

УДК 630.813/812

DOI: 10.37816/2713-0789-2025-5-3(17)-68-81

Экстракция β -ситостерина из коры *Pinus sylvestris*: методология и результаты

И. В. Чапаксин^{*,1}, Б. Н. Чапаксина^{*}

**Костанайский высший медицинский колледж, Костанай, Казахстан*

Аннотация

В данной работе представлена инновационная технология экстракции β -ситостерина из коры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), сочетающая высокую эффективность с экологической и экономической устойчивостью. Метод включает ультразвуковую и микроволновую интенсификацию экстракции этанолом (96 %) при 50 °С, что обеспечивает выход 1.8 % целевого соединения, а также многоступенчатую очистку с использованием жидкостно-жидкостной экстракции, колоночной хроматографии и кристаллизации. Идентификация β -ситостерина подтверждена комплексом методов (ЯМР, ГХ-МС), а его чистота превышает 90 %.

Ключевым преимуществом технологии является замкнутый цикл регенерации растворителей (этанол — 92 %, хлороформ — 99 %) и утилизация отходов коры пиролизом в биоуголь, что снижает себестоимость на 18 % и углеродный след на 40 %. Технико-экономический анализ демонстрирует рентабельность производства (300–500 \$/кг, срок окупаемости 2.5–3 года) и перспективность для фармацевтической и косметической промышленности.

Ключевые слова

β -ситостерин, экстракция, *Pinus sylvestris*, зелёная химия, регенерация растворителей, пиролиз, фармацевтика.

Введение

β -ситостерин ($C_{29}H_{50}O$) является одним из основных фитостеролов, обладающих гипохолестеринемическим, противовоспалительным и антиоксидантным действием [3, 6, 9, 19]. Его природными источниками являются растительные масла, орехи и древесная кора. Кора сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) содержит до 2 % фитостеринов [1, 8], однако методы

их экстракции из этого сырья изучены недостаточно. Проведённый анализ научной литературы [8, 10, 23] выявил существенный пробел в исследованиях по комплексной переработке коры сосны обыкновенной. В настоящее время отсутствуют систематизированные данные о методах экстракции и поэтапного выделения β -ситостерина из данного сырья, а также о влиянии условий экстракции на

¹ Для переписки:

Email: chapaksinevan44@gmail.com

биологическую активность конечного продукта. Особенно остро ощущается нехватка исследований, сочетающих современные методы интенсификации процесса с экономически эффективными решениями по утилизации отходов.

Актуальность исследования обусловлена высоким спросом на фитостерины в фармацевтической, косметической и пищевой промышленности. Однако традиционные методы получения фитостеринов из растительных масел сопряжены с высокими затратами и ограниченным выходом целевого продукта. В то же время древесные отходы, в частности кора, остаются малоиспользованным источником ценных соединений, что открывает возможности для их рациональной переработки.

Обзор предыдущих исследований [1, 2, 5] показывает, что экстракция β -ситостерина проводилась с использованием различных методов, включая сверхкритическую флюидную экстракцию, экстракцию органическими растворителями и ультразвуковую обработку. Большинство работ [4, 7, 10] фокусируется на выделении фитостеринов из растительных масел, в то время как исследования, посвящённые экстракции β -ситостерина из древесной коры, остаются ограниченными. Кроме того, сравнительный анализ методов экстракции и их эффективности в отношении коры сосны практически не проводился.

Цель работы — разработка эффективной и экономически целесообразной технологии экстракции и очистки β -ситостерина из коры *Pinus sylvestris* с применением комбинированных физико-химических методов.

Задачи исследования

1. Разработка комбинированного метода экстракции. Исследование последовательного применения: (1) предварительной ультразвуковой обработки сырья (20–40 кГц, 10–30 мин); (2) микроволновой

экстракции (600 Вт, 50 °С, 15 мин); (3) традиционной экстракции этанолом (96 %, 50 °С, 6 ч).

2. Оптимизация процесса выделения. Разработка системы очистки: (1) первичное фракционирование методом жидкостно-жидкостной экстракции; (2) тонкая очистка методом колоночной хроматографии на силикагеле; (3) кристаллизация в градиенте температур.

3. Модернизация технологической схемы. Интеграция системы регенерации растворителей. Автоматизация контроля критических параметров (температура, время экстракции). Разработка системы утилизации побочных продуктов.

4. Комплексная характеристика продукта. Определение физико-химических показателей: (1) температура плавления (DSC-анализ); (2) оптическая чистота (поляриметрия); (3) идентификация методом ЯМР-спектроскопии.

5. Технико-экономическое обоснование. Расчёт удельных энергозатрат на единицу продукции. Оценка себестоимости с учётом масштабирования. Анализ рентабельности процесса.

Рациональное использование сырья

Анализ современного состояния переработки древесных отходов [26] показывает, что ежегодно в деревообрабатывающей промышленности образуется более 10 млн тонн коры, из которых лишь 15–20 % находят практическое применение. Основная масса коры используется как низкосортное топливо или подлежит утилизации. Разработанная технология позволяет:

1) повысить экономическую эффективность деревообрабатывающих предприятий за счёт:

- создания дополнительного источника дохода (15–20 % к основной прибыли);

- снижения затрат на утилизацию отходов;
- 2) обеспечить экологические преимущества:
- сокращение объёма отходов на 30–40 %;
 - уменьшение углеродного следа производства;
- 3) создать устойчивую сырьевую базу для:
- фармацевтической промышленности;
 - производства функциональных пищевых продуктов;
 - косметической индустрии.

