

УДК 66.061.34; 577.19

ОПТИМИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭКСТРАКЦИИ ВОДОРАСТВОРИМЫХ УГЛЕВОДОВ ИЗ ПЛОДОВ *FRAGARIA* × *ANANASSA* (DUCHESNE EX WESTON) DUCHESNE EX ROZIER, КУЛЬТИВИРУЕМОЙ НА ТЕРРИТОРИИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА *

© М.А. Ярцева¹, Л.Н. Серeda², Л.А. Иванова¹, М.В. Слуковская³, Н.С. Цветов^{2**}

¹ Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина, ФИЦ «Кольский научный центр» РАН, мкр. Академгородок, 18, Апатиты, 184209, Россия

² Научный центр медико-биологических исследований адаптации человека в Арктике ФИЦ «Кольский Научный Центр» РАН, мкр. Академгородок, 41а, Апатиты, 184209, Россия, tsvet.nik@mail.ru

³ Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики ФИЦ «Кольский Научный Центр» РАН, ул. Ферсмана, 14, Апатиты, 184209, Россия

Земляника ананасная (*Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier) – многолетнее травянистое растение рода Земляника (*Fragaria* L.) семейства Розоцветных (*Rosaceae* Juss.), плоды которого обладают выраженным сладким вкусом и высокой питательной ценностью. Сорт «Хибинская красавица» № 9907676 – селекционное достижение Полярной опытной станции ВИР, зарегистрированное в 2007 году. Сорт рекомендуется для культивирования в северных регионах. В связи с перспективами использования плодов растений земляники в пищевой промышленности в настоящей работе проведена оптимизация условий метода ультразвуковой экстракции водорастворимых углеводов с использованием однофакторного анализа и алгоритма Бокса-Бенкена. Кинетика процесса экстракции аппроксимирована уравнением реакции второго порядка. Определены оптимальная продолжительность экстрагирования, мощность ультразвукового воздействия, гидромодуль и температура экстрагирования. Определено содержание водорастворимых углеводов. Проанализирована зависимость синтеза углеводов от условий выращивания. Отмечен линейный характер зависимости от доли вносимого кондиционера. Полученные результаты могут способствовать развитию технологий выращивания земляники ананасной сорта «Хибинская красавица» и производства экстрактов из ее плодов для использования в пищевой промышленности.

Ключевые слова: *Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier, плоды, ультразвуковая экстракция, оптимизация, углеводы, Арктика.

Для цитирования: Ярцева М.А., Серeda Л.Н., Иванова Л.А., Слуковская М.В., Цветов Н.С. Оптимизация ультразвуковой экстракции водорастворимых углеводов из плодов *Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier, культивируемой на территории Кольского полуострова // Химия растительного сырья. 2026. №1. Online First. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260117544>.

Введение

Земляника ананасная (*Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier) – многолетнее травянистое растение рода Земляника (*Fragaria* L.) семейства Розоцветных (*Rosaceae* Juss.), плоды которого обладают выраженным сладким вкусом и высокой питательной ценностью, что позволяет им занимать лидирующие позиции среди ягодных культур во всем мире [1, 2].

Выращивание земляники ананасной в Арктической зоне РФ стало возможно относительно недавно, что связано с появлением новых сортов, адаптированных к экстремальным климатическим условиям [3]. Сорт

* Данная статья имеет электронный дополнительный материал (приложение), который доступен читателям на сайте журнала. DOI: 10.14258/jcprm.20260117544s

** Автор, с которым следует вести переписку.

земляники ананасной «Хибинская красавица» № 9907676 представляет собой селекционное достижение ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, выведенный в его северном филиале – Полярной опытной станции (ПОСВИР), зарегистрированное в Государственном реестре сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию в 2007 году [4]. Отличительной особенностью сорта является сердцевидная форма плода без шейки, его темно-красная окраска, средняя масса 9.4 г, содержание сахара 10.5%, кислот 1.73%, витамина С 83.5 мг/%. Вкус плодов кисло-сладкий, дегустационная оценка – 5 баллов. Сорт рекомендуется для культивирования в северных регионах, таких как Мурманская и Архангельская области, а также на территории республик Карелия и Коми. Проявляет высокую стойкость к различным болезням и вредителям.

Благодаря высокому содержанию углеводов плоды растений земляники активно используются для производства варенья, кондитерских изделий, напитков. Однако возможно использование и их экстрактов, применение которых в качестве натуральных усилителей вкуса, ароматизаторов и красителей позволит снизить внесение дополнительного сахара и исключить искусственные ароматизаторы и красители при производстве продуктов питания [2]. Максимальное извлечение углеводов предполагает разработку метода экстракции, включающего определение оптимальных условий их извлечения. В качестве методов экстрагирования наиболее часто используется встряхивание [1, 5], гомогенизация [6–10], мацерация [11], ультразвуковая экстракция [12] с использованием дистиллированной воды [1, 5, 6, 8–10, 12], этанолом [11] и смеси ацетона и уксусной кислоты [7] в качестве экстрагентов. Кроме того, для выделения сахаров из растительного материала применяют электрохимически активированные растворы [13], что является достаточно эффективным и экологически чистым способом.

