

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КАРТОФЕЛЬНОГО КРАХМАЛА

М. В. Беляков

ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5;
E-mail: bmw20100@mail.ru

Поступила в редакцию 13.04.2023, принята к печати 07.06.2023

Быстрая и достоверная оценка качества картофеля имеет большое значение для увеличения производительности переработки и получения крахмала. Целью данной работы является исследование фотолюминесцентных свойств картофеля различного качества для дальнейшей разработки оптического метода контроля содержания крахмала. Задачами являются измерение спектральных люминесцентных характеристик и расчет параметров люминесценции чистого крахмала и образцов картофеля. Исследовались образцы картофеля с белой и желтой мякотью, а также чистый крахмал. Измерения проводились на дифракционном спектрофлуориметре. Рассчитывались интегральные и статистические параметры спектров возбуждения и фотолюминесценции. Характеристики возбуждения относятся к ближней ультрафиолетовой и видимой областям спектра (220–550 нм), при этом основные максимумы соответствуют 290 нм и 332 нм для картофеля и 352 нм для крахмала. Спектральные характеристики фотолюминесценции крахмала значительно превосходят аналогичные характеристики срезов картофеля. Наиболее оптимальным методом контроля содержания крахмала является измерение потока фотолюминесценции в диапазоне 383–500 нм после возбуждения излучением 332 нм. Асимметрия всех графиков – правосторонняя. При этом наибольшие различия коэффициентов асимметрии характерны для возбуждения и коротковолновой люминесценции. Для статистических параметров (дисперсии, коэффициентов асимметрии и эксцесса) наиболее значительное различие спектров наблюдается в коротковолновой области излучения (310–450 нм). Однако, в отличие от измерений потоков, расчет статистических параметров является гораздо более ресурсоемким и требует измерения всего спектра. Полученные результаты могут быть использованы для разработки технологии фотолюминесцентной диагностики картофеля.

Ключевые слова: картофель, крахмал, спектр возбуждения, спектр люминесценции.

PHOTOLUMINESCENT PROPERTIES OF POTATO STARCH

M. V. Belyakov

FGBNU Federal Scientific Agroengineering Center VIM
109428, Russia, Moscow, 1st Institute passage, 5
E-mail: bmw20100@mail.ru

A quick and reliable assessment of potato quality is of great importance for improvement of the crop processing and increasing starch production. The purpose of this study was to measure the photoluminescent properties of potatoes of various quality for further development of an optical method for starch content control. The tasks were to measure the spectral luminescent characteristics and calculate the parameters of pure starch and potato samples. Samples of potato with white and yellow flesh, as well as pure starch were examined. Measurements were carried out on a diffraction spectrofluorimeter. Integral and statistical parameters of the excitation and photoluminescence spectra were calculated. The excitation characteristics were located in the near ultraviolet and visible spectral regions (220–550 nm), while the main maxima were located at about 290 nm and 332 nm for potatoes, and at 352 nm for starch. The spectral characteristics of pure starch photoluminescence significantly exceeded similar characteristics of potato slices. The most optimal method for controlling starch content was to measure the photoluminescence flux in the range of 383–500 nm after excitation with 332 nm radiation. The asymmetry of all the graphs was right-sided. At the same time, the greatest differences in the asymmetry coefficients were visible for excitation and short-wave luminescence. For statistical parameters (dispersion, coefficients of asymmetry and kurtosis), the most significant difference in spectra was observed in the short-wavelength region of radiation (310–450 nm). However, unlike flow measurements, the calculation of statistical parameters was much more resource-intensive and required measuring of the entire spectrum. The results obtained can be used to develop a technology for photoluminescent diagnostics of potatoes.

Keywords: potato, starch, excitation spectrum, luminescence spectrum.

ВВЕДЕНИЕ

Потребление картофеля сопровождается постоянным увеличением количества продуктов переработки. Приготовление таких продуктов обычно происходит в условиях высокой производительности. Поэтому быстрая, но достоверная оценка качества поступающих партий картофеля имеет большое значение, поскольку не все клубни картофеля отвечают требованиям отрасли.

Объективными критериями оценки качества картофеля считаются крахмалистость, содержание сухого вещества, наличие аскорбиновой кислоты, токсичных элементов, нитратов и др. (Гиченкова и др., 2022). Например, свежий картофель, пригодный к промышленной переработке для производства чипсов, должен содержать 22–25 % сухих веществ (Abazov et al., 2021).

