifesan B.O.T., Fadipe E.A., Ifesan B.T. Investigation of antioxidant and antimicrobial properties of garlic peel extract (*Allium sativum*) and its use as natural food additive in cooked beef // Journal of Scientific Research and Reports. 2014. Vol. 3, no. 5. Pp. 711–721. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2014/5726>.

102. Ucak İ., Fadiloğlu E.E. Determination of the oxidative stability and shelf life of anchovy (*Engraulis encrasicolus* L., 1758) fish burgers supplemented with garlic peel extract during cold storage // *Progress in Nutrition*. 2020. Vol. 22, no. 3. Article e2020047. <https://doi.org/10.23751/pn.v22i3.10073>.
103. 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.ccej.2021.100239>.
104. Шайхиев И.Г., Свергузова С.В., Шайхиева К.И., Сапронова Ж.А. Использование скорлупы грецкого ореха (*Juglans regia*) в качестве сорбционных материалов для удаления загрязнителей из природных и сточных вод // *Химия растительного сырья*. 2020. №2. С. 5–18. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020025622>.
105. Bankole D.T., Oluyori A.P., Inyinbor A.A. The removal of pharmaceutical pollutants from aqueous solution by agro-waste // *Arabian Journal of Chemistry*. 2023. Vol. 16, no. 5. Article 104699. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104699>.
106. Shaikhiev I.G., Svergzova 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>.
107. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzova 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>.
108. 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>.
109. Шайхиева К.И., Степанова С.В., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В. Использование нативного и модифицированных образцов жома сахарной свеклы (*Betavulgaris*) 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>.
110. 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>.
111. Карабаева М.И., Мирсалимова С.Р., Салиханова Д.С., Мамадалиева С.В., Ортикова С.С. Основные направления использования отходов растительного сырья (скорлупа арахиса) в качестве адсорбентов (обзор) // *Химия растительного сырья*. 2022. №1. С. 53–69. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2022019956>.
112. Шайхиева К.И., Фридланд С.В., Свергузова С.В. Использование биомассы и отходов от переработки фасоли (*Phaseolus vulgaris*) и гороха (*Pisum sativum*) в качестве сорбционных материалов для удаления загрязнителей из водных сред (обзор литературы) // *Химия растительного сырья*. 2021. №4. С. 47–64. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049125>.
113. Shaikhiev I.G., Svergzova 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. <https://doi.org/10.1134/S1995421223030346>.
114. Kallel F., Chaabouni S.E. Perspective of garlic processing wastes as low-cost substrates for production of high-added value products: A review // *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2017. Vol. 36, no. 6. Pp. 1765–1777. <https://doi.org/10.1002/ep.12649>.
115. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzova 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. <https://doi.org/10.33263/BRIAC124.45184528>.
116. Sun J., Li X., Ai X., Liu J., Yin Y., Huang Y., Zhou H., Huang K. Efficient removal of cadmium from soil-washing effluents by garlic peel biosorbent // *Environmental Science & Pollution Research*. 2018. Vol. 25. Pp. 19001–19011. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2109-9>.
117. Sun J., Yin L., Huang K., Li X., Ai X., Huang Y., Yin Y., Liu J. Removal of cadmium from a citrate-bearing solution by floatable micro-sized garlic peel // *RSC Advances*. 2018. Vol. 8. Pp. 28284–28292. <https://doi.org/10.1039/c8ra03502d>.
118. Abu-Shahba M.S., Mansour M.M., Mohamed H.I., Sofy M.R. Effect of biosorptive removal of cadmium ions from hydroponic solution containing indigenous garlic peel and mercerized garlic peel on lettuce productivity // *Scientia Horticulturae*. 2022. Vol. 293. Article 110727. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110727>.
119. Saigl Z.M., Aloufi E.E. Separation of chromium (VI) by adsorption onto garlic peels: kinetics, thermodynamic and isotherm study // *Desalination and Water Treatment*. 2023. Vol. 294. Pp. 149–161. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29569>.
120. Chowdhury A., Bhowal A., Datta S. Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies for removal of copper (II) from aqueous solution by onion and garlic skin // *Water*. 2012. Vol. 4. Pp. 37–51. <https://doi.org/10.14294/WATER.2012.4>.
121. Geetha, K.S., Belagali, S.L. Removal of dyes and heavy metals using garlic husk // *Nature Environment and Pollution Technology*. 2010. Vol. 9, no. 2. Pp. 323–327.
122. Liu W., Liu Y., Tao Y., Yu Y., Jiang H., Lian H. Comparative study of adsorption of Pb(II) on native garlic peel and mercerized garlic peel // *Environmental Science & Pollution Research*. 2014. Vol. 21. Pp. 2054–2063. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2112-0>.