Одним из часто применяемых в последние десятилетия эффективным методом экстракции является ультразвуковая экстракция, основанная на применении звуковой энергии для разрушения плотной матрицы растительных клеток и улучшения проникновения растворителя [14]. Этот метод выгодно отличает от других простота использования, быстрота и низкий расход реагентов и растительного сырья, что делает его применимым для фитохимического анализа. Однако комплексные исследования по влиянию его мощности и продолжительности, температуры экстракции и гидромодуля на степень извлечения водорастворимых углеводов из плодов растений земляники в настоящее время отсутствуют.

Цель настоящей работы – оптимизация ультразвуковой экстракции водорастворимых углеводов из плодов *Fragaria × ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier и оценка с помощью разработанного метода содержания суммы водорастворимых углеводов в плодах изучаемого растения, культивируемого на территории Кольского полуострова при разных условиях выращивания.

Экспериментальная часть

Объектами исследования служили плоды земляники ананасной сорта «Хибинская красавица», собранные в III декаду июля 2023 г. в фазу массового плодоношения (ВВСН 85) на опытных площадках экспериментального участка группы ягодных культур лаборатории растительных ресурсов ПОСВИР, расположенных в г. Апатиты Мурманской области. Регистрация фенологических фаз производилась по методике [15] с последующим переводом в международную шкалу ВВСН [16].

Для выращивания растений заложены опытные делянки площадью 1 м² каждая, отличающиеся почвенно-минеральным составом. В качестве добавки использовался вермикулит с высоким содержанием гидрофлогопита (ООО «Ковдорслюда», Россия), вносимый в соотношениях 1 : 2, 1 : 3, 1 : 5 и составляющий 33.3, 25.0 и 16.7% от общего объема почвенной смеси соответственно [17]. Контролем выступала делянка, не содержащая вермикулитовый концентрат.

Выбор вермикулита в качестве почвенного компонента обусловлен близостью крупного месторождения по добыче этого минерала, его высокой влаго- и катионообменной емкостью (КОЕ), буферной способностью по рН и микроэлементам, а также структурирующим эффектом на почву. Ионитные субстраты не применяли из-за их высокой растворимости и быстрого вымывания, что затрудняет поддержание стабильного ионного фона и приводит к резким колебаниям осмотического давления. Кроме того, они обладают меньшей буферной емкостью и не обеспечивают долговременного поддержания влагоемкости и КОЕ по сравнению с вермикулитом, что снижает воспроизводимость условий опыта. Также ионитные субстраты в Мурманской области не производят, в случае успеха экспериментов применение местных минералов

позволит существенно снизить издержки при масштабировании технологии за счет меньшей стоимости сырья и логистики.

Подготовка растительного материала включала в себя лиофилизацию в HyperCOOL 3055 (Gyrozen, Южная Корея) при температуре $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях вакуума, хранение в соответствии с [18], измельчение до размера частиц, проходящих сквозь сито с отверстиями размером 1 мм, и ситование.

Экстрагирование проводилось методом ультразвуковой экстракции в предварительно термостатированной ультразвуковой ванне VBS-3DP (Вилитек, Россия) с частотой 40 кГц и максимальной мощностью 120 Вт и дальнейшим центрифугированием в течение 10 мин в лабораторной центрифуге MiniSpin (Eppendorf, Германия) при 10000 об./мин.

Оптимизация условий экстрагирования состояла из трех этапов и производилась при помощи однофакторного анализа [19] и алгоритма Бокса-Бенкена [20]. Первый этап включал в себя определение оптимальной продолжительности и кинетических параметров экстракции при температуре (Т) $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, мощности ультразвукового воздействия (W) – 60 Вт, гидромодуле (отношении сухого растительного материала к объему экстрагента (m/v)) – 1 : 20 и диаметре (d) фракций растительного материала – 1 мм. Для аппроксимации полученных данных по кинетике извлечения углеводов из плодов растений земляники было применено уравнение реакции второго порядка [21], описывающее зависимость значения соответствующего параметра экстракта (Y_t) от времени (t) через константу скорости (k, $\text{г мг}^{-1}\text{ мин}^{-1}$) и равновесное значение параметра экстракта (Y_{eq}) путем линеаризации в координатах t/Y_t от t.

На втором этапе работы определялась оптимальная мощность ультразвукового воздействия в диапазоне от 0 до 100%.

На заключительном этапе оптимизации для расчета оптимальных температуры экстракции, гидромодуля и продолжительности ультразвукового воздействия был применен алгоритм Бокса-Бенкена с тремя уровнями трех параметров и пятикратным повторением центральной точки. Определяемые параметры и их уровни приведены в таблице.

Для аппроксимации полученных данных по кинетике извлечения углеводов, было применено уравнение реакции второго порядка:

$$Y_t = \frac{kt(Y^{eq})^2}{1 + ktY^{eq}},$$

где k ($\text{г мг}^{-1}\text{ мин}^{-1}$) – константа скорости реакции; Y^{eq} – равновесное значение выхода исследуемых веществ; Y_t – значение выхода исследуемых веществ в момент времени t.

Данное уравнение линеаризуется в координатах t/Y_t от t:

$$\frac{t}{Y_t} = \frac{1}{Y^{eq}} t + \frac{1}{k(Y^{eq})^2},$$

тогда из наклона прямой можно найти Y^{eq} , а из смещения – k.