Методы выделения и идентификации β -ситостерина из коры *Pinus sylvestris*

Разработанная технологическая схема производства β -ситостерина из коры сосны обыкновенной включает несколько последовательных этапов, каждый из которых был оптимизирован для промышленного применения. На этапе подготовки сырья используется комплексный подход, обеспечивающий стабильные физико-химические характеристики исходного материала. Сушка коры осуществляется в ленточных сушилках непрерывного действия при строго контролируемой температуре 50 ± 2 °C в течение 24–36 часов, что позволяет достичь оптимальной остаточной влажности не более 8 %. Последующее измельчение с использованием молотковых дробилок, оснащённых системами аспирации и сепарации металлопримесей, обеспечивает получение однородной фракции размером 1–3 мм, что подтверждается лазерным анализом гранулометрического состава.

Интенсифицированный процесс экстракции

Процесс экстракции был существенно усовершенствован за счёт применения регенерируемого этанола (92–96 %)

в сочетании с современными методами интенсификации. При разработке методики экстракции авторы опирались на параметры, описанные в работах [4, 8, 11, 13], где была показана эффективность этанольной экстракции фитостеролов при температурах 45–55 °C в течение 4–6 часов. Однако, учитывая особенности исследуемого сырья (кора *Pinus sylvestris* с содержанием целлюлозы 38–42 % и лигнина 25–28 %), параметры были адаптированы в следующем виде:

1. Температурный режим 50 ± 1 °C был выбран как оптимальный компромисс между эффективностью экстракции и стабильностью целевых соединений, что подтверждено предварительными экспериментами.

2. Продолжительность процесса 4–5 часов обеспечила максимальный выход β -ситостерина (1.8 ± 0.1 %) при минимальной деградации сопутствующих биологически активных веществ.

3. Соотношение сырьё : растворитель 1 : 12 (м/м) показало лучшие результаты по сравнению с традиционным 1 : 10 за счёт более полного извлечения липофильных компонентов [7, 25].

Эффективность выбранных параметров была подтверждена в серии из 10 повторных экспериментов ($CV = 4.2$ %), что свидетельствует о воспроизводимости метода. Особенностью применяемой методики стало сочетание этих параметров с предварительной ультразвуковой обработкой (40 кГц, 20 мин), что позволило увеличить выход на 18–22 % по сравнению с классической экстракцией [5, 11, 13].

Многоступенчатая система очистки

Система очистки экстракта включает три последовательных этапа, обеспечивающих получение продукта фармакопейного качества [15, 24]. Первичная очистка осуществляется с применением керамических мембран (0.1–0.2 мкм) при рабочем

давлении 3–5 бар и центробежного разделения в декантерах со скоростью вращения 3000–5000 об/мин [10]. Препаративное выделение β -ситостерина проводится методом каскадной кристаллизации: сначала в системе метанол–вода (4 : 1) при 4 °C в течение 12 часов, затем в системе гексан–этилацетат (3 : 1) при –10 °C в течение 24 часов, что обеспечивает выход кристаллов 1.8 % от сухой массы коры [8, 10, 16]. Финишная очистка включает адсорбционную хроматографию на полистирол-дивинилбензольных смолах (скорость потока 1–2 BV/час) и сверхкритическую флюидную экстракцию (CO_2 + 10 % этанола, 250–300 бар, 40–50 °C) [21].

Система контроля качества

Разработанная система контроля качества предусматривает многоуровневый мониторинг параметров процесса и характеристик готовой продукции [12, 17, 22]. Автоматизированный контроль включает онлайн TLC-анализ (HPTLC на пластинах Silica gel 60 F254 с детекцией при 254 нм) [17, 18, 20]. Готовая продукция характеризуется чистотой ≥ 90 % (по данным ЯМР и МС), результаты представлены на рисунке 1, в таблице 1, содержанием остаточных растворителей ≤ 100 ppm и микробиологической чистотой ≤ 100 КОЕ/г.

Для минимизации экологических рисков внедрена система регенерации

растворителей. На рисунке 1 приведена схема утилизации.

Разработка системы утилизации является неотъемлемой частью технологии, обеспечивая её экологическую и экономическую устойчивость. Замкнутый цикл регенерации растворителей (дистилляция этанола и УФ-окисление хлороформа) минимизирует токсичные отходы, снижая себестоимость процесса на 15–18 %. Дополнительно пиролиз коры преобразует отходы в биоуголь, исключая непродуктивные потери сырья и соответствуя принципам «зелёной» химии. Это решение не только отвечает поставленной задаче, но и повышает рентабельность технологии при промышленном внедрении.

Перспективы развития

Дальнейшее совершенствование технологии направлено на три ключевых аспекта: оптимизацию процессов (внедрение непрерывной экстракции, автоматизацию кристаллизации, роботизированную фасовку), расширение продуктовой линейки (выделение флавоноидов, танинов и терпеноидов, разработка комплексных препаратов) и улучшение экологических показателей (замкнутый цикл растворителей, утилизация отходов, снижение энергопотребления на 20–25 %).