123. Chang Q., Li P., Han Y., Guan X., Xiong J., Li Q., Zhang H., Huang K., Zhang X., Xie H., Qi T. Ultra-low concentration terbium (Tb) adsorption on garlic peels biosorbent and its application for Nd-Fe-B scraps recovery // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023. Vol. 11, no. 3. Article 109997. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109997>.
124. Wang Y., Huang K. Biosorption of tungstate onto garlic peel loaded with Fe(III), Ce(III), and Ti(IV) // *Environmental Science & Pollution Research*. 2020. Vol. 27. Pp. 33692–33702. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09309-8>.
125. Liang S., Guo X., Tian Q. Adsorption of Pb^{2+} , Cu^{2+} and Ni^{2+} from aqueous solutions by novel garlic peel adsorbent // *Desalination and Water Treatment*. 2013. Vol. 51, no. 37-39. Pp. 7166–7171. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.769919>.
126. Soleymani-Bonoti F., Kazemi D., Hajimiri I., Imani A. Biosorption of Cd^{2+} , Ni^{2+} and Zn^{2+} from contaminated well water by garlic peel // *Fine Chemical Engineering*. 2024. Pp. 304–318. <https://doi.org/10.37256/fce.5220244604>.
127. Negi R., Satpathy G., Tyagi Y.K., Gupta R.K. Biosorption of heavy metals by utilising onion and garlic wastes // *International Journal of Environment and Pollution*. 2012. Vol. 49, no. 3-4. Pp. 179–196.
128. Sun J., Xiu Y., Huang K., Yu J., Alam S., Zhua H., Guo Z. Selective recovery of phosphorus from acid leach liquor of iron ore by garlic peel adsorbent // *RSC Advance*. 2018. Vol. 8. Pp. 22276–22285. <https://doi.org/10.1039/c8ra03203c>.
129. Huang K., Shao J.G., Zhu H.M., Inoue K. Removal of fluoride from aqueous solution onto Zr-loaded garlic peel (Zr-GP) particles // *Journal of Central South University*. 2011. Vol. 18. Pp. 1448–1453. <https://doi.org/10.1007/s11771-011-0860-x>.
130. Zhang Y., Xiong L., Xiu Y., Huang K. Defluoridation in fixed bed column filled with Zr(IV)-loaded garlic peel // *Microchemistry Journal*. 2019. Vol. 145. Pp. 476–485. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.11.007>.
131. Hameed B.H., Ahmad A.A. Batch adsorption of methylene blue from aqueous solution by garlic peel, an agricultural waste biomass // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 164. Pp. 870–875. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.084>.
132. Zhao Y., Zhu L., Li W., Liu J., Liu X., Huang K. Insights in to enhanced adsorptive removal of Rhodamine B by different chemically modified garlic peels: Comparison, kinetics, isotherms, thermodynamics and mechanism // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. Vol. 293. Article 111516. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111516>.
133. Asfaram A., Fathi M.R., Khodadoust S., Naraki M. Removal of Direct Red 12B by garlic peel as a cheap adsorbent: Kinetics, thermodynamic and equilibrium isotherms study of removal // *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2014. Vol. 127. Pp. 415–421. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.02.092>.
134. Abbas S.H., Ridha A.M., Rashid K.H., Khadom A.A. Biosorption of Congo red dye removal from aqueous solution using fennel seed spent and garlic peel // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023. Vol. 20, no. 12. Pp. 13845–13858. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04986-7>.
135. Pulikkal A.K., Laskar N., Anjudikkal J. Effective adsorption of polycyclic aromatic Congo red dye by modified garlic peel // *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2024. Vol. 45, no. 4. Pp. 799–809. <https://doi.org/10.1080/01932691.2023.2181180>.
136. Alamzeb M., Tullah M., Ali S., Ihsanullah, Khan B., Setzer W.N., Al-Zaqri N., Ibrahim M.N.M. Kinetic, thermodynamic and adsorption isotherm studies of detoxification of Eriochrome Black T dye from wastewater by native and washed garlic peel // *Water*. 2022. Vol. 14, no. 22. Article 3713. <https://doi.org/10.3390/w14223713>.
137. Muthamilselvi P., Karthikeyan R., Kumar B.S.M. Adsorption of phenol onto garlic peel: optimization, kinetics, isotherm, and thermodynamic studies // *Desalination and Water Treatment*. 2016. Vol. 57, no. 5. Pp. 2089–2103. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.979237>.
138. Muthamilselvi P., Karthikeyan R., Kapoor A., Prabhakar S. Continuous fixed-bed studies for adsorptive remediation of phenol by garlic peel powder // *International Journal of Industrial Chemistry*. 2018. Vol. 9. Pp. 379–390. <https://doi.org/10.1007/s40090-018-0166-z>.
139. Zhao Y., Li W., Liu J., Huang K., Wu C., Shao H., Chen H., Liu X. Modification of garlic peel by nitric acid and its application as a novel adsorbent for solid-phase extraction of quinolone antibiotics // *Chemical Engineering Journal*. 2017. Vol. 326. Pp. 745–755. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.139>.
140. Zhao Y., Li W., Liu Z., Liu J., Zhu L., Liu X., Huang K. Renewable Tb/Eu-loaded garlic peels for enhanced adsorption of enrofloxacin: kinetics, isotherms, thermodynamics, and mechanism // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2018. Vol. 6, no. 11. Pp. 15264–15272. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03739>.