Общее содержание углеводов (Total Carbohydrate Content (TCC)) определялось антроновым методом, для чего в стеклянную виалу вносили 0.1 мл разбавленного в 300 раз водного экстракта и 0.2 мл антронового реактива и термостатировали в течение 15 мин в сушильном шкафу ШС-10-02 СПУ (Смоленское СКТБ СПУ, Россия) при температуре $95\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оптическое поглощение растворов регистрировали на планшетном фотометре Elisa DEL-100 (Hangzhou Miu Instruments, Китай) при длине волны 630 нм [22].

Все химические анализы проводились в 3-кратной повторности. Полученные данные представлены в виде средних значений \pm стандартное отклонение. Статистическая значимость различий обсуждаемых результатов оценивалась с помощью однофакторного дисперсионного анализа с последующим применением теста Тьюки при уровне значимости (p-value) ≤ 0.05 . Правильность выбора модели оценивалась с помощью коэффициента детерминации (R^2) и величины ошибки неадекватности подбора (Lack of fit). Расчеты проводились в MS Excel 2021 (Microsoft, США). Обработка данных оптимизации по алгоритму Бокса-Бенкена проводилась с помощью моделирования поверхности отклика в программе Design-Expert 11 Trial (Stat-Ease Inc., США).

Уровни и значения параметров экстракции углеводов для алгоритма Бокса-Бенкена

	-1	0	1
T, °C	30	45	60
v/m	10	30	50
t, мин	10	20	30

Результаты и обсуждение

Оптимизация условий экстракции. Аппроксимация данных по кинетике экстракции водорастворимых углеводов из плодов земляники ананасной производилась уравнением реакции второго порядка. Константа скорости экстракции углеводов составила $0.004 \times 10^{-3} \text{ г мг}^{-1} \text{ мин}^{-1}$, а равновесное значение их выхода – 326.4 мг/г. Сравнение экспериментальных данных и аппроксимационной кривой представлено на рисунке 1. Показано, что полученные данные хорошо аппроксимируются примененным уравнением: коэффициент детерминации составляет 0.9719, константа скорости экстракции углеводов равна 0.004, а основной процесс экстракции завершается через 10 мин.

Результаты подбора оптимальной мощности ультразвукового воздействия в диапазоне от 0 до 120 Вт представлены на рисунке 2. Видно, что наибольший выход водорастворимых углеводов происходит при использовании мощности воздействия 30 Вт ($645.2 \pm 5.5 \text{ мг GE/г}$, $p \leq 0.05$).

Поверхности отклика для выхода суммы углеводов представлены на рисунке в электронном приложении и описываются уравнением:

$$Y_1 = 434.256 - 39.118A - 6.278B - 7.546C + 12.436AB - 55.538AC - 29.097BC - 48.463A^2 - 132.614B^2 + 47.400C^2 + 6.666AB^2$$

Результаты дисперсионного анализа для уравнения, описывающего поверхности отклика для выхода суммы водорастворимых углеводов, представлены в таблице электронного приложения. Все параметры, кроме AB и BC, являются значимыми при $p \leq 0.05$, однако исключение незначимых термов из модели ведет к уменьшению коэффициентов детерминации и снижению ошибки неадекватности подбора до значимых значений. Коэффициент детерминации составил 0.9548, а величина Lack of fit является незначимой, что говорит об удовлетворительном качестве аппроксимации.

Исходя из полученных данных, были рассчитаны оптимальные условия экстракции: мощность ультразвукового воздействия – 30 Вт, температура экстракции – 30 °C, продолжительность экстракции – 30 минут, гидромодуль – 1 : 19, и проведен контрольный эксперимент, в результате которого достигнут выход суммы углеводов – 667.6 мг GE/г. Это оказалось выше, чем прогнозное значение – 523.1 мг GE/г.

Применение оптимальных условий экстракции. Известно, что значительное влияние на развитие растений оказывают гидрофизические свойства почв, на которых они произрастают [23]; снижение объемной плотности, улучшение агрегатной структуры и повышение влагоемкости которых часто достигается путем внесения таких кондиционеров, как вермикулитовый концентрат [24].

Для изучения влияния условий выращивания на синтез водорастворимых углеводов использовались плоды растений земляники, выращенных на опытных делянках, содержащих разное количество вермикулитового концентрата. Результаты представлены на рисунке 3. Установлено, что содержание определяемых соединений находилось в диапазоне от 457.5 ± 0.01 до $694.3 \pm 0.04 \text{ мг GE/г}$ при общем линейном характере зависимости от доли вносимого компонента. Отмечено, что максимальное содержание суммы углеводов обнаружено в экстрактах плодов земляники ананасной, произрастающей на делянке, содержащей 16.7% вермикулитового концентрата от общего объема почвенной смеси, и статистически не отличается от содержания суммы аналогичных соединений в экстрактах плодов, собранных на делянке, выступающей контролем.

В ряде исследований [24–28] отмечено, что увеличение доли вносимого в почву кондиционера стимулирует боковое ветвление корней и увеличивает общую мощность корневой системы, улучшая поглощение воды и повышая эффективность усвоения питательных веществ [29, 30]. Однако подобные методы выращивания способствуют увеличению фитомассы сельскохозяйственно ценных растений [26, 28]. У ягодных культур качество сырья напрямую зависит от содержания питательных элементов в почве [31–34], т.е. повышение доли вносимых конденсирующих добавок способствует снижению синтеза углеводов в плодах ягодных культур, что отражено в результатах настоящей работы.

