

# ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ / STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.1007-1020>

УДК 664.38



## Комплексная биоконверсия вторичных продуктов переработки гороховой муки в кормовые дрожжи

© 2023. В. В. Колпакова<sup>1</sup>✉, Р. В. Уланова<sup>2</sup>, Д. С. Куликов<sup>1</sup>, В. А. Гулакова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха», Люберцы, Московская обл., Российская Федерация,

<sup>2</sup>Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского, ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

*Цель исследований – разработка комплексной биоконверсии вторичных продуктов переработки (ВПП) гороховой муки: жидкой сыворотки и нерастворимого крахмалобелкового остатка (НКБО), образующихся при выделении пищевого белкового концентрата (БК), с использованием различных ферментных препаратов. Исследования проведены в 2021-2023 гг. Биоконверсия сыворотки и НКБО в кормовые дрожжи (КД) выполнена с ассоциацией культур *S. cerevisiae* 121 и *G. candidum* 977 (1:1). Создана математическая модель зависимости роста биомассы на сыворотке от технологических факторов, определены оптимальные параметры: pH, температура, количество посевного материала. В процессе синтеза биомассы из сыворотки микроорганизмы усваивали глюкозу, ксилозу, галактозу, фруктозу. Установлены параметры гидролиза НКБО и условия его совместной биоконверсии с сывороткой с теми же микроорганизмами: количество остатка, добавляемого к массе сыворотки, pH, температура, продолжительность процесса, давление. С гидролизированным при pH 1,8 НКБО количество белка в биомассе повышалось в 2,2 раза, восстанавливающих сахаров – в 6,1 раза по сравнению с исходной сывороткой. При этом усваивались глюкоза и мальтоза. Сухие КД содержали 51,09-61,68 % белка, 2-8 % липидов, золы 5-8 % на сухое вещество. Аминокислотный скор белков равнялся 90-247 %, соотношение насыщенных (23,5 %) и ненасыщенных жирных кислот (71,67 %) – 1:3, омега-6 жирные кислоты – 19,73 %, транс-изомеры – 5,0 %. Дрожжи богаты натрием, калием, кальцием, магнием, цинком. Массовая доля нуклеиновых кислот и тяжелых металлов в КД находилась в пределах нормы, перевариваемость *in vitro* составила 85,73-89,74 %. Данные указывали на целесообразность утилизации ВПП гороховой муки комплексной биоконверсией в КД высокого качества.*

**Ключевые слова:** вторичные продукты переработки, сыворотка, нерастворимый крахмалобелковый остаток

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха» (тема № FGGM-2022-0006).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Колпакова В. В., Уланова Р. В., Куликов Д. С., Гулакова В. А. Комплексная биоконверсия вторичных продуктов переработки гороховой муки в кормовые дрожжи. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(6):1007-1020. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.1007-1020>

Поступила: 26.05.2023

Принята к публикации: 13.11.2023

Опубликована онлайн: 20.12.2023

## Complex bioconversion of secondary products of processing pea flour into fodder yeast

© 2023. Valentina V. Kolpakova<sup>1✉</sup>, Ruzaliya V. Ulanova<sup>2</sup>, Denis S. Kulikov<sup>1</sup>, Valentina A. Gulakova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing – Branch of Russian Potato Research Centre, Moscow region, Russian Federation,

<sup>2</sup>S. N. Vinogradsky Institute of Microbiology, Federal Research Centre «Fundamentals of Biotechnology» of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*The purpose of the research is to develop a comprehensive bioconversion of secondary processing products (SPP) of pea flour: liquid whey and insoluble starch-protein residue (ISPR), formed during the isolation of food protein concentrate (PC) using various enzyme preparations. The research was carried out in 2021-2023. The bioconversion of whey and ISPR into fodder yeast (FY) was performed with the association of cultures of *S. cerevisiae* 121 and *G. candidum* 977 (1:1). There was created a mathematical model of the dependence of biomass growth on whey on technological factors, and the optimal parameters were determined: pH, temperature, amount of inoculum. In the process of biomass synthesis microorganisms absorbed glucose, xylose, galactose, fructose from whey. The parameters of ISPR hydrolysis and the conditions for its joint bioconversion with whey with the same microorganisms were established: the amount of residue added to the mass of whey, pH, temperature, process duration, pressure. With insoluble starch-protein residue hydrolyzed at pH 1.8, the amount of protein in the biomass increased by 2.2 times, reducing sugars – by 6.1 times, compared with the original whey. At the same time, glucose and maltose were absorbed. Dry FYs contained 51.09-61.68 % protein, 2-8 % lipids, and ash content 5-8 % per dry matter. The amino acid score of proteins was 90-247 %, the ratio of saturated (23.5 %) and unsaturated fatty acids (71.67 %) – 1:3, omega-6 fatty acids – 19.73 %, trans-isomers – 5.0 %. Yeast is rich in sodium, potassium, calcium, magnesium, zinc. The mass fraction of nucleic acids and heavy metals in FYs were within the normal range, in vitro digestibility was 85.73-89.74 %. The data indicated the expediency of utilization of pea flour secondary processing products into high-quality FY by comprehensive bioconversion.*

**Keywords:** secondary processing products, whey, insoluble starch-protein residue

**Acknowledgements:** the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Russian Potato Research Centre (theme No. FGGM-2022-0006).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Conflict of interest:** the authors stated that there was no conflict of interest.