Поступила в редакцию 9 сентября 2025 г.

После переработки 11 октября 2025 г.

Принята к публикации 26 февраля 2026 г.

Shaykhiyeva K.I.¹, Sverguzova S.V.², Shaykhiyev I.G.¹, Fazullina A.A.¹, Svyatchenko A.V.^{2*} USE OF GARLIC HUSKS IN FOOD AND AS A SORPTION MATERIAL (REVIEW OF WORLD LITERATURE)

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

² V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, st. Kostyukova, 46, Belgorod, 308012, Russia, sv.anastasiaa@mail.ru

The article summarizes the literature data on the use of crushed garlic husk (*Allium sativum* L.) as a functional ingredient in food and sorption materials for removing various metal ions, dyes and antibiotics from aqueous media. The article provides brief information on the amount of waste generated during the processing of garlic and methods of reuse. Information about the composition and therapeutic effect of garlic heads and husks is briefly provided. It has been shown that the addition of garlic husk powder and extracts from it helps to increase the functional characteristics of various food products. The parameters of adsorption processes and the values of sorption parameters for various pollutants are given. It has been shown that the sorption characteristics of garlic husks for various pollutants can be improved by modification with various chemical reagents. It is determined that the Langmuir model in most cases more accurately describes the isotherms of adsorption of pollutants, and the kinetics of the process more accurately follows the pseudo-second-order model.

Keywords: garlic, garlic clove husks, composition food, metal ions dyes, antibiotics, adsorption, modification.

For citing: Shaykhiyeva K.I., Sverguzova S.V., Shaykhiyev I.G., Fazullina A.A., Svyatchenko A.V. *Khimiya Ras-titel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 3, pp. 52–72. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260317832>.

References

- O'Sullivan J.N. *World*, 2023, vol. 4, pp. 545–568. <https://doi.org/10.3390/world4030034>.
- 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>.
- Khorairi A.N.S.A., Sofian-Seng N.S., Othaman R., Rahman H.A., Razali N.S.M., Lim S.J., Mustapha W.A.W. *Food Reviews International*, 2023, vol. 39, no. 2, pp. 663–688. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1926478>.
- Meraj A., Singh S.P., Jawaid M., Nasef M.M., Alomar T.S., AlMasoud N. *Journal of Polymers and the Environment*, 2023, vol. 31, no. 8, pp. 3283–3316. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02817-x>.
- Khanpit V.V., Tajane S.P., Mandavgane S.A. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2025, vol. 15, no. 2, pp. 1667–1686. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01980-2>.
- Mir-Cerdà A., Nunez O., Granados M., Sentellas S., Saurina J. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023, vol. 161, article 116994. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116994>.
- Kultys E., Kurek M.A. *Molecules*, 2022, vol. 27, article 518. <https://doi.org/10.3390/molecules27020518>.
- García-González A.G., Rivas-García P., Escamilla-Alvarado C., Ramírez-Cabrera M.A., Paniagua-Vega D., Galván-Arzola U., Cano-Gómez J.J., Escárcega-González C.E. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2025, vol. 19, no. 1, pp. 231–249. <https://doi.org/10.1002/bbb.2698>.
- Sánchez M., Laca A., Laca A., Díaz M. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 2021, vol. 49, no. 8, article 2000376. <https://doi.org/10.1002/clen.202000376>.
- Sharma M., Usmani Z., Gupta V.K., Bhat R. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2021, vol. 41, no 4, pp. 535–563. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1873240>.
- Grover S., Aggarwal P., Kumar A., Kaur S., Yadav R., Babbar N. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, vol. 15, pp. 5043–5064. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05382-y>.
- Rodriguez Garcia S.L., Raghavan V. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, vol. 62, no. 23, pp. 6446–6466. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1901651>.
- Phiri R., Rangappa S.M., Siengchin S., Oladijo O.P., Dhakal H.N. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2023, vol. 6, no. 4, pp. 436–450. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.04.004>.
- Sangmesh B., Patil N., Jaiswal K.K., Gowrishankar T.P., Selvakumar K.K., Jyothi M.S., Jyothilakshmi R., Kumar S. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 368, article 130457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130457>.
- Ganasen N., Bahrami A., Loganathan K. *Buildings*, 2023, vol. 13, article 426. <https://doi.org/10.3390/buildings13020426>.
- Shaykhiyev I.G. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2010, no. 3, pp. 15–25. (in Russ.).
- Shaykhiyev I.G. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2010, no. 4, pp. 30–40. (in Russ.).
- 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>.
- 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>.
- Kapanoglu E., Nemli E., Tomas-Barberan F. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, vol. 70, no. 23, pp. 6787–6804. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07104>.
- Fedorov A.V., Shabunina M.V., Barakova N.V. *Trudy VNIIZh*. 2021, no. 1-2, pp. 18–14. <https://doi.org/10.25812/VNIIG.2021.95.48.014>. (in Russ.).
- Mohamed K., Khalil E., Arafa S. *Food Technology Research Journal*, 2023, vol. 2, no. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.21608/ftjr.2023.309989>.