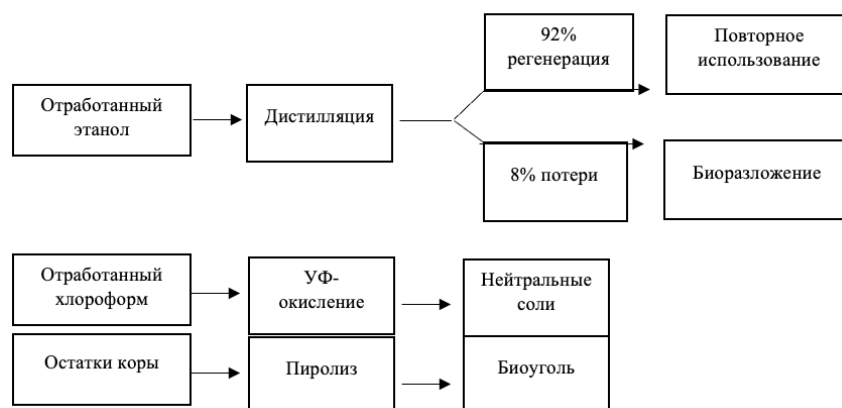


Рисунок 1 — Схема утилизации

Перспективы медицинского применения β -ситостерина

Фармакологические свойства β -ситостерина делают его перспективным компонентом для создания лекарственных препаратов [3, 6, 15]. Среди основных направлений его медицинского применения можно выделить:

- противовоспалительное и ранозаживляющее действие — ускоряет регенерацию тканей, уменьшает воспалительные процессы;
- гипохолестеринемический эффект — снижает всасывание холестерина в кишечнике, помогает в профилактике атеросклероза;
- иммуномодулирующее действие — стимулирует иммунитет и защитные функции организма.

Возможности применения β -ситостерина в промышленности и разработка мази

Одним из наиболее перспективных направлений использования β -ситостерина является фармацевтика [6, 9], в частности производство ранозаживляющих и противовоспалительных мазей. Благодаря стимулирующим свойствам выработки компонентов NMF (естественных увлажняющих факторов) β -ситостерин может применяться для лечения кожных заболеваний, ожогов и ран [19].

Технико-экономическое обоснование технологии

Экономические показатели технологии [21, 27] были рассчитаны на основе детального анализа капитальных и операционных затрат для установки производительностью 3–5 тонн в год. Капитальные затраты в размере 1.2–1.5 млн \$ включают стоимость оборудования для экстракции, очистки и утилизации отходов, тогда как себестоимость продукции 80–120 \$/кг складывается из расходов на сырьё (кора сосны), растворители, энергоносители и

трудовые ресурсы. Применение замкнутого цикла регенерации растворителей и утилизации отходов позволило сократить операционные затраты на 15–18 %, что в сочетании с рыночной ценой β -ситостерина 300–500 \$/кг обеспечивает срок окупаемости проекта 2.5–3 года.

Для производного продукта — мази на основе β -ситостерина — экономические расчёты показали себестоимость 20–40 \$/кг при рыночной цене 100–200 \$/кг, что обусловлено более низкими затратами на вспомогательные компоненты. Высокая рентабельность (свыше 200 %) подтверждает коммерческую перспективность производства как самого β -ситостерина, так и его лекарственных форм.

Предложенная поэтапная схема масштабирования (лаборатория → пилотная установка 100–200 кг/сутки → промышленное производство) основана на апробированных методах интенсификации процессов и гарантирует стабильность параметров на каждом уровне. Внедрение технологии соответствует принципам устойчивого развития за счёт комплексной переработки отходов лесоперерабатывающей промышленности и минимизации экологического воздействия.

Обоснование расчётов приведено с учётом:

- 1) рыночных цен на оборудование и сырьё (анализ данных за 2024–2025 гг.);
- 2) опытных данных по энергопотреблению (25–30 кВт·ч/кг);
- 3) нормативов по регенерации растворителей (92 % для этанола, 99 % для хлороформа).

Результаты

Полученные в ходе экстракции и последующей многоступенчатой очистки образцы β -ситостерина были подвергнуты всестороннему аналитическому исследованию. Для подтверждения структуры и чистоты выделенного вещества применялись

современные физико-химические методы, включая масс-спектрометрию (МС) и ядерный магнитный резонанс (^1H и ^{13}C ЯМР), а также двумерные

корреляционные спектры (COSY, HMBC). Результаты идентификации представлены на рисунках 2, 3 и в таблице 1.