**For citations:** Kolpakova V. V., Ulanova R. V., Kulikov D. S., Gulakova V. A. Complex bioconversion of secondary products of processing pea flour into fodder yeast. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(6):1007-1020. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.1007-1020>

Received: 26.05.2023

Accepted for publication: 13.11.2023

Published online: 20.12.2023

Несмотря на активное развитие рынка кормовых продуктов, агропромышленный комплекс испытывает нехватку в качественных кормовых добавках, содержащих белки, аминокислоты, углеводы, минеральные вещества. Часть из них, как правило, имеет высокую стоимость, для снижения которой целесообразно использовать безопасные и полноценные по химическому составу субстраты из вторичных продуктов переработки (ВПП) растительного сырья ферментацией их микроорганизмами [1, 2, 3]. Биомасса микроорганизмов предназначена, преимущественно, для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных и птицы. Традиционные способы получения кормовой биомассы, основанные на использовании сред из гидролизатов некоторых растений, углеводов нефти и низших спиртов имеют ряд недостатков. Среды требуют тщательной очистки от лигногуминовых примесей, фурфурола, оксиметилфурфурола и других соединений, тормозящих рост микроорганизмов. При получении биомассы из углеводов

особенно важны очистка субстрата от парафинов нефти и снижение расхода воды (например, для охлаждения теплообменных устройств). Более безопасными являются ВПП растительного сырья пищевой промышленности и сельского хозяйства: замочные воды зерновых, бобовых культур, мезга, жмыхы, шроты, фруктовые, овощные отходы и т. д. Они сбрасываются в канализацию и загрязняют окружающую среду, так как богаты органическими и минеральными соединениями. ВПП могут служить питательной средой для трансформации их микроорганизмами в обогащенную элементами микробную биомассу. Биоконверсия ВПП является альтернативным путем для традиционных способов получения пищевого и кормового белка [4].

Установлено, например, что депротеинизированные сточные воды от переработки картофеля, обогащенные глицерином, могут использоваться в качестве источника углерода при производстве биомассы кормовых дрожжей *Candida utilis* в течение 48 ч. с содержанием белка 36,7 г/100 г и выходом 18,51 г/л [5]. При глубин-

ном культивировании дрожжей *Rhodotorula gracilis* также на сточных водах, остающихся от термокислотной коагуляции белков картофельного сока, за 72 часа выход биомассы составил 28,65 г/дм<sup>3</sup>, содержание липидов – 25,57 г/100 см<sup>3</sup> [6]. Кормовой белок высокого качества получили ферментацией подсырной сыворотки с культурами *Kluyveromyces marxianus* и *Candida krusei* с выходом биомассы 6,6 г/л и дрожжами *Kluyveromyces fragilis* с выходом клеток 37 г/л за 12 ч культивирования [7].

Отходы, образующиеся при переработке томатов, лимонов, моркови, фенхеля, также используют для получения дешевой микробной биомассы термофильных и галофильных микроорганизмов. Отходы цитрусовых являются очень привлекательными источниками для культивирования микробных сообществ. При производстве апельсинового сока, например, высвобождается 8-20 млн тонн твердых и жидких отходов, на основе которых получали микробиологическую продукцию с высокой добавленной стоимостью. Апельсиновая корка служила хорошим субстратом для культивирования дрожжей *C. utilis* при накоплении биомассы 15,71 г/л и содержании белка в ней 6,22 % [8, 9]. На яблочных выжимках отмечен рост биомассы *Pleurotus sapidus* с содержанием 21 % белка, 4 % липидов, 74 % углеводов, линолевой, глутаминовой кислот [10] и 115 мкг/г витамина D<sub>2</sub>, последний синтезировался при УФ-облучении. Биомассу с массовой долей белка 19,8-36,0 % получали с культурами *Trichoderma viride*, *Aspergillus niger* и *A. oryzae* трансформацией сточных вод, образующихся при производстве вина, и отходов ликероводочных заводов с *A. niger* при полной утилизации моносахаридов с выходом 35 г/дм<sup>3</sup> [11].

На отходах производства пальмового масла синтезировали кормовую биомассу с *Aspergillus terreus* при урожайности 1,68 г/дм<sup>3</sup> и 15 % посевного материала [12]. Кормовые добавки из спиртовой барды с пшеничными отрубями получены выращиванием дрожжей *Saccharomyces diastaticus* и *Rhodospiridium species* с содержанием белка до 59 % и незаменимых аминокислот до 41 % [13]. Биоконверсия сточных вод, образующихся из тапиоки после удаления крахмала, тоже обеспечивала получение продуктов с массовой долей белка 68,0-69,56 % белка и 11 % липидов с культурами *Spizulina platensis* и *Streptomyces tritici* [14]. Выполнена биологическая переработка сыворотки, образующейся после удаления казеина,

для получения продукции пищевой и фармацевтической промышленности [15, 16].

Для рационов сельскохозяйственных животных и птиц на отходах помола зерна сорго, риса, производства сахара с монокультурами *Trichoderma longibrachiatum*, *A. terreus* и ассоциацией культур *Aspergillus species* и *T. viride* произведена кормовая биомасса с массовой долей белка 19,0-43,7 % [17, 18]. Из отходов производства кукурузы и на сахарной мелассе ферментацией культур *Arachniotus species* и *C. utilis* также получена белковая биомасса, содержащая все незаменимые аминокислоты [19].

Разработана технология белкового концентрата (БК) культивированием дрожжей *K. marxianus* на ферментоллизате лузги подсолнечника с выходом до 30 г/л, содержанием белка 59,29±2,96 % и нуклеиновых кислот – не более 2 % [20]. На основе побочного продукта экстракции горохового белка с грибами *A. oryzae