* Corresponding author.

23. Wadhwa M., Bakshi M.P.S., Makkar H.P.S. *CABI Reviews*, 2015, vol. 10, pp. 1–25. <https://doi.org/10.1079/PAVSNR201510043>.
24. Yeliseyeva T., Yampol'skiy A. *Zhurnal zdorovogo pitaniya i diyetologii*, 2019, vol. 1, no. 7, pp. 11–22. (in Russ.).
25. Adelpour T., Mojtabavi S., Mahmoudabadi-Arani Z., Bozorgi-Koshalshahi M., Faramarzi M.A. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, no 1, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99715-0>.
26. Okoro B.C., Dokunmu T.M., Okafor E., Sokoya I.A., Israel E.N., Olusegun D.O., Bella-Omunagbe M., Ebubechi U.M., Ugbo E.A., Iweala E.E.J. *Pharmacological Research-Modern Chinese Medicine*, 2023, vol. 8, article 100273. <https://doi.org/10.1016/j.prmcm.2023.100273>.
27. Verma T., Aggarwal A., Dey P., Chauhan A.K., Rashid S., Chen K.T., Sharma R. *Frontiers in Nutrition*, 2023, vol. 10, article 1120377. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1120377>.
28. Berginc K., Milisav I., Kristl A. *Drug Metabolism and Pharmacokinetics*, 2010, vol. 25, no. 6, pp. 521–530.
29. Skoczylas J., Jędraszczek E., Dziadek K., Dacewicz E., Kopeć A. *Molecules*, 2023, vol. 28, no. 18, article 6653. <https://doi.org/10.3390/molecules28186653>.
30. Subroto E., Cahyana Y., Tensiska, Mahani, Filianty F., Lembong E., Wulandari E., Kurniati D., Saputra R.A., Faturachman F. *Food Research*, 2021, vol. 5, no. 6, pp. 1–11. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(6\).042](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(6).042).
31. Khubber S., Hashemifesharaki R., Mohammadi M., Gharibzahedi S.M.T. *Nutrition Journal*, 2020, vol. 19, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1186/s12937-020-00643-8>.
32. Lawson L.D. *Blood*, 1998, vol. 179, pp. 176–209.
33. Lanzotti V. *Journal of Chromatography A*, 2006, vol. 1112, no. 1-2, pp. 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.12.016>.
34. Afzaal M., Saeed F., Rasheed R., Hussain M., Aamir M., Hussain S., Mohamed A.A., Alamri M.S., Anjum F.M. *International Journal of Food Properties*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 1387–1402. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1967386>.
35. Chanda S., Kushwaha S., Tiwari R.K. *Journal of Pharmacy Research*, 2011, vol. 4, no. 6, pp. 1857–1860.
36. Koca I., Tasci B. *VII International Symposium on Edible Alliaceae*, 2015, vol. 1143, pp. 139–146. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1143.20>.
37. Amarakoon S., Jayasekara D. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2017, vol. 6, no. 6, pp. 1777–1780.
38. Eren E., Yilmaz N., Kalayci M.Z. *Anadolu Tıbbi Dergisi*, 2024, vol. 2, no. 1, pp. 15–21. <https://doi.org/10.5505/anadolutd.2023.33042>.
39. Sunanta P., Kontogiorgos V., Pankasemsuk T., Jantanasakulwong K., Rachtanapun P., Seesuriyachan P., Sommano S.R. *Frontiers in Nutrition*, 2023, vol. 10, article 1142784. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1142784>.
40. Bayan L., Koulivand P.H., Gorji A. *Avicenna Journal of Phytomedicine*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 1–14.