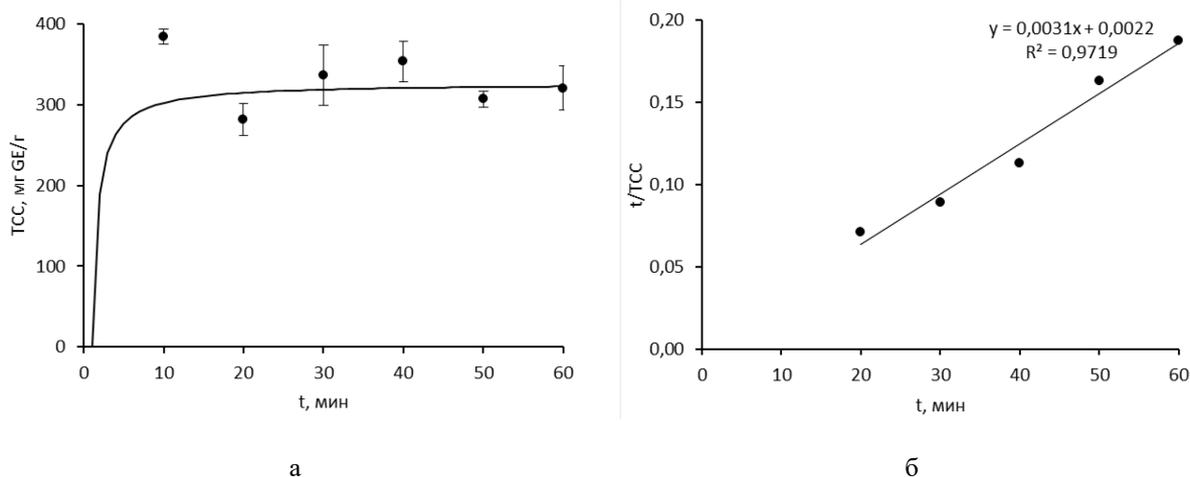


Рис. 1. Результаты сравнения экспериментальных (•) значений и результатов расчета (—) для выхода суммы углеводов из плодов земляники сад сорта «Хибинская красавица» от времени (а) и график линеаризованного уравнение в координатах t/TSS от t , показывающий качество аппроксимации (б)

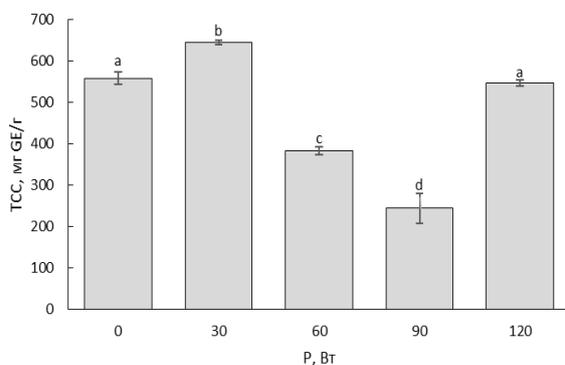


Рис. 2. Влияние мощности ультразвукового воздействия (P, Вт) на выход суммы углеводов из плодов земляники ананасной сорта «Хибинская красавица». Различные буквы показывают статистически значимо различающиеся величины при $p \leq 0,05$

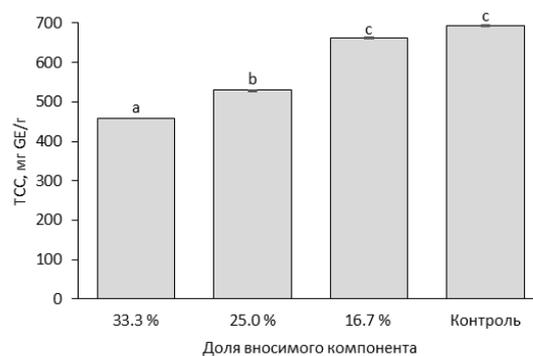


Рис. 3. Зависимость содержание суммы углеводов в плодах земляники ананасной сорта «Хибинская красавица» от почвенно-минерального состава почвы. Различные буквы показывают статистически значимо различающиеся величины при $p \leq 0,05$

Заключение

В настоящей работе впервые оптимизированы условия ультразвуковой экстракции водорастворимых углеводов из плодов *Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier) при помощи однофакторного анализа и алгоритма Бокса-Бенкена. Полученные кинетические параметры процесса экстрагирования аппроксимированы уравнением реакции второго порядка. С помощью однофакторной оптимизации определена мощность ультразвукового воздействия – 30 Вт. Применение алгоритма Бокса-Бенкена и последующей аппроксимации поверхностей отклика позволило рассчитать оптимальные продолжительность экстракции – 30 мин, гидромодуль – 1 : 19 и температуру процесса – 30 °С. Проанализирована зависимость синтеза углеводов от условий выращивания. Отмечен линейный характер зависимости от доли вносимого компонента. Полученные результаты могут способствовать развитию технологий выращивания земляники ананасной сорта «Хибинская красавица» и производства экстрактов из ее плодов для использования в пищевой промышленности.

Дополнительная информация

В электронном приложении к статье (DOI: <https://www.doi.org/10.14258/jcprm.20260117544s>) приведен дополнительный экспериментальный материал, раскрывающий основные положения, изложенные в статье.