Крахмал широко используется в самых различных отраслях промышленности (пищевой, медицинской, текстильной, бумажной и др.) (Папахин и др., 2020). В пищевой промышленности крахмал применяется при производстве макаронных изделий (Kolarič et al., 2020), мучных изделий во фритюре (Дубцова и др., 2012), мороженого (Творогова, Коновалова, 2015), фруктовых муссов (Karusiak et al., 2021) и мн. др. Добавление нативного крахмала в композицию пищевого продукта с непрерывной водной фазой позволяет повысить их питательность и чувство сытости после их употребления, а также снизить содержание сахара (сахарозы) и жира в начинках, конфетах, джемах (Ловкис и др., 2018). В фармацевтике и биомедицине крахмал используется в качестве наполнителей или систем доставки лекарств (García et al., 2020). Наногели на основе крахмала являются многообещающими наноматериалами для универсального применения, включая биомедицинскую, пищевую и фармацевтическую промышленность (Saracoglu, Ozmen, 2021).

Определение содержания крахмала и сухого вещества в картофеле осуществляется весовым методом (Сердюков, 2023), а также методом Эверса с использованием поляриметра (Гольдштейн и др., 2022). В целлюлозно-бумажной промышленности крахмал в растворе определяется иодометрическим

методом (Хадыко и др., 2021). Данный способ имеет ряд существенных недостатков. Иод может вступать в реакцию с остаточным лигнином, существенное влияние на результаты анализа будут оказывать мутность раствора, степень деструкции и тип крахмала, поскольку по данной методике можно определить только природный, окисленный и ферментативно обработанный крахмал. Перспективными методами определения крахмала в различных средах и объектах являются методы, основанные на действии ферментов амилолитического типа (Хадыко и др., 2017).

Был разработан новый метод анализа происхождения сырья, из которого получен крахмал, с помощью масс-спектрометрии соотношения изотопов (Miura, Tanaka, 2007). Представлена новая и эффективная многоступенчатая система классификации микроскопических изображений крахмальных зерен (Choy et al., 2010). Микроструктура крахмальных зерен наблюдалась под оптическим микроскопом, их средние размеры находились в диапазоне 1–100 мкм. Химический и структурный состав рисового и картофельного крахмалов охарактеризован с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье и рентгеновской дифракции (Kowsik, Mazumder, 2018).

Целью данной работы является исследование фотолюминесцентных свойств картофеля различного качества для дальнейшей разработки оптического метода контроля содержания крахмала. Задачами являются измерение спектральных люминесцентных характеристик и расчет параметров люминесценции чистого крахмала и образцов картофеля.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для исследований использовались образцы картофеля с белой и желтой мякотью, визуально отличавшиеся на срезах (рис. 1). Партия I («белый») – картофель с высоким содержанием крахмала и сухого вещества (СВ – 26,2%, крахмал – 18,9%), партия II («желтый») – картофель с более низким содержанием сухого вещества и крахмала (СВ 16,5%, крахмал 9,3%). Содержание крахмала и сухого вещества определялось по плотности клубней.

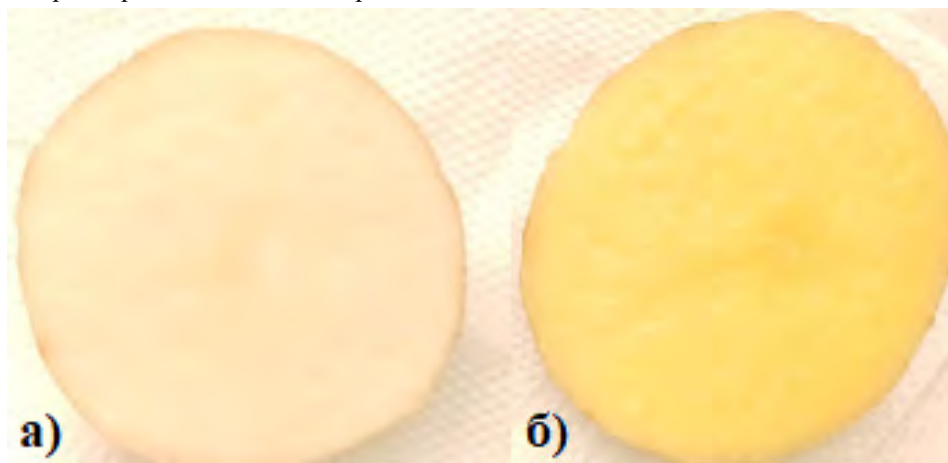


Рис. 1. Срезы исследуемых образцов картофеля: а) партия I; б) партия II

Измерения проводились на дифракционном спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама» (Люмэкс, С.-Петербург) с программным обеспечением «Рапогата Pro» и внешней камерой для исследуемых образцов.