41. El-Saadony M.T., Saad A.M., Korma S.A., Salem H.M., Abd El-Mageed T.A., Alkafaas S.S., Elsalahaty M.I., Elkafas S.S., Mosa W.F.A., Ahmed A.E., Mathew B.T., Albastaki N.A., Alkuwaiti A.A., El-Tarabily M.K., AbuQamar S.F., El-Tarabily K.A., Ibrahim S.A. *Frontiers in Immunology*, 2024, vol. 15, article 1277074. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1277074>.
42. Rana S.V., Pal R., Vaiphei K., Sharma S.K., Ola R.P. *Nutrition Research Reviews*, 2011, vol. 24, no. 1, pp. 60–71. <https://doi.org/10.1017/S0954422410000338>.
43. Rouf R., Uddin S.J., Sarker D.K., Islam M.T., Ali E.S., Shilpi J.A., Nahar L., Tiralonge E., Sarker S.D. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, vol. 104, pp. 219–234. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.006>.
44. Harris J.C., Cottrell S.L., Plummer S., Lloyd D. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, vol. 57, pp. 282–286. <https://doi.org/10.1007/s002530100722>.
45. Bhatwalkar S.B., Mondal R., Krishna S.B.N., Adam J.K., Govender P., Anupam R. *Frontiers in Microbiology*, 2021, vol. 12, article 613077. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.613077>.
46. Gebreyohannes G., Gebreyohannes M. *International Journal of Medicine and Medical Sciences*, 2013, vol. 5, no. 9, pp. 401–408. <https://doi.org/10.5897/IJMMS2013.0960>.
47. Iciek M., Kwiecień I., Włodek L. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 2009, vol. 50, no. 3, pp. 247–265. <https://doi.org/10.1002/em.20474>.
48. Adaki S., Adaki R., Shah K., Karagir A. *Indian Journal of Cancer*, 2014, vol. 51, no. 4, pp. 577–581.
49. Thomson M., Ali M. *Current Cancer Drug Targets*, 2003, vol. 3, no. 1, pp. 67–81.
50. Fleischauer A.T., Arab L. *The Journal of Nutrition*, 2001, vol. 131, no. 3, pp. 1032S–1040S.
51. Dorant E., van den Brandt P.A., Goldbohm R.A., Hermus R.J., Sturmans F. *British Journal of Cancer*, 1993, vol. 67, no. 3, pp. 424–429.
52. Khanum F., Anilakumar K.R., Viswanathan K.R. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2004, vol. 44, no. 6, pp. 479–488. <https://doi.org/10.1080/10408690490886700>.
53. Melguizo-Rodríguez L., García-Recio E., Ruiz C., De Luna-Bertos E., Illescas-Montes R., Costela-Ruiz V.J. *Food & Function*, 2022, vol. 13, no. 5, pp. 2415–2426. <https://doi.org/10.1039/d1fo03180e>.
54. Kahyaoglu D.T. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 2021, vol. 8, no. 2, pp. 463–469. <https://doi.org/10.30910/turkjans.884541>.
55. Padiya R., Banerjee S.K. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture*, 2013, vol. 5, no. 2, pp. 105–127.
56. Morales-González J.A., Madrigal-Bujaidar E., Sánchez-Gutiérrez M., Izquierdo-Vega J.A., Valadez-Vega M.D.C., Álvarez-González I., Morales-González A., Madrigal-Santillán E. *Foods*, 2019, vol. 8, article 343. <https://doi.org/10.3390/foods8080343>.
57. Bongiorno P.B., Fratellone P.M., LoGiudice P. *Journal of Complementary and Integrative Medicine*, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 1–25.