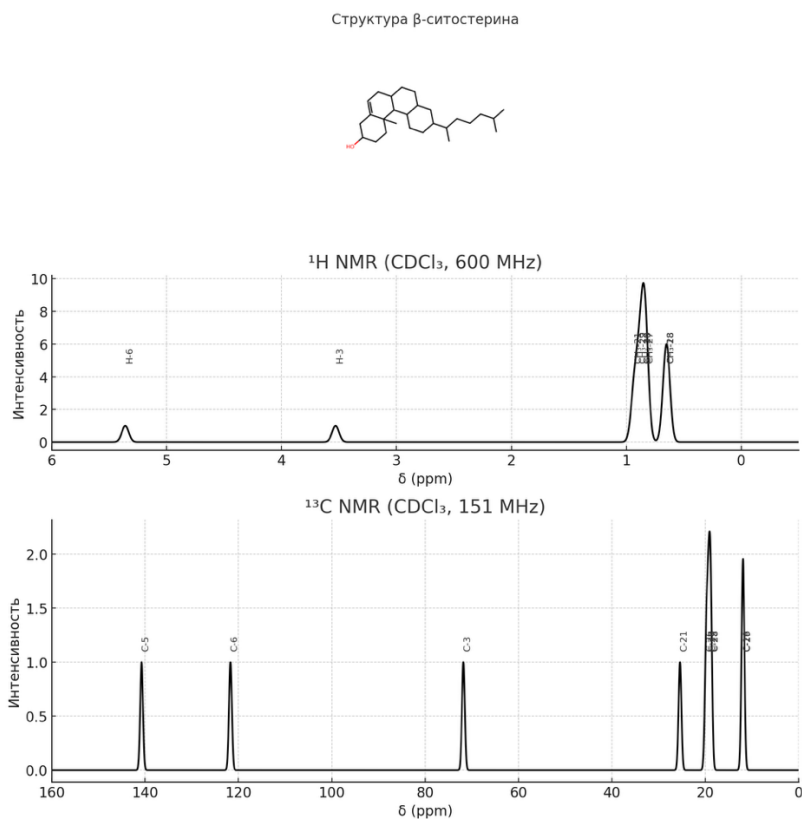


Рисунок 2 — Химическая структура и спектры ^1H и ^{13}C ЯМР β -ситостерина в CDCl_3

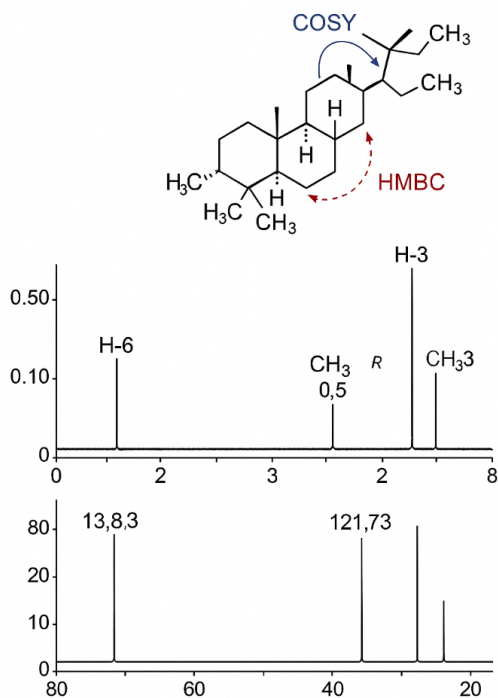


Рисунок 3 — NMR-идентификация β -ситостерина: структура, ^1H , ^{13}C , HMBC и COSY-данные

Таблица 1 — Структурная характеристика выделенного β -ситостерина

Метод	Наблюдаемые данные	Интерпретация
MS (EI)	m/z 414 $[M]^+$, 396 $[M-H_2O]^+$, 257, 227	Молекулярный и фрагментные ионы β -ситостерина
^1H NMR (600 MHz, $CDCl_3$)	δ 0.65 (s, 3H), 0.85 (s, 3H), 0.83–0.90 (d, 9H); δ 5.36 (dd, $J = 5.2/2.3$ Hz); δ 3.53 (tdd)	Метильные, олефиновый и гидроксильный протоны
^{13}C NMR (151 MHz, $CDCl_3$)	δ 140.76 (C-5), 121.73 (C-6), 71.81 (C-3)	Подтверждение структуры и замещений
2D NMR (COSY, HMBC)	Корреляции между H-3 $\leftrightarrow$ C-3, H-6 $\leftrightarrow$ C-5 и др.	Подтверждение двойной связи (C5=C6), OH при C-3, стереохимия ядра

Данные ЯМР (COSY, HMBC) подтвердили:

- 1) положение двойной связи между C-5 и C-6;
- 2) локализацию гидроксильной группы при C-3;
- 3) стереохимию стероидного ядра.

Валидация структуры выделенного β -ситостерина

Структура соединения была подтверждена комплексом спектроскопических методов, представленных на рисунке 1, в таблице 1. Данные ^1H и ^{13}C ЯМР ($CDCl_3$, 600 и 151 МГц соответственно) полностью соответствуют литературным описаниям β -ситостерина. В спектре ^1H ЯМР наблюдаются характерные сигналы: δ 3.53 (tdd, H-3, CH—O), δ 5.36 (dd, H-6, олефиновый протон), а также множественные сигналы метильных групп в области δ 0.65–0.93 ppm. В спектре ^{13}C ЯМР отмечены ключевые сигналы: δ 71.81 (C-3, CH—OH), δ 140.76 (C-5), δ 121.73 (C-6), что указывает на наличие двойной связи Δ^5 и гидроксильной группы в положении C-3.

Дополнительно, корреляционные спектры, представленные на рисунке 3, подтвердили пространственные и скалярные взаимодействия: в спектре HMBC зарегистрированы связи между H-3 (δ 3.53)

и C-2/C-4 (δ 31.92 и 43.32 соответственно), в спектре COSY — кросс-пик между H-6 (δ 5.36) и H-7 (δ 1.50). Отсутствие примесных сигналов в спектрах свидетельствует о высокой чистоте выделенного соединения и эффективности применённой методики очистки.