Количество повторных измерений – 50 для 10-ти образцов каждой партии. Синхронные измерения производились в интервале 180–700 нм при смещении в 60 нм, являющемся оптимальным по итогу проведенных опытов. Коротковолновая фотолюминесценция – на интервале 310–450 нм при длине волны возбуждения 296 нм. Длинноволновая фотолюминесценция – на интервале 360–500 нм при длине волны 332 нм.

По полученным спектральным характеристикам определялась интегральная поглощательная способность H в спектральном диапазоне λ_1 – λ_2 :

$$H = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_e(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $\eta_e(\lambda)$ – спектральная характеристика возбуждения.

Интегральные параметры спектров $\varphi(\lambda)$, являющиеся потоками фотолюминесценции Φ , определялись по аналогичной формуле:

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_l(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $\varphi_l(\lambda)$ – спектральная характеристика фотолюминесценции.

Погрешность определения интегральных параметров H и Φ составляла до 7,5%. Математическое ожидание (среднее значение) M_λ , определяется по формуле:

$$M_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $\varphi(\lambda)$ – дифференциальная функция распределения.

Вычисление данного и последующих статистических параметров проводилось в программе Microsoft Origin. Дисперсия σ^2 находится по формуле:

$$\sigma^2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^2 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Числовой характеристикой асимметричности является центральный статистический момент 3-го порядка μ_3 :

$$\mu_3 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^3 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

На практике для оценки асимметричности используется коэффициент асимметрии As :

$$As = \frac{\mu_3}{\sigma^3}. \quad (6)$$

Числовой характеристикой крутизны спектра служит оценка центрального статистического момента 4-го порядка μ_4 :

$$\mu_4 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\lambda - M_\lambda)^4 \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (7)$$

На практике за оценку коэффициента крутизны принимается величина, которая называется эксцессом E_λ :

$$E_\lambda = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3. \quad (8)$$

Для получения уравнения числовой характеристики энергии фотолюминесценции следует учитывать то, что каждый фотон фотолюминесценции обладает энергией, связанной с длиной волны излучения соотношением:

$$E_{ph} = \frac{1240}{\lambda}, \quad (9)$$

где E_{ph} измеряется в эВ, а λ – в нм. Если известна дифференциальная функция распределения $\varphi(\lambda)$, то полная энергия спектра в диапазоне длин волн определяется как (Зиенко и др., 2020):

$$E = 1240 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda} \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерены спектральные характеристики возбуждения крахмала, а также «белого» и «желтого» картофеля при синхронном сканировании. Результаты представлены на рис. 2.