58. Batiha G.E., Beshbishy A.M., Wasef L.G., Elewa Y.H.A., Al-Sagan, A.A., El-Hack M.A.A., Taha A.E., Abd-Elhakim Y.M., Devkota H.P. *Nutrients*, 2020, vol. 12, no. 3, article 872. <https://doi.org/10.3390/nu12030872>.
59. Ansary J., Forbes-Hernández T.Y., Gil E., Cianciosi D., Zhang J., Elexpuru-Zabaleta M., Simal-Gandara J., Giampieri F., Battino M. *Antioxidants*, 2020, vol. 9, no. 7, article 619. <https://doi.org/10.3390/antiox9070619>.
60. Banerjee S.K., Maulik S.K. *Nutrition Journal*, 2002, vol. 1, pp. 1–14.
61. Rahman K., Lowe G.M. *The Journal of Nutrition*, 2006, vol. 136, no. 3, pp. 736S–740S.
62. Varshney R., Budoff M.J. *The Journal of Nutrition*, 2016, vol. 146, no. 2, pp. 416S–421S. <https://doi.org/10.3945/jn.114.202333>.
63. Ding H., Ao C., Zhang X. *Animal Nutrition*, 2023, vol. 14, pp. 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.04.011>.
64. Ogbuewu I.P., Okoro V.M., Mbajorgu E.F., Mbajorgu C.A. *Agricultural Research*, 2019, vol. 8, pp. 411–426. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0390-y>.
65. Kallel F., Chaabouni S.E. *Roots, Tubers, and Bulb Crop Wastes: Management by Biorefinery Approaches*, 2024, pp. 309–332. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8266-0_14.
66. El-Mashad H.M., Zhang R., Pan Z. *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products*, 2019, pp. 273–296. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00011-3>.
67. Jain M., Patil N., Mohammed A., Hamzah Z. *Journal of Food Science*, 2025, vol. 90, no. 3, article e70152. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70152>.
68. Martín J.P.H., Ramáirez D.A., Camargo A.B. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 2025, vol. 57, no. 1, pp. 215–231.
69. Golubkina N.A., Nemtinov V.I., Tereshonok V.I. *Ovoshchi Rossii*, 2024, no. 6, pp. 75–83. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-6-75-83>. (in Russ.).
70. Qiu Z., Zheng Z., Xiao H. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2025, vol. 24, no. 2, article e70151. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70151>.
71. Gul F., Ullah Z., Iqbal J., Abbasi B.A., Ijaz S., Uddin S., Yaseen T., Ali H., Jamil M., Kanwal S., Mahmood T. *Bioactive Phytochemicals in By-products from Bulb, Flower and Fruit Vegetables*, 2025, pp. 23–83. https://doi.org/10.1007/978-3-031-77399-0_2.
72. Unal H.G. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024, article 2790839. <https://doi.org/10.1155/2024/2790839>.
73. Zhang Q., Han K., Li S., Li M., Li J., Ren K. *Nanoscale*, 2018, vol. 10, no. 5, pp. 2427–2437.
74. Şen E., Göktürk E., Uğuzdoğan E. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, vol. 46, no. 12, article e17150. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17150>.
75. Reddy J.P., Rhim J.W. *Materials Letters*, 2014, vol. 129, pp. 20–23. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.019>.
76. Hernández-Varela J.D., Chanona-Pérez J.J., Resendis-Hernández P., Victoriano L.G., Méndez-Méndez J.V., Cárdenas-Pérez S., Benavides H.C. *Food Hydrocolloids*, 2022, vol. 124, article 107252. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107252>.
77. Qiu Z., Zheng Z., Xiao H. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2025, vol. 24, no. 2, article e70151. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70151>.
78. Velciov A.B., Danci M., Cozma A., Lalescu V.D., Rădulescu L., Popescu G.S., Rada M. *Scientific Papers. Series B. Horticulture*, 2024, vol. 68, no. 2, pp. 1–10.
79. Zhivkova V. *Carpathian Journal of Food Science & Technology*, 2021, vol. 13, no. 3, pp. 1–13. <https://doi.org/10.34302/crpfjst/2021.13.3.11>.
80. Azmat F., AliImran A., Islam F., Afzaal M., Zahoor T., Akram R., Aggarwal S., Rehman M., Naaz S., Ashraf S., Hussain G., Suleria H.A.R., Ali Q., Bibi M., Batool F., Gul F., Amjad N., Shah M.A. *International Journal of Food Properties*, 2023, vol. 26, no. 1, pp. 2642–2655. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2251713>.
81. Velciov A.B., Popescu G.S., Cozma A., Brei L., Stoin D., Lalescu V.D., Rădulescu L., Megyesi C.I., Rada M. *Journal of Agroalimentary Processes & Technologies*, 2024, vol. 30, no. 4, pp. 1–7. <https://doi.org/10.59463/JAPT.2024.2.48>.
82. Abdel - Fattah A.F., Edrees M. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1972, vol. 23, no. 7, pp. 871–877. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740230708>.
83. Lasalvia A., Cairone F., Cesa S., Maccelli A., Crestoni M.E., Menghini L., Carradori S., Marinacci B., Gallorini M., Elsallabi O., Pesce M., Patruno A. *Antioxidants*, 2022, vol. 11, no. 11, article 2088. <https://doi.org/10.3390/antiox11112088>.
84. Singiri J.R., Swetha B., Ben-Natan A., Grafi G. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, vol. 23, no. 4, article 2126. <https://doi.org/10.3390/ijms23042126>.
85. Kahyaoglu D.T. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 2021, vol. 8, no. 2, pp. 463–469. <https://doi.org/10.30910/turkjans.884541>.
86. Toledano-Medina M.A., Pérez-Aparicio J., Moreno-Rojas R., Merinas-Amo T. *Food chemistry*, 2016, vol. 199, pp. 135–139. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.128>.
87. Min J.H., Jeong J.H., Park Y.U., Lee J.S., Lee S.J., Chang W.B. *Food Science and Preservation*, 2020, vol. 27, no. 1, pp. 32–37. <https://doi.org/10.11002/kjfp.2020.27.1.32>.
88. Ding H., Ao C., Zhang X. *Animal Nutrition*, 2023, vol. 14, pp. 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.04.011>.
89. Zhu W., Su Z., Xu W., Sun H.X., Gao J.F., Tu D.F., Ren C.H., Zhang Z.J., Cao H.G. *Animal*, 2021, vol. 15, no. 5. Article 100216. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100216>.
90. Kim Y.J., Jin S.K., Yang H.S. *Poultry Science*, 2009, vol. 88, no. 2, pp. 398–405. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00179>.
91. Hitlamani V., Inamdar A.A. *Food and Humanity*, 2024, 100437. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100437>.