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального Исследовательского Центра «Кольский Научный Центр» РАН (темы НИР № 1023032400462- 1-1.6.19; 1.6.20; 1.6.4; 1.6.11 и FMEZ-2025-0064).

Конфликт интересов

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

Открытый доступ

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

Список литературы

1. Simkova K., Veberic R., Hudina M., Grohar M.C., Ivancic T., Smrke T., Pelacci M., Jakopic J. Variability in «Capri» everbearing strawberry quality during a harvest season // *Foods*. 2023. Vol. 12, no. 6. 1349. <https://doi.org/10.3390/foods12061349>.
2. Castillo-Girones S., Ruizendaal J., Salas-Valderrama X., Munera S., Blasco J., Polder G. Advanced evaluation of strawberry quality, consumer preference, and cultivar discrimination through spectral imaging and neural networks // *Food Control*. 2025. Vol. 175. 111339. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111339>.
3. Елсакова С.Д., Елсаков Г.В. Ягодный сад на Кольском Севере. Мурманск, 1999. 48 с.
4. Государственная Комиссия Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений (ФГБУ «Госсорткомиссия»). [Электронный ресурс]. URL: www.gossortrf.ru.
5. Simkova K., Grohar M.C., Pelacci M., Veberic R., Jakopic J., Hudina M. The effect of freezing, frozen storage and thawing on the strawberry fruit composition // *International Journal of Fruit Science*. 2024. Vol. 24, no. 1. Pp. 186–199. <https://doi.org/10.1080/15538362.2024.2355920>.
6. Zhang Y., Lin B., Tang G., Chen Y., Deng M., Lin Y., Li M., He W., Wang Y., Zhang Y., Luo Y., Chen Q., Wang X., Tang H. Application of γ -aminobutyric acid improves the postharvest marketability of strawberry by maintaining fruit quality and enhancing antioxidant system // *Food Chemistry: X*. 2024. Vol. 21. 101252. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101252>.
7. Milosavljević D., Maksimović V., Milivojević J., Djekić I., Wolf B., Zuber J., Vogt C., Maksimović J.D. Sugars and organic acids in 25 strawberry cultivars: Qualitative and quantitative evaluation // *Plants*. 2023. Vol. 12, no. 12. 2238. <https://doi.org/10.3390/plants12122238>.
8. Akšić M.F., Tosti T., Sredojević M., Milivojević J., Meland M., Natić M. Comparison of sugar profile between leaves and fruits of blueberry and strawberry cultivars grown in organic and integrated production system // *Plants*. 2019. Vol. 8, no. 7. 205. <https://doi.org/10.3390/plants8070205>.
9. Mikulic-Petkovsek M., Schmitzer V., Slatnar A., Stampar F., Veberic R. Composition of sugars, organic acids, and total phenolics in 25 wild or cultivated berry species // *Journal of food science*. 2012. Vol. 77, no. 10. Pp. 1064–1070. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02896.x>.
10. Mahmood T., Anwar F., Abbas M., Boyce M.C., Saari N. Compositional variation in sugars and organic acids at different maturity stages in selected small fruits from Pakistan // *International journal of molecular sciences*. 2012. Vol. 13, no. 2. Pp. 1380–1392. <https://doi.org/10.3390/ijms13021380>.
11. Basson C.E., Greenewald J.H., Kossman J., Cronjé C., Bauer R. Sugar and acid-related quality attributes and enzyme activities in strawberry fruits: Invertase is the main sucrose hydrolysing enzyme // *Food Chemistry*. 2010. Vol. 121, no. 4. Pp. 1156–1162. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.064>.
12. Urün I., Attar S.H., Sönmez D.A., Gündeşli M.A., Ercişli S., Kafkas N.E., Bandić L.M., Duralija B. Comparison of polyphenol, sugar, organic acid, volatile compounds, and antioxidant capacity of commercially grown strawberry cultivars in Turkey // *Plants*. 2021. Vol. 10, no. 8. 1654. <https://doi.org/10.3390/plants10081654>.
13. Лосева В.А., Квитко И.В. Экстракция сахарозы из свекловичной стружки электрохимически активированным экстрагентом // *Известия вузов. Пищевая технология*. 2006. №4. С. 80–82.
14. Серeda Л.Н., Цветов Н.С. Оптимизация метода ультразвуковой экстракции биологически активных соединений водно-спиртовой смесью из плодов *Vaccinium vitis-idaea* L., произрастающей на Кольском полуострове // *Химия растительного сырья*. 2024. №1. С. 292–300. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240113108>.
15. Седова Е.Н., Огольцовой Т.П. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Орел: ВНИИСПК, 1999. 606 с.
16. Meier U. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants BBCH. Quedlinburg, 2018. 204 p. <https://doi.org/10.5073/20180906-074619>.