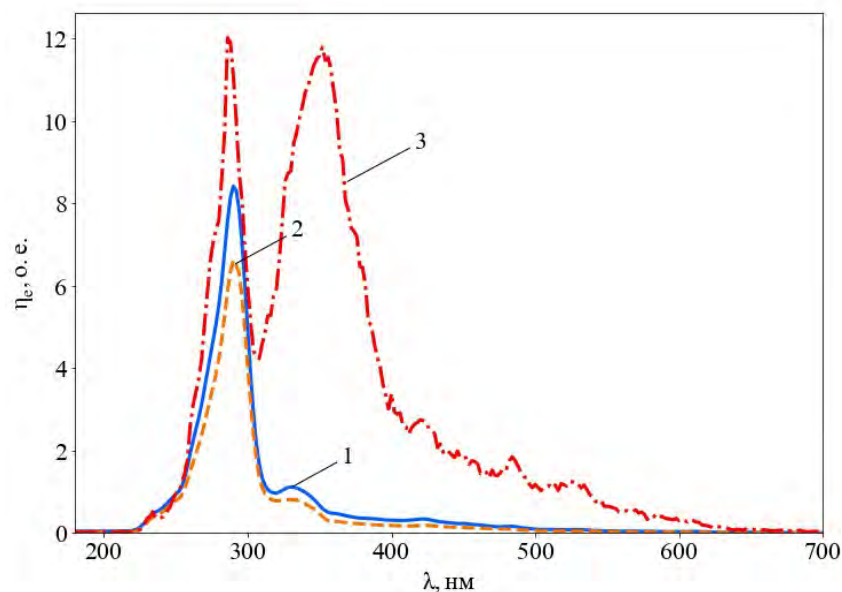


Рис. 2. Спектральные характеристики возбуждения $\eta_e(\lambda)$ картофеля партии I (1), картофеля партии II (2) и крахмала (3)

В спектральной области менее 220 нм и более 550 возбуждение отсутствует. Качественных различий характеристик $\eta_e(\lambda)$ между образцами картофеля нет, однако присутствуют количественные отличия. На коротковолновом максимуме 290 нм значение η_e для картофеля партии I составляет 8,4 о. е., а для картофеля партии II – 6,6 о. е., то есть они отличаются в 1,27 раз. Для крахмала на указанной длине волны значение η_e составляет 12 о. е. Второй максимум спектральной характеристики для образцов картофеля

находится в области около 330 нм, а для крахмала он смещен в более длинноволновую область – 352 нм. При этом если для картофеля значения η_e сравнительно малы (около 1 о. е.) и различаются между собой незначительно (примерно на 20%), то для чистого крахмала длинноволновый максимум практически не уступает коротковолновому и составляет 11,7 о. е.

Результаты расчета интегральных значений представлены в табл. 1.

Таблица 1. Интегральные параметры спектров возбуждения картофеля и крахмала

Образцы	Н, о. е.	Н, о. е. (в спектральном диапазоне)		
		225–307 нм	307–355 нм	310–400 нм
Крахмал	1353	337	–	706
Партия I	361	265	46	–
Партия II	273	209	35	–

Как видно из табл. 1, интегральные значения Н для крахмала превышают значения аналогичного показателя для «белого» картофеля в 3,74 раза во всем спектральном диапазоне, на первом пике – в 1,27 раз и на втором пике – в 15,3 раз. Интегральные значения Н для «белого» картофеля превышают показания для «желтого» в 1,32 раза, по спектральному диапазону на первом пике – в 1,26 раз и по спектральному диапазону на втором пике – в 1,31 раз.

На основе полученных спектров возбуждения были измерены и оценены спектральные

характеристики коротковолновой и длинноволновой фотолюминесценции. Результаты представлены на рис. 3 и 4.

Максимум спектра люминесценции крахмала смещен в длинноволновую область (358 нм) по отношению к максимуму картофеля (348 нм).

Пиковыми значениями являются 11,8 о. е. для крахмала, 1,1 о. е. для «белого» картофеля и 0,8 о. е. для «желтого» картофеля.

Результаты расчета интегральных значений представлены в табл. 2.

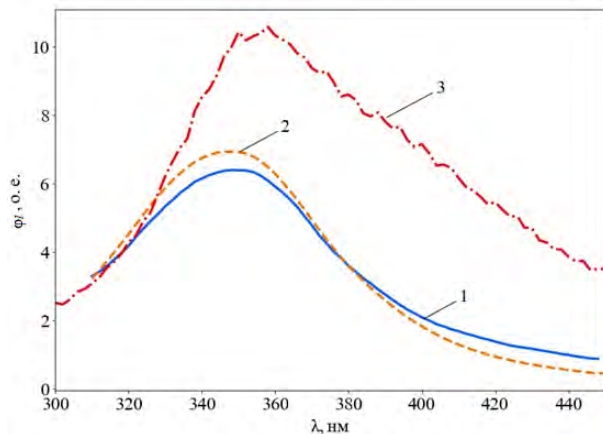


Рис. 3. Спектры коротковолновой фотолюминесценции $\Phi_f(\lambda)$ картофеля партии I (1), картофеля партии II (2) и крахмала (3)