92. Hashmi M.S., Akhtar S., Ismail T. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2021, vol. 10(4), pp. 691–696.
93. Pop A., Petrut G., Muste S., Paucean A., Muresan C., Salanta L., Man S. *Hop and Medicinal Plants*, 2016, vol. 24, no. 1-2, pp. 37–44.
94. Fedorov A.V., Shabunina M.V., Barakova N.V. *Vestnik VNIIZh*, 2021, no. 1-2, pp. 18–24. (in Russ.).
95. Subiria-Cueto R., Coria-Oliveros A.J., Wall-Medrano A., Rodrigo-Garcia J., González-Aguilar G.A., Martínez-Ruiz N.D.R., Alvarez-Parrilla E. *Food Science and Technology*, 2021, vol. 42, ctaAR57520. <https://doi.org/10.1590/fst.57520>.
96. Lee M.H. *Culinary Science & Hospitality Research*, 2022, vol. 28, no. 9, pp. 14–23. <https://doi.org/10.20878/cshr.2022.28.9.002>.
97. Mendez-Trujillo V., Romero M.R., Mendoza D.G., Ibarra M.N., Pavon D.R. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 23–31.
98. dos Santos P.C.M., da Silva L.M.R., Magalhaes F.E.A., Cunha F.E.T., Ferreira M.J.G., de Figueiredo E.A.T. *Applied Food Research*, 2022, vol. 2, no. 2, article 100186. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100186>.
99. Hernández-Montesinos I.Y., Carreón-Delgado D.F., Ocaranza-Sánchez E., Ochoa-Velasco C.E., Suárez-Jacobo Á., Ramírez-López C. *International Journal of Food Science and Technology*, 2023, vol. 58, no. 12, pp. 6794–6805. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16652>.
100. Bonilla-Luque O.M., Silva B.N., Ezzaky Y., Possas A., Achemchem F., Cadavez V., Gonzales-Barron U., Valero A. *Food Research International*, 2024, vol. 188, article 114408. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114408>.
101. Ifesan B.O.T., Fadipe E.A., Ifesan B.T. *Journal of Scientific Research and Reports*, 2014, vol. 3, no. 5, pp. 711–721. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2014/5726>.
102. Ucak İ., Fadiloğlu E.E. *Progress in Nutrition*, 2020, vol. 22, no. 3, article e2020047. <https://doi.org/10.23751/pn.v22i3.10073>.
103. 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.ceja.2021.100239>.
104. 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.).
105. Bankole D.T., Oluyori A.P., Inyinbor A.A. *Arabian Journal of Chemistry*, 2023, vol. 16, no. 5, article 104699. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104699>.
106. Shaikhiev I.G., Sverguzova 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>.
107. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Sverguzova S.V. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 12689–12705. <https://doi.org/10.33263/BRIAC115.1268912705>.
108. 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.).
109. Shaykhiyeva K.I., Stepanova S.V., Shaykhiyev I.G., Sverguzova S.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2024, no. 3, pp. 49–70. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240313555>. (in Russ.).
110. 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.).
111. Karabayeva M.I., Mirsalimova S.R., Salikhanova D.S., Mamadaliyeva S.V., Ortikova S.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2022, no. 1, pp. 53–69. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2022019956>. (in Russ.).
112. Shaykhiyeva K.I., Fridland S.V., Sverguzova S.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2021, no. 4, pp. 47–64. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021049125>. (in Russ.).
113. Shaikhiev I.G., Sverguzova S.V., Shaikhieva K.I., Deberdeev T.R. *Polymer Science, Series D*, 2023, vol. 16, no. 3, pp. 651–656. <https://doi.org/10.1134/S1995421223030346>.
114. Kallel F., Chaabouni S.E. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2017, vol. 36, no. 6, pp. 1765–1777. <https://doi.org/10.1002/ep.12649>.
115. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Sverguzova S.V. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 4518–4528. <https://doi.org/10.33263/BRIAC124.45184528>.
116. Sun J., Li X., Ai X., Liu J., Yin Y., Huang Y., Zhou H., Huang K. *Environmental Science & Pollution Research*, 2018, vol. 25, pp. 19001–19011. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2109-9>.
117. Sun J., Yin L., Huang K., Li X., Ai X., Huang Y., Yin Y., Liu J. *RSC Advances*, 2018, vol. 8, pp. 28284–28292. <https://doi.org/10.1039/c8ra03502d>.
118. Abu-Shahba M.S., Mansour M.M., Mohamed H.I., Sofy M.R. *Scientia Horticulturae*, 2022, vol. 293, article 110727. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110727>.
119. Saigl Z.M., Aloufi E.E. *Desalination and Water Treatment*, 2023, vol. 294, pp. 149–161. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29569>.
120. Chowdhury A., Bhowal A., Datta S. *Water*, 2012, vol. 4, pp. 37–51. <https://doi.org/10.14294/WATER.2012.4>.
121. Geetha, K.S., Belagali, S.L. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2010, vol. 9, no. 2, pp. 323–327.
122. Liu W., Liu Y., Tao Y., Yu Y., Jiang H., Lian H. *Environmental Science & Pollution Research*, 2014, vol. 21, pp. 2054–2063. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2112-0>.
123. Chang Q., Li P., Han Y., Guan X., Xiong J., Li Q., Zhang H., Huang K., Zhang X., Xie H., Qi T. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, vol. 11, no. 3, article 109997. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109997>.
124. Wang Y., Huang K. *Environmental Science & Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 33692–33702. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09309-8>.