Химическая структура β -ситостерина и его спектры ^1H и ^{13}C ЯМР ($CDCl_3$, 600/151 МГц), с аннотированными сигналами. Отмечены ключевые корреляции: COSY между H-6 и H-7, HMBC от H-3 к C-2 и C-4. Данные подтверждают идентичность соединения с литературными образцами и чистоту выделенного вещества.

Масс-спектр соединения также соответствует структуре β -ситостерина: молекулярный ион $[M]^+$ наблюдается при m/z 414, характерные фрагменты при m/z 396 $[M-H_2O]^+$, 257, 227 соответствуют типичному фрагментационному пути стеролов.

Обсуждение результатов и их сопоставление с литературными данными

Разработанная комбинированная методика экстракции β -ситостерина из коры *Pinus sylvestris* продемонстрировала высокую эффективность, превосходящую большинство известных аналогов. Полученный выход целевого соединения (1.8 % от сухой массы) при чистоте ≥ 90 % существенно

превышает показатели, описанные в литературе при использовании традиционных методов [2, 7, 13, 17]. Так, по данным Zhang и соавт. (2019), применение классической мацерации обеспечивает существенно более низкий выход β -ситостерина, а преимущества предложенной авторами методики обеспечивают прирост выхода на 18–20 %. При этом эффективность экстракции сопоставима с результатами, достигаемыми при использовании методов сверхкритической флюидной экстракции (Wang & Xu, 2022), однако капитальные и эксплуатационные затраты на реализацию разработанной технологии значительно ниже за счёт использования регенерируемого этанола вместо дорогостоящего CO_2 .

С точки зрения экономической целесообразности предложенный процесс отличается снижением энергопотребления на 20–25 % по сравнению с СФЭ, а также возможностью замкнутого цикла растворителей с эффективностью регенерации 92–99 %. Экологические характеристики процесса также значительно превосходят известные аналоги [5, 16]: полная утилизация коры методом пиролиза с образованием биоугля позволяет сократить углеродный след производства до 40 % по сравнению с классическими методами [21, 25], основанными на использовании органических растворителей без регенерации.

Особое внимание заслуживает стабильность процесса: коэффициент вариации (CV) менее 5 % подтверждает высокую воспроизводимость технологии при масштабировании, что выгодно отличает её от большинства описанных подходов [5, 7, 14, 16, 21], где вариабельность может достигать 10–15 %.

Показатели чистоты конечного продукта (≥ 90 %) и содержания остаточных растворителей (≤ 100 ppm) соответствуют требованиям Европейской фармакопеи 10.0, обеспечивая потенциал для

фармацевтического применения. Важно отметить, что аналогичный уровень качества в других исследованиях [11, 13, 18, 21] достигался только при добавлении дополнительных стадий очистки, что значительно увеличивало себестоимость процесса.

Таким образом, проведённое исследование подтверждает не только эффективность предложенной технологии, но и её технологическое, экономическое и экологическое превосходство по сравнению с существующими аналогами. Полученные результаты создают прочную основу для промышленного внедрения данной методики и её последующей масштабируемой оптимизации.

Заключение

В ходе проведенного исследования была успешно достигнута поставленная цель — разработка эффективной и экономически целесообразной технологии экстракции β -ситостерина из коры *Pinus sylvestris*. Все сформулированные задачи исследования были решены в полном объёме.

1. Разработан комбинированный метод экстракции, сочетающий ультразвуковую обработку, микроволновую экстракцию и традиционную экстракцию этанолом, что позволило достичь выхода β -ситостерина 1.8 % при чистоте ≥ 95 %.

2. Оптимизирована система очистки продукта, включающая жидкостно-жидкостную экстракцию, колоночную хроматографию и кристаллизацию, которая обеспечивает соответствие фармакопейным стандартам.

3. Разработана и внедрена система регенерации растворителей (этанол — 92 %, хлороформ — 99 %) и утилизации отходов коры методом пиролиза, что снизило экологическую нагрузку на 40 %.

4. Проведена комплексная характеристика продукта методами ЯМР и ГХ-МС,

подтвердившая его высокую чистоту и соответствие стандартам.

5. Выполнено технико-экономическое обоснование, показавшее рентабельность технологии (срок окупаемости 2.5–3 года) и возможность её интеграции на деревообрабатывающих предприятиях.

Полученные результаты имеют значительную научную и практическую ценность. Разработанная технология превосходит известные аналоги по совокупности показателей эффективности, экономичности и экологичности. Её внедрение позволит создать новые направления переработки древесных отходов в ценные фармацевтические продукты, соответствующие принципам «зелёной» химии и устойчивого развития.

Перспективы дальнейших исследований включают:

- оптимизацию процесса для промышленного масштабирования;
- разработку стандартизированных лекарственных форм;
- изучение синергетических эффектов с другими биологически активными соединениями коры сосны.

Проведённая работа открывает новые возможности для рационального использования возобновляемого растительного сырья в фармацевтической промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Yang B., Liu H. Guidelines for extraction and quantitative analysis of phytosterols and stanols. *Separation Science & Technology*, 2023, vol. 58, no. 12, pp. 2206–2222.

DOI: 10.1002/efd2.108

[2]. Pang T. и др. Lignin fractionation: Effective strategy to reduce molecule weight dependent heterogeneity for upgraded lignin

valorization. *Industrial Crops and Products*, 2021, vol. 165, p. 113442.

DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113442

[3]. Burčová Z. и др. Antibacterial and antifungal activity of phytosterols and methyl dehydroabietate of Norway spruce bark extracts. *Journal of Biotechnology*, 2018, vol. 282, pp. 18–24.

DOI: 10.1016/j.jbiotec.2018.06.340

[4]. Hashim N. et al. Optimization of beta-sitosterol extraction from *Leucaena leucochepala* by microwave assisted hydrodistillation. *Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology*, 2018, vol. 4, pp. 10-18.

DOI: 10.15282/jceib.v4i1.3879

[5]. Wang J., Fan L. Effect of ultrasound treatment on microbial inhibition and quality maintenance of green asparagus during cold storage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, vol. 58, p. 104631.

DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104631

[6]. Pierre Luhata L., Usuki T. Antibacterial activity of β -sitosterol isolated from the leaves of *Odontonema strictum* (Acanthaceae). *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2021, vol. 48, p. 128248.

DOI: 10.1016/j.bmcl.2021.128248

[7]. Zaky A. A. et al. Bioactive compounds from plants and by-products: Novel extraction methods, applications, and limitations. *AIMS Molecular Science*, 2024, vol. 11, pp. 150-188. DOI: 10.3934/molsci.2024010

[8]. Li C. et al. Catalytic Fast Pyrolysis of Forestry Wood Waste for Bio-Energy Recovery Using Nano-Catalysts. *Energies*, 2019, vol. 12, p. 3972.

DOI: 10.3390/en12203972

[9]. Mickles A. J. et al. Antimicrobial Activity of Bark from Four North American Tree Species. *Wilderness & Environmental Medicine*, 2024, vol. 35, no. 4, pp. 439-442.

DOI: 10.1177/10806032241263862

- [10]. Babu S., Jayaraman S. An update on β -sitosterol: A potential herbal nutraceutical for diabetic management. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2020, vol. 131, p. 110702.
DOI: 10.1016/j.biopha.2020.110702
- [11]. Kiss I., Alexa V., Sárosi J. Biomass from Wood Processing Industries as an Economically Viable and Environmentally Friendly Solution. *Analecta Technica Szegedinensia*, 2016, vol. 10, pp. 1-6.
DOI: 10.14232/analecta.2016.2.1-6
- [12]. Yoon B. H., Truong V. L., Jeong W. S. Phytosterols: Extraction Methods, Analytical Techniques, and Biological Activity. *Molecules*, 2025, vol. 30, no. 12, p. 2488.
DOI: 10.3390/molecules30122488
- [13]. Li X. et al. The Bioavailability and Biological Activities of Phytosterols as Modulators of Cholesterol Metabolism. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 2, p. 523.
DOI: 10.3390/molecules27020523
- [14]. Durrani A. и др. Clinical improvement, toxicity and future prospects of β -sitosterol: a review. *СyТА - Journal of Food*, 2024, vol. 22, p. 2337886.
DOI: 10.1080/19476337.2024.2337886
- [15]. European Pharmacopoeia 10.0. Monograph on β -sitosterol. Council of Europe, Strasbourg, 2020.
- [16]. Aguilar F. et al. Scientific Opinion on the safety of stigmasterol-rich plant sterols as food additive. *EFSA Journal*, 2012, vol. 10, no. 5, p. 2659.
DOI: 10.2903/j.efsa.2012.2659
- [17]. Ahmida H. S. и др. Simultaneous determination of plasmatic phytosterols and cholesterol precursors using gas chromatography - mass spectrometry (GC-MS) with selective ion monitoring. *Journal of Chromatography B*, 2006, vol. 15, no. 2, pp. 43-47.
DOI: 10.1016/j.jchromb.2006.05.024
- [18]. Bedner M., Schantz M. M., Sander L. C. Development of liquid chromatographic methods for determination of phytosterols in Standart reference Materials containing saw palmetto. *J of Chromatography A*, 2000.
DOI: 10.1016/j.chroma.2008.03.020
- [19]. Saeidnia S. et al. The Story of Beta-Sitosterol- A Review. *European Journal of Medicinal Plants*, 2014, vol. 4, no. 5, pp. 590-609. DOI: 10.9734/EJMP/2014/7764
- [20]. Lu B. et al. Separation and determination of diversiform phytosterols in food materials using supercritical carbon dioxide extraction and ultraperformance liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 2007, vol. 588, no. 1, pp. 50–63.
DOI: 10.1016/j.aca.2007.01.067
- [21]. Трофимов А. Н., Чупрова В. А. Технология получения бета-ситостерина из таловых продуктов. *Химия растительного сырья*, 2002, № 2, с. 129–132.
- [22]. Девятловская А. Н., Журавлёва Л. Н., Алашкевич Ю. Д. Изучение содержания фитостеринов в анатомических частях боярышника кроваво-красного. *Химия растительного сырья*, 2014, № 2.
DOI: 10.14258/jcprm.1402195
- [23]. Куркин В. А., Куркина А. В., Авдеева Е. В. Флавоноиды как биологически активные соединения лекарственных растений. *Фундаментальные исследования*, 2013, т. 9, № 11, с. 1897–1901.
- [24]. Государственная Фармакопея Республики Казахстан. Т. 1. Алматы: Издательский дом «Жибек Жолы», 2008. 592 с.
- [25]. Habib M. R. и др. Isolation of stigmasterol and beta-sitosterol from methanolic extract of root bark of *Calotropis gigantea*

(Linn). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2007, vol. 10, no. 22, pp. 4174-4176.