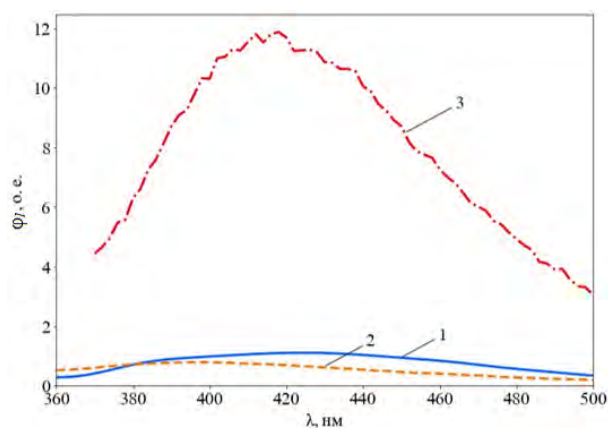


Рис. 4. Спектры длинноволновой фотолюминесценции картофеля партии I (1), партии II (2) и крахмала (3)

Таблица 2. Интегральные параметры спектров люминесценции образцов картофеля и крахмала

Образцы	Φ _к , о. е.	Φ _к , о. е.		Φ _д , о. е.	Φ _д , о. е.	
		(в спектральном диапазоне)			(в спектральном диапазоне)	
		310-380 нм	380-450 нм		383-500нм	
Крахмал	1042	546	406	980	963	
Партия I	482	362	119	110	100	
Партия II	484	387	96	75	61	

Как видно из табл. 2, интегральные значения параметров люминесценции крахмала превышают значения «белого» картофеля на коротковолновой люминесценции по всему участку (310–450 нм) в 2,16 раз, на первом участке (310–380 нм) – в 1,5 раз, на втором участке (380–450 нм) – в 3,41 раз. На длинноволновой люминесценции значения крахмала превышают значения «белого» картофеля на общем промежутке в 8,9 раз, на первом промежутке – в 9,95 раз, на втором промежутке – в 9,63 раз. На коротковолновой фотолюминесценции до 380 нм спектр «желтого» картофеля в 1,07 раз выше «белого», а от 380 до 450 нм, наоборот, спектр «белого» выше в 1,24 раз. В длинноволновой области поток фотолюминесценции Φ «белого» картофеля больше «желтого» в 1,46 раз на всем участке.

Таким образом, потоки фотолюминесценции Φ «белого» и «желтого» картофеля практически не различаются между собой в коротковолновом диапазоне спектра, но имеют более заметные различия в длинноволновом. Различия фотолюминесценции крахмала также более сильно проявляются в длинноволновом диапазоне: 9–13 раз против 2,16 раз в коротковолновом.

Сравнивая полученные результаты с ранее опубликованными другими авторами, можно отметить исследование (Yang et al., 2018), которое показало различия по содержанию амилозы в крахмале желтого, красного и пурпурного картофеля, а также заметное различие их пастообразующих свойств. Однако в работе (Yu et al., 2022) отмечено, что хотя размер гранул (D_{50} , 31,33–39,47 мкм) и содержание амилозы (29,91–36,66%) в крахмалах разных сортов значительно ($p \leq 0,05$) различаются, все они имеют сходную морфологию и кристаллическую структуру типа *B*. Кластерный анализ, основанный на физиологических и структурных параметрах крахмала, показывает, что крахмальные свойства картофеля не зависят от окраски клубня, а определяются фоном генотипа сорта (Yu et al., 2022). Таким образом, несмотря на различия в пигментации мякоти оптическое люминесцентное определение содержания крахмала в картофеле возможно. Наибольшие различия потока люминесценции картофеля с различным содержанием крахмала наблюдается при длинноволновом возбуждении.

Результаты расчета статистических параметров представлены в табл. 3.

Таблица 3. Статистические параметры крахмала и картофеля

Спектр	M_{λ} , нм	σ^2	A_S	E_{λ}	E , эВ
Крахмал					
Возбуждение	359	5475	1,23	1,65	3,58
Коротковолновая люминесценция	374	1308	0,13	–0,81	3,35
Длинноволновая люминесценция	429	1026	0,23	–0,81	2,91
Картофель партии I					
Возбуждение	308	3525	2,41	7,30	4,14
Коротковолновая люминесценция	361	1019	0,64	–0,21	3,46
Длинноволновая люминесценция	428	1167	0,14	–0,87	2,91
Картофель партии II					
Возбуждение	304	2967	2,67	9,50	4,19
Коротковолновая люминесценция	357	859	0,75	0,20	3,49
Длинноволновая люминесценция	420	1276	0,21	–0,87	3,00

Проанализировав данные табл. 3, можно отметить, что математическое ожидание крахмала превосходит показания «белого» картофеля, но значительное превышение заметно только на спектрах возбуждения. В случае коротковолновой фотолюминесценции математическое ожидание для крахмала достаточно высокое, для картофеля оно меньше, но примерно одинаково между собой. Для длинноволновой люминесценции все значения близки. Дисперсия спектра возбуждения и коротковолновой люминесценции крахмала значительно превышает дисперсию образцов картофеля, а для длинноволновой люминесценции – наоборот.