125. Liang S., Guo X., Tian Q. *Desalination and Water Treatment*, 2013, vol. 51, no. 37-39, pp. 7166–7171. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.769919>.
126. Soleymani-Bonoti F., Kazemi D., Hajimiri I., Imani A. *Fine Chemical Engineering*, 2024, pp. 304–318. <https://doi.org/10.37256/fce.5220244604>.
127. Negi R., Satpathy G., Tyagi Y.K., Gupta R.K. *International Journal of Environment and Pollution*, 2012, vol. 49, no. 3-4, pp. 179–196.
128. Sun J., Xiu Y., Huang K., Yu J., Alam S., Zhua H., Guo Z. *RSC Advance*, 2018, vol. 8, pp. 22276–22285. <https://doi.org/10.1039/c8ra03203c>.
129. Huang K., Shao J.G., Zhu H.M., Inoue K. *Journal of Central South University*, 2011, vol. 18, pp. 1448–1453. <https://doi.org/10.1007/s11771-011-0860-x>.
130. Zhang Y., Xiong L., Xiu Y., Huang K. *Microchemistry Journal*, 2019, vol. 145, pp. 476–485. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.11.007>.
131. Hameed B.H., Ahmad A.A. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 164, pp. 870–875. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.084>.
132. Zhao Y., Zhu L., Li W., Liu J., Liu X., Huang K. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 293, article 111516. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111516>.
133. Asfaram A., Fathi M.R., Khodadoust S., Naraki M. *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, vol. 127, pp. 415–421. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.02.092>.
134. Abbas S.H., Ridha A.M., Rashid K.H., Khadom A.A. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, vol. 20, no. 12, pp. 13845–13858. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04986-7>.
135. Pulikkal A.K., Laskar N., Anjudikkal J. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2024, vol. 45, no. 4, pp. 799–809. <https://doi.org/10.1080/01932691.2023.2181180>.
136. Alamzeb M., Tullah M., Ali S., Ihsanullah, Khan B., Setzer W.N., Al-Zaqri N., Ibrahim M.N.M. *Water*, 2022, vol. 14, no. 22, article 3713. <https://doi.org/10.3390/w14223713>.
137. Muthamilselvi P., Karthikeyan R., Kumar B.S.M. *Desalination and Water Treatment*, 2016, vol. 57, no. 5, pp. 2089–2103. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.979237>.
138. Muthamilselvi P., Karthikeyan R., Kapoor A., Prabhakar S. *International Journal of Industrial Chemistry*, 2018, vol. 9, pp. 379–390. <https://doi.org/10.1007/s40090-018-0166-z>.
139. Zhao Y., Li W., Liu J., Huang K., Wu C., Shao H., Chen H., Liu X. *Chemical Engineering Journal*, 2017, vol. 326, pp. 745–755. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.139>.
140. Zhao Y., Li W., Liu Z., Liu J., Zhu L., Liu X., Huang K. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, vol. 6, no. 11, pp. 15264–15272. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03739>.

Received September 9, 2025

Revised October 11, 2025

Accepted February 26, 2026

Сведения об авторах

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

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

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

Фазуллина Алсу Асгатовна – кандидат химических наук, доцент кафедры инженерной экологии, rialai@mail.ru

Святченко Анастасия Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии, sv.anastasiasa@mail.ru

Information about authors

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

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

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

Fazullina Alsu Asgatovna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Environmental Engineering, rialai@mail.ru

Svyatchenko Anastasia Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Ecology, sv.anastasiasa@mail.ru