17. Мосендз И.А., Кременецкая И.П. Оценка влияния способов термообработки вермикулита для применения его в качестве гидропонного субстрата // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. №19. С. 248–252. <https://doi.org/10.31241/FNS.2022.19.045>.
18. ОФС.1.1.0011.15. Хранение лекарственного растительного сырья и лекарственных растительных препаратов // Государственная фармакопея РФ, XIV изд. М., 2018. Т. 1. С. 272–275.
19. Tungmunthum D., Garros L., Drouet S., Renouard S., Lainé E., Hano C. Green ultrasound assisted extraction of trans rosmarinic acid from *Plectranthus scutellarioides* (L.) R. Br. leaves // Plants. 2019. Vol. 8, no. 3. Article 50. <https://doi.org/10.3390/plants8030050>.
20. El-Sheekh M., Alwaleed E.A., Kassem W.M.A., Saber H. Optimizing the fucoidan extraction using Box-Behnken Design and its potential bioactivity // International Journal of Biological Macromolecules. 2024. Vol. 277. 134490. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134490>.
21. Cavdarova M., Makris D.P. Extraction kinetics of phenolics from carob (*Ceratonia siliqua* L.) kibbles using environmentally benign solvents // Waste and Biomass Valorization. 2014. Vol. 5. Pp. 773–779. <https://doi.org/10.1007/s12649-014-9298-3>.
22. Середа Л.Н., Ярцева М.А., Цветов Н.С. Модификация метода определения общего содержания углеводов с антроновым реактивом // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, №1. С. 355–360. <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2024.15.1.059>.
23. Pan J., Shang Y., Zhang W.J., Chen X., Xiping C., Zhenling C. Improving soil quality for higher grain yields in Chinese wheat and maize production // Land Degradation & Development. 2020. Vol. 31, no. 9. Pp. 1125–1137. <https://doi.org/10.1002/ldr.3515>.
24. Wu X., Liu Y., Shang Y., Liu D., Liesack W., Cui Z., Peng J., Zhang F. Peat-vermiculite alters microbiota composition towards increased soil fertility and crop productivity // Plant and Soil. 2022. Vol. 470. Pp. 21–34. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04851-x>.
25. Liu Z., Gao K., Shan S., Gu R., Wang Z., Craft E.J., Mi G., Yuan L., Che F. Comparative analysis of root traits and the associated QTLs for maize seedlings grown in paper roll, hydroponics and vermiculite culture system // Frontiers in Plant Science. 2017. Vol. 8. 436. DOI: 10.3389/fpls.2017.00436.
26. Xu Y., Guo Z., Li J., Zhang H., Lu Y., Shi C., Cao T. Effects of perlite, grass charcoal and vermiculite on root growth of isatis (*Isatis tinctoria* L. Woad) and soil nutrient migration // Bangladesh Journal of Botany. 2021. Vol. 50, no. 5. Pp. 947–954. <https://doi.org/10.3329/bjb.v50i5.56449>.
27. Wisdom B., Nyembezi M., Agathar K. Effect of different vermiculite and pine bark media substrates mixtures on physical properties and spiral rooting of radish (*Raphanus sativus* L.) in float tray system // Rhizosphere. 2017. Vol. 3. Pp. 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2017.01.002>.
28. Ca P., Pisa C., Parwada C., Chiripanyanga S., Dunjana N. Evaluation of vermiculite application rates on growth and yield of *Brassica napus* (RAPE) // Science. 2020. Vol. 4, no. 2. Pp. 27–31. <https://doi.org/10.26480/gws.02.2020.46.50>.
29. Postma J.A., Dathé A., Lynch J.P. The optimal lateral root branching density for maize depends on nitrogen and phosphorus availability // Plant physiology. 2014. Vol. 166, no. 2. Pp. 590–602. <https://doi.org/10.1104/pp.113.233916>.
30. White P.J., Brown P.H. Plant nutrition for sustainable development and global health // Annals of botany. 2010. Vol. 105, no. 7. Pp. 1073–1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>.
31. Nestby R., Lieten F., Pivot D., Lacroix C.R., Tagliavini M. Influence of mineral nutrients on strawberry fruit quality and their accumulation in plant organs: a review // International Journal of Fruit Science. 2005. Vol. 5, no. 1. Pp. 139–156. https://doi.org/10.1300/J492v05n01_13.
32. Kilic N., Burgut A., Gündesli M.A., Nogay G., Ercisli S., Kafkas N.E., Ekiert H., Elansary H.O., Szopa A. The effect of organic, inorganic fertilizers and their combinations on fruit quality parameters in strawberry // Horticulturae. 2021. Vol. 7, no. 10. 354. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100354>.
33. Saygı H. Effects of organic fertilizer application on strawberry (*Fragaria vesca* L.) cultivation // Agronomy. 2022. Vol. 12, no. 5. 1233. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051233>.
34. Kilic N., Turemis N.F., Dasgan, H.Y. The effect of organic, inorganic fertilizers and their combinations on fruit quality parameters in strawberry // Horticulturae. 2021. Vol. 7, no. 10. 354. https://doi.org/10.15666/aer/1903_22012211.

Поступила в редакцию 28 июня 2025 г.

После переработки 5 сентября 2025 г.

Принята к публикации 10 сентября 2025 г.