Асимметрия всех графиков правосторонняя. При этом наибольшие различия коэффициентов A_S также характерны для возбуждения и коротковолновой люминесценции. Кривые возбуждения островершинные ($E_{\lambda} > 0$), особенно для образцов картофеля. Для коротковолновой люминесценции эксцесс спектров картофеля близок к нулю, но с разным знаком. Для длинноволновой люминесценции эксцесс отрицательный (кривые плосковершинные) и

практически не отличается для всех исследованных образцов: –0,81...–0,87. Имеются заметные различия в энергии спектра возбуждения между чистым крахмалом и образцами картофеля, но энергия спектров люминесценции практически равна.

Таким образом, наиболее информативными статистическими параметрами для оценки содержания крахмала являются дисперсия, асимметрия и эксцесс коротковолновой люминесценции.

ВЫВОДЫ

1. Характеристики возбуждения расположены в ближней ультрафиолетовой и видимой областях спектра (220–550 нм), при этом основные максимумы расположены примерно на 290 нм и 332 нм для картофеля и 352 нм для крахмала.

2. Спектральные характеристики фотолюминесценции крахмала значительно превосходят аналогичные характеристики срезов картофеля по величине максимума и интегральному потоку.

3. Наиболее чувствительным технологически реализуемым и экологически безопасным методом контроля содержания крахмала является измерение потока фотолуминесценции в диапазоне 383–500 нм после возбуждения излучением 332 нм. Для статистических параметров, наоборот, наиболее значительное различие спектров наблюдается в коротковолновой области излучения. Однако, в отличие от измерений потоков, расчет статистических параметров является гораздо более ресурсоемким и требует измерения всего спектра.

Таким образом, измерение потока фотолуминесценции и расчет дисперсии, асимметрии и эксцесса в коротковолновой области являются весьма информативными при оценке содержания крахмала картофеля. Полученные результаты могут быть положены в основу разработки технологии фотолуминесцентной диагностики картофеля, которая будет весьма перспективной для применения в сельском хозяйстве и перерабатывающей промышленности.