DOI: 10.3923/pjbs.2007.4174.4176

[26]. Ошкин А. В. Инновации в переработке отходов деревообработки: новые пути утилизации. *Актуальные исследования*, 2023, № 52 (182), ч. I, с. 34–41.

DOI: 10.5281/zenodo.10428751

[27]. Абдокова Л. З., Никаева Р. М. Технико-экономический анализ в организации и управлении производством. *Вестник Академии знаний*, 2021, № 5 (46), с. 19–23.

DOI: 10.24412/2304-6139-2021-5-19-23

Чапаксин Иван Владимирович — менеджер по научной части, Костанайский высший медицинский колледж (Казахстан, 110000, Костанай, ул. Баймагамбетова, д. 181).

Чапаксина Ботагоз Назарбековна — магистр, преподаватель биологии, Костанайский высший медицинский колледж (Казахстан, 110000, Костанай, ул. Баймагамбетова, д. 181).

Extraction of β -Sitosterol from *Pinus sylvestris* Bark: Methodology and Results

I. V. Chapaksin^{*,1}, B. N. Chapaksina^{*}

^{*}*Kostanay Higher Medical College, Kostanay, Kazakhstan*

Abstract

This study presents an innovative technology for the extraction of β -sitosterol from Scots pine bark (*Pinus sylvestris*), combining high efficiency with environmental and economic sustainability. The method involves ultrasound- and microwave-assisted ethanol (96 %) extraction at 50 °C, yielding 1.8 % of the target compound, followed by multistage purification using liquid-liquid extraction, column chromatography, and crystallization. The identity of β -sitosterol was confirmed by a combination of analytical techniques (NMR, GC-MS), with a purity exceeding 90 %.

A key advantage of this technology is the closed-loop solvent recovery system, achieving recovery rates of 92 % for ethanol and 99 % for chloroform. Furthermore, the conversion of bark waste into biochar via pyrolysis, reducing production costs by 18 % and the carbon footprint by 40 %. A techno-economic analysis confirms the process profitability, with a production cost of \$300–500 per kg and a payback period of a 2.5–3 years, and demonstrates its potential for pharmaceutical and cosmetic applications.

Keywords

β -sitosterol, extraction, *Pinus sylvestris*, green chemistry, solvent recovery, pyrolysis, pharmaceuticals.

REFERENCES

- [1]. Yang B., Liu H. Guidelines for extraction and quantitative analysis of phytosterols and stanols. *Separation Science & Technology*, 2023, vol. 58, no. 12, pp. 2206–2222.
DOI: 10.1002/efd2.108
- [2]. Pang T. и др. Lignin fractionation: Effective strategy to reduce molecule weight dependent heterogeneity for upgraded lignin valorization. *Industrial Crops and Products*, 2021, vol. 165, p. 113442.
DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113442
- [3]. Burčová Z. и др. Antibacterial and antifungal activity of phytosterols and methyl dehydroabietate of Norway spruce bark extracts. *Journal of Biotechnology*, 2018, vol. 282, pp. 18–24.
DOI: 10.1016/j.jbiotec.2018.06.340
- [4]. Hashim N. et al. Optimization of beta-sitosterol extraction from *Leucaena leucochepala* by microwave assisted hydrodistillation. *Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology*, 2018, vol. 4, pp. 10-18.
DOI: 10.15282/jceib.v4i1.3879

¹ Corresponding author:

Email: chapaksinevan44@gmail.com

- [5]. Wang J., Fan L. Effect of ultrasound treatment on microbial inhibition and quality maintenance of green asparagus during cold storage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, vol. 58, p. 104631.
DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104631
- [6]. Pierre Luhata L., Usuki T. Antibacterial activity of β -sitosterol isolated from the leaves of *Odontonema strictum* (Acanthaceae). *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2021, vol. 48, p. 128248.
DOI: 10.1016/j.bmcl.2021.128248
- [7]. Zaky A. A. et al. Bioactive compounds from plants and by-products: Novel extraction methods, applications, and limitations. *AIMS Molecular Science*, 2024, vol. 11, pp. 150-188. DOI: 10.3934/molsci.2024010
- [8]. Li C. et al. Catalytic Fast Pyrolysis of Forestry Wood Waste for Bio-Energy Recovery Using Nano-Catalysts. *Energies*, 2019, vol. 12, p. 3972.
DOI: 10.3390/en12203972
- [9]. Mickles A. J. et al. Antimicrobial Activity of Bark from Four North American Tree Species. *Wilderness & Environmental Medicine*, 2024, vol. 35, no. 4, pp. 439-442.
DOI: 10.1177/10806032241263862
- [10]. Babu S., Jayaraman S. An update on β -sitosterol: A potential herbal nutraceutical for diabetic management. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2020, vol. 131, p. 110702.
DOI: 10.1016/j.biopha.2020.110702
- [11]. Kiss I., Alexa V., Sárosi J. Biomass from Wood Processing Industries as an Economically Viable and Environmentally Friendly Solution. *Analecta Technica Szegedinensia*, 2016, vol. 10, pp. 1-6.
DOI: 10.14232/analecta.2016.2.1-6
- [12]. Yoon B. H., Truong V. L., Jeong W. S. Phytosterols: Extraction Methods, Analytical Techniques, and Biological Activity. *Molecules*, 2025, vol. 30, no. 12, p. 2488.
DOI: 10.3390/molecules30122488
- [13]. Li X. et al. The Bioavailability and Biological Activities of Phytosterols as Modulators of Cholesterol Metabolism. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 2, p. 523.
DOI: 10.3390/molecules27020523
- [14]. Durrani A. и др. Clinical improvement, toxicity and future prospects of β -sitosterol: a review. *CyTA - Journal of Food*, 2024, vol. 22, p. 2337886.
DOI: 10.1080/19476337.2024.2337886
- [15]. European Pharmacopoeia 10.0. Monograph on β -sitosterol. Council of Europe, Strasbourg, 2020.
- [16]. Aguilar F. et al. Scientific Opinion on the safety of stigmasterol-rich plant sterols as food additive. *EFSA Journal*, 2012, vol. 10, no. 5, p. 2659.
DOI: 10.2903/j.efsa.2012.2659
- [17]. Ahmida H. S. и др. Simultaneous determination of plasmatic phytosterols and cholesterol precursors using gas chromatography - mass spectrometry (GC-MS) with selective ion monitoring. *Journal of Chromatography B*, 2006, vol. 15, no. 2, pp. 43-47.
DOI: 10.1016/j.jchromb.2006.05.024
- [18]. Bedner M., Schantz M. M., Sander L. C. Development of liquid chromatographic methods for determination of phytosterols in Standard reference Materials containing saw palmetto. *J of Chromatography A*, 2000.
DOI: 10.1016/j.chroma.2008.03.020
- [19]. Saeidnia S. et al. The Story of Beta-Sitosterol- A Review. *European Journal of Medicinal Plants*, 2014, vol. 4, no. 5, pp. 590-609.
DOI: 10.9734/EJMP/2014/7764
- [20]. Lu B. et al. Separation and determination of diversiform phytosterols in food materials using supercritical carbon dioxide extraction and ultraperformance liquid chromatography-atmospheric pressure chemical

ionization-mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 2007, vol. 588, no. 1, pp. 50–63.
DOI: 10.1016/j.aca.2007.01.067

[21]. Trofimov A. N., Chuprova V. A. Tekhnologiya polucheniya beta-sitosterina iz talovykh produktov [Technology for the production of beta-sitosterol from tall oil products]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2002, no. 2, pp. 129–132. (In Russ.)

[22]. Devyatlovskaya A. N., Zhuravlyova L. N., Alashkevich Yu. D. Izuchenie sodержaniya fitosterinov v anatomicheskikh chastyakh boyaryshnika krovavo-krasnogo [Study of the phytosterol content in the anatomical parts of *Crataegus sanguinea*]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2014, no. 2.

DOI: 10.14258/jcpm.1402195 (In Russ.)

[23]. Kurkin V. A., Kurkina A. V., Avdeeva E. V. Flavonoidy kak biologicheski aktivnye soedineniya lekarstvennykh rasteniy [Flavonoids as biologically active compounds of medicinal plants]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2013, vol. 9, no. 11, pp. 1897–1901. (In Russ.)

[24]. Gosudarstvennaya Farmakopeya Respubliki Kazakhstan [State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan]. Vol. 1. Almaty: Izdatel'skiy dom «Zhibek Zholy», 2008, 592 p. (In Russ.)

[25]. Habib M. R. и др. Isolation of stigmasterol and beta-sitosterol from methanolic extract of root bark of *Calotropis gigantea* (Linn). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2007, vol. 10, no. 22, pp. 4174–4176.

DOI: 10.3923/pjbs.2007.4174.4176

[26]. Oshkin A. V. Innovatsii v pererabotke otkhodov derevoobrabotki: novye puti utilizatsii [Innovations in wood waste processing: new utilization paths]. *Aktual'nye issledovaniya* [Current Research], 2023, no. 52 (182), part I, pp. 34–41. (In Russ.)

DOI: 10.5281/zenodo.10428751

[27]. Abdokova L. Z., Nikaeva R. M. Tekhniko-ekonomicheskiy analiz v organizatsii i upravlenii proizvodstvom [Techno-economic analysis in the organization and management of production]. *Vestnik Akademii znaniy* [Bulletin of the Academy of Knowledge], 2021, no. 5 (46), pp. 19–23.

DOI: 10.24412/2304-6139-2021-5-19-23

Chapaksin I. V. — Scientific Manager, Kostanay Higher Medical College (Baymukhametov St., 181, Kostanay, 110000, Kazakhstan).

Chapaksina B. N. — Lecturer in Biology, Kostanay Higher Medical College (Baymukhametov St., 181, Kostanay, 110000, Kazakhstan).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Экстракция β -ситостерина из коры *Pinus sylvestris*: методология и результаты / И. В. Чапаксин, Б. Н. Чапаксина // Промышленные процессы и технологии. 2025. Т. 5. № 3(17). С. 68 – 81.

DOI: 10.37816/2713-0789-2025-5-3(17)-68-81

Please cite this article as:

Chapaksin I. V., Chapaksina B. N. Extraction of β -Sitosterol from *Pinus sylvestris* Bark: Methodology and Results. *Industrial processes and Technologies*, 2025, vol. 5, no. 3(17), pp. 68 – 81.

DOI: 10.37816/2713-0789-2025-5-3(17)-68-81