Yartseva M.A.¹, Sereda L.N.², Ivanova L.A.¹, Slukovskaya M.V.³, Tsvetov N.S.^{2*} OPTIMIZATION OF ULTRASONIC EXTRACTION OF WATER-SOLUBLE CARBOHYDRATES FROM FRUITS OF *FRAGARIA* × *ANANASSA* (DUCHESNE EX WESTON) DUCHESNE EX ROZIER CULTIVATED ON THE TERRITORY OF THE KOLA PENINSULA

¹ N.A. Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 18, Apatity, 184209, Russia

² Research Center for Medical and Biological Research of Human Adaptation in the Arctic, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 41a, Apatity, 184209, Russia, tsvet.nik@mail.ru

³ Laboratory of Nature-Like Technologies and Technosphere Safety of the Arctic, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, st. Fersmana, 14, Apatity, 184209, Russia

Strawberry (*Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier) is a perennial herbaceous plant of the genus Strawberry (*Fragaria* L.) of the Rosaceae family (*Rosaceae* Juss.), whose fruits have a pronounced sweet taste and high nutritional value. The «Khibiny Krasavitsa» No. 9907676 is a breeding achievement of the Polar Experimental Station (FRC VIR), registered in 2007. The variety is recommended for cultivation in the northern regions. In connection with the prospects of using the fruits of strawberry plants in the food industry, the optimization of the conditions of the ultrasonic extraction of water-soluble carbohydrates using single-factor analysis and the Box-Behnken algorithm has been carried out in this work. The kinetics of the extraction process is approximated by a second-order reaction equation. The optimal extraction duration, ultrasonic exposure power, hydraulic module, and extraction temperature were determined. The content of water-soluble carbohydrates was determined. The dependence of carbohydrate synthesis on growing conditions is analyzed. The linear nature of the dependence on the proportion of the applied conditioner is noted. The results obtained can contribute to the development of technologies for growing pineapple strawberries of the «Khibiny Krasavitsa» variety and the production of extracts from its fruits for use in the food industry.

Keywords: *Fragaria* × *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier, fruits, ultrasound-assisted extraction, optimization, carbohydrates, Arctic.

For citing: Yartseva M.A., Sereda L.N., Ivanova L.A., Slukovskaya M.V., Tsvetov N.S. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 1, Online First. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260117544>.

References

1. Simkova K., Veberic R., Hudina M., Grohar M.C., Ivancic T., Smrke T., Pelacci M., Jakopic J. *Foods*, 2023, vol. 12, no. 6, 1349. <https://doi.org/10.3390/foods12061349>.
2. Castillo-Girones S., Ruizendaal J., Salas-Valderrama X., Munera S., Blasco J., Polder G. *Food Control*, 2025, vol. 175, 111339. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111339>.
3. Yelsakova S.D., Yelsakov G.V. *Yagodnyy sad na Kol'skom Severe*. [Berry garden in the Kola North]. Murmansk, 1999, 48 p. (in Russ.).
4. *Gosudarstvennaya Komissiya Rossiyskoy Federatsii po ispytaniyu i okhrane selektsionnykh dostizheniy (FGBU «Gosortkomissiya»)*. [State Commission of the Russian Federation for Testing and Protection of Selection Achievements (FSBI "State Commission")]. URL: www.gosortrf.ru. (in Russ.).
5. Simkova K., Grohar M.C., Pelacci M., Veberic R., Jakopic J., Hudina M. *International Journal of Fruit Science*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 186–199. <https://doi.org/10.1080/15538362.2024.2355920>.
6. Zhang Y., Lin B., Tang G., Chen Y., Deng M., Lin Y., Li M., He W., Wang Y., Zhang Y., Luo Y., Chen Q., Wang X., Tang H. *Food Chemistry: X*, 2024, vol. 21, 101252. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101252>.
7. Milosavljević D., Maksimović V., Milivojević J., Djekić I., Wolf B., Zuber J., Vogt C., Maksimović J.D. *Plants*, 2023, vol. 12, no. 12, 2238. <https://doi.org/10.3390/plants12122238>.
8. Akšić M.F., Tosti T., Sredojević M., Milivojević J., Meland M., Natić M. *Plants*, 2019, vol. 8, no. 7, 205. <https://doi.org/10.3390/plants8070205>.
9. Mikulic-Petkovsek M., Schmitzer V., Slatnar A., Stampar F., Veberic R. *Journal of food science*, 2012, vol. 77, no. 10, pp. 1064–1070. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02896.x>.
10. Mahmood T., Anwar F., Abbas M., Boyce M.C., Saari N. *International journal of molecular sciences*, 2012, vol. 13, no. 2, pp. 1380–1392. <https://doi.org/10.3390/ijms13021380>.
11. Basson C.E., Groenewald J.H., Kossmann J., Cronjé C., Bauer R. *Food Chemistry*, 2010, vol. 121, no. 4, pp. 1156–1162. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.064>.
12. Urün I., Attar S.H., Sönmez D.A., Gündeşli M.A., Ercişli S., Kafkas N.E., Bandić L.M., Duralija B. *Plants*, 2021, vol. 10, no. 8, 1654. <https://doi.org/10.3390/plants10081654>.
13. Loseva V.A., Kvitko I.V. *Izvestiya vuzov. Pishcheyaya tekhnologiya*, 2006, no. 4, pp. 80–82. (in Russ.).
14. Sereda L.N., Tsvetov N.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2024, no. 1, pp. 292–300. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240113108>. (in Russ.).
15. Sedova Ye.N., Ogol'tsovoy T.P. *Programma i metodika sortoizucheniya plodovykh, yagodnykh i orekhoplodnykh kul'tur*. [Program and methodology for variety study of fruit, berry and nut crops]. Orel, 1999, 606 p. (in Russ.).
16. Meier U. *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants BBCH*. Quedlinburg, 2018, 204 p. <https://doi.org/10.5073/20180906-074619>.
17. Mosendz I.A., Kremenetskaya I.P. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*, 2022, no. 19, pp. 248–252. <https://doi.org/10.31241/FNS.2022.19.045>. (in Russ.).

* Corresponding author.

18. *Gosudarstvennaya farmakopeya RF, XIV izd.* [State Pharmacopoeia of the Russian Federation, XIV ed.]. Moscow, 2018, vol. 1, pp. 272–275. (in Russ.).
19. Tungmunithum D., Garros L., Drouet S., Renouard S., Lainé E., Hano C. *Plants*, 2019, vol. 8, no. 3, article 50. <https://doi.org/10.3390/plants8030050>.
20. El-Sheekh M., Alwaleed E.A., Kassem W.M.A., Saber H. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, vol. 277, 134490. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134490>.
21. Cavdarova M., Makris D.P. *Waste and Biomass Valorization*, 2014, vol. 5, pp. 773–779. <https://doi.org/10.1007/s12649-014-9298-3>.
22. Sereda L.N., Yartseva M.A., Tsvetov N.S. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*, 2024, vol. 15, no. 1, pp. 355–360. <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2024.15.1.059>. (in Russ.).
23. Pan J., Shang Y., Zhang W.J., Chen X., Xinping C., Zhenling C. *Land Degradation & Development*, 2020, vol. 31, no. 9, pp. 1125–1137. <https://doi.org/10.1002/ldr.3515>.
24. Wu X., Liu Y., Shang Y., Liu D., Liesack W., Cui Z., Peng J., Zhang F. *Plant and Soil*, 2022, vol. 470, pp. 21–34. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04851-x>.
25. Liu Z., Gao K., Shan S., Gu R., Wang Z., Craft E.J., Mi G., Yuan L., Che F. *Frontiers in Plant Science*, 2017, vol. 8, 436. DOI: 10.3389/fpls.2017.00436.
26. Xu Y., Guo Z., Li J., Zhang H., Lu Y., Shi C., Cao T. *Bangladesh Journal of Botany*, 2021, vol. 50, no. 5, pp. 947–954. <https://doi.org/10.3329/bjb.v50i5.56449>.
27. Wisdom B., Nyembezi M., Agathar K. *Rhizosphere*, 2017, vol. 3, pp. 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2017.01.002>.
28. Ca P., Pisa C., Parwada C., Chiripanyanga S., Dunjana N. *Science*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 27–31. <https://doi.org/10.26480/gws.02.2020.46.50>.
29. Postma J.A., Dathe A., Lynch J.P. *Plant physiology*, 2014, vol. 166, no. 2, pp. 590–602. <https://doi.org/10.1104/pp.113.233916>.
30. White P.J., Brown P.H. *Annals of botany*, 2010, vol. 105, no. 7, pp. 1073–1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>.
31. Nestby R., Lieten F., Pivot D., Lacroix C.R., Tagliavini M. *International Journal of Fruit Science*, 2005, vol. 5, no. 1, pp. 139–156. https://doi.org/10.1300/J492v05n01_13.
32. Kilic N., Burgut A., Gündesli M.A., Nogay G., Ercisli S., Kafkas N.E., Ekiert H., Elansary H.O., Szopa A. *Horticulturae*, 2021, vol. 7, no. 10, 354. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100354>.
33. Sayğı H. *Agronomy*, 2022, vol. 12, no. 5, 1233. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051233>.
34. Kilic N., Turemis N.F., Dasgan, H.Y. *Horticulturae*, 2021, vol. 7, no. 10, 354. https://doi.org/10.15666/aecr/1903_22012211.

Received June 28, 2025

Revised September 5, 2025

Accepted September 10, 2025

Сведения об авторах

Ярцева Мария Александровна – ведущий инженер лаборатории интродукции и акклиматизации растений, m.yarceva@ksc.ru

Середа Лидия Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории медицинских и биологических технологий, l.sereda@ksc.ru

Иванова Любовь Андреевна – кандидат биологических наук, главный научный сотрудник, la.ivanova@ksc.ru

Слуковская Марина Вячеславовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, m.slukovskaya@ksc.ru

Цветов Никита Сергеевич – кандидат химических наук, заведующий лаборатории медицинских и биологических технологий, доцент кафедры физики, биологии и инженерных технологий, n.tsvetov@ksc.ru

Information about authors

Yartseva Maria Aleksandrovna – Senior Engineer Laboratory of Plant Introduction and Acclimatization, m.yarceva@ksc.ru

Sereda Lidiya Nikolaevna – Junior Researcher Laboratory for Medical and Biological Technologies, l.sereda@ksc.ru

Ivanova Lyubov Andreevna – Candidate of Biological Sciences, Chief Researcher, la.ivanova@ksc.ru

Slukovskaya Marina Vyacheslavovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher laboratories of nature-like technologies and technosphere safety of the Arctic, m.slukovskaya@ksc.ru

Tsvetov Nikita Sergeevich – PhD in chemistry, Head of the Laboratory for Medical and Biological Technologies RCHAA, Associate Professor of Department of Physics, Biology and Engineering Technologies, n.tsvetov@ksc.ru