Список литературы

- Гиченкова О.Г., Родин К.А., Новиков А.А., Лаптина Ю.А., Куликова Н.А. Эколого-географическая оценка сортов картофеля отечественной селекции на светло-каштановых почвах Нижнего Поволжья // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12. № 1. С. 34–48.
- Гольдштейн В.Г., Дегтярев В.А., Коваленок В.А., Семенова А.В., Морозова А.А. Определение пригодности различных сортов картофеля (*Solanum tuberosum* L.) с белой и пигментированной мякотью для переработки на картофелепродукты // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. № 23 (1). С. 98–109.
- Дубцова Г.Н., Дедова И.А., Кусова И.У., Байков В.Г. Применение модифицированного крахмала при производстве мучных изделий во фритюре // Масложировая промышленность. 2012. № 5. С. 14–17.
- Зиенко С.И., Беляков М.В., Малышкин В.В. Новые методы и средства спектрально-люминесцентного анализа семян растений. Монография. Смоленск: Универсум, 2020. 184 с.
- Ловкис З.В., Ермаков А.И., Заболотец А.А. Перспективы применения нативного картофельного крахмала в кондитерской промышленности // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2018. Т. 11 № 3(41). С. 19–30.
- Папахин А.А., Лукин Н.Д., Ананских В.В., Бородина З. М. О современных направлениях технологии гидролиза крахмала // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 12. С. 84–89.
- Сердюков В.А. Влияние условий выращивания и технологий хранения на биохимический состав клубней картофеля // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 1. С. 126–131.
- Творогова А.А., Коновалова Т.В. Обоснование технологической функциональности нативных крахмалов в производстве мороженого без пищевых добавок // Холодильная техника. 2015. № 6. С. 39–42.
- Хадыко И.А., Новожилов Е.В., Пригодич Я.А., Канарский А.В. Ферментативный метод определения крахмала в бумаге и картоне // Вестник технол. ун-та. 2017. Т. 20. № 7. С. 156–159.
- Хадыко И.А., Новожилов Е.В., Чухчин Д.Г. Влияние предварительной подготовки картона на определение крахмала ферментативным методом // Изв. вузов. Лесной журнал. 2021. № 5. С. 150–162.
- Abazov A.A., Abidov K.A., Basiev S.B., Nazranov K. Breeding of early ripening potato varieties under the conditions of the KabardinoBalkarian foothill zone // E3S Web Conf. 2021. Vol. 262. 01034.
- Choy S.-K., Tong C.-S., Zhao Z.-Z. A novel and effective multistage classification system for microscopic starch grain images // Microsc. Res. Tech. 2010. № 73. pp. 77–84.
- Garcia M.A., Garcia C.F., Faraco A.A.G. Pharmaceutical and Biomedical Applications of Native and Modified Starch: A Review // Starch – Stärke. 2020. № 72. pp. 1900270.
- Kapusniak (Jochym) K., Wojcik M., Wrobel K., Rosicka-Kaczmarek J., Kapusniak J. Assessment of physicochemical and thermal properties of soluble dextrin fiber from potato starch for use in fruit mousses // J. Sci. Food Agric. 2021. № 101. pp. 4125–4133.
- Kolarič L., Minarovičová L., Lauková M., Karovičová J., Kohajdová Z. Pasta noodles enriched with sweet potato starch: Impact on quality parameters and resistant starch content // J. Texture Stud, 2020, № 51, pp. 464–474.
- Kowsik P.V., Mazumder N. Structural and chemical characterization of rice and potato starch granules using microscopy and spectroscopy // Microsc. Res. Tech, 2018, № 81, pp. 1533–1540.
- Miura C., Tanaka F. Determination of ¹³C content in starch from paddy rice plants using stable isotope ratio mass spectrometry // Soil Science & Plant Nutrition, 2007, № 53, pp. 606–611.
- Saracoglu P., Ozmen M.M. Starch Based Nanogels: From Synthesis to Miscellaneous Applications // Starch-Stärke. 2021. № 73. 2100011.
- Yang L., Xia Y., Junejo S.A., Zhou Y. Composition, structure and physicochemical properties of three coloured potato starches // Int. J. Food Sci. Technol. 2018. № 53. pp. 2325–2334.
- Yu Y., Han F., Huang Y., Xiao L., Cao S., Liu Z., Thakur K., Han L. Physicochemical Properties and Molecular Structure of Starches from Potato Cultivars of Different Tuber Colors // Starch. 2022. № 74. 2200096.

References

- Gichenkova O.G., Rodin K.A., Novikov A.A., Laptina Yu.A., Kulikova N.A. Ekologo-geograficheskaya otsenka sortov kartofelya otechestvennoy selektsii na svetlo-kashtanovykh pochvakh Nizhnego Povolzh'ya [Ecological and geographical assessment of potato varieties of domestic selection on light chestnut soils of the Lower Volga region] // *Melioratsiya i gidrotehnika*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 34–48.
- Gol'dshteyn V. G., Degtyarev V.A., Kovalenok V.A., Semenova A.V., Morozova A.A. Opredeleniye prigodnosti razlichnykh sortov kartofelya (*Solanum tuberosum* L.) s beloy i pigmentirovannoy myakot'yu dlya pererabotki na kartofeleprodukty [Determination of the suitability of various potato varieties (*Solanum tuberosum* L.) with white and pigmented pulp for processing into potato products] // *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka*, 2022, no. 23(1), pp. 98–109.
- Dubtsova G.N., Dedova I.A., Kusova I.Yu., Baykov V.G. Primeneniye modifitsirovannogo krakhmala pri proizvodstve muchnykh izdeliy vo frityure [The use of modified starch in the production of deep-fried flour products] // *Maslozhirovaya promyshlennost'*, 2012, no. 5, pp. 14–17.
- Ziyenko S.I., Belyakov M.V., Malyshev V.V. *Novyye metody i sredstva spektral'no-lyuminescentnogo analiza semyan rasteniy. Monografiya* [New methods and means of spectral-luminescent analysis of plant seeds. Monograph]. Smolensk: Universum, 2020, 184 p.
- Lovkis Z.V., Yermakov A.I., Zabolotets A.A. Perspektivy primeneniya nativnogo kartofel'nogo krakhmala v konditerskoy promyshlennosti [Prospects for the use of native potato starch in the confectionery industry] // *Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii*, 2018, vol. 11, no. 3(41), pp. 19–30.
- Papakhin A.A., Lukin N.D., Ananskikh V.V., Borodina Z.M. O sovremennykh napravleniyakh tekhnologii gidroliza krakhmala [About modern directions of starch hydrolysis technology] // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2020, vol. 34, no. 12, pp. 84–89.
- Serdyukov V.A. Vliyaniye usloviy vyrashchivaniya i tekhnologiy khraneniya na biokhimicheskiy sostav klubney kartofelya [Influence of growing conditions and storage technologies on the biochemical composition of potato tubers] // *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2023, no. 1, pp. 126–131.
- Tvorogova A.A., Konovalova T.V. Obosnovaniye tekhnologicheskoy funktsional'nosti nativnykh krakhmalov v proizvodstve morozhenogo bez pishchevykh dobavok [Substantiation of the technological functionality of native starches in the production of ice cream without food additives] // *Kholodil'naya tekhnika*, 2015, no. 6, pp. 39–42.
- Hadyko I.A., Novozhilov Ye.V., Prigodich Ya.A., Kanarskiy A.V. Fermentativnyy metod opredeleniya krakhmala v bumage i kartone [Enzymatic method of starch determination in paper and cardboard] // *Vestnik tekhnol. un-ta*, 2017, vol. 20, no. 7, pp. 156–159.
- Hadyko I.A., Novozhilov Ye.V., Chuhchin D.G. Vliyaniye predvaritel'noy podgotovki kartona na opredeleniye krakhmala fermentativnym metodom [The effect of the preliminary preparation of cardboard on the determination of starch by the enzymatic method] // *Izv. vuzov. Lesnoy zhurnal*, 2021, no. 5, pp. 150–162.
- Abazov A.A., Abidov K.A., Basiev S.B., Nazranov K. Breeding of early ripening potato varieties under the conditions of the Kabardino-Balkarian foothill zone // E3S Web Conf., 2021, vol. 262, 01034.
- Choy S.-K., Tong C.-S., Zhao Z.-Z. A novel and effective multistage classification system for microscopic starch grain images // *Microsc. Res. Tech.*, 2010, no. 73, pp. 77–84.
- Garcia M.A., Garcia C.F., Faraco A.A.G. Pharmaceutical and Biomedical Applications of Native and Modified Starch: A Review // *Starch-Stärke*, 2020, no. 72, pp. 1900270.
- Kapusniak (Jochym) K., Wojcik M., Wrobel K., Rosicka-Kaczmarek J., Kapusniak J. Assessment of physicochemical and thermal properties of soluble dextrin fiber from potato starch for use in fruit mousses // *J. Sci. Food Agric.*, 2021, no. 101, pp. 4125–4133.
- Kolarič L., Minarovičová L., Lauková M., Karovičová J., Kohajdová Z. Pasta noodles enriched with sweet potato starch: Impact on quality parameters and resistant starch content // *J. Texture Stud.*, 2020, no. 51, pp. 464–474.
- Kowsik P.V., Mazumder N. Structural and chemical characterization of rice and potato starch granules using microscopy and spectroscopy // *Microsc. Res. Tech.*, 2018, no. 81, pp. 1533–1540.
- Miura C., Tanaka F. Determination of ¹³C content in starch from paddy rice plants using stable isotope ratio mass spectrometry // *Soil Science & Plant Nutrition*. 2007. no. 53. pp. 606–611.
- Saracoglu P., Ozmen M.M. Starch Based Nanogels: From Synthesis to Miscellaneous Applications // *Starch-Stärke*, 2021, no. 73, 2100011.
- Yang L., Xia Y., Junejo S.A., Zhou Y. Composition, structure and physicochemical properties of three coloured potato starches // *Int. J. Food Sci. Technol.*, 2018, no. 53, pp. 2325–2334.
- Yu Y., Han F., Huang Y., Xiao L., Cao S., Liu Z., Thakur K., Han L. Physicochemical Properties and Molecular Structure of Starches from Potato Cultivars of Different Tuber Colors // *Starch*, 2022, no. 74, 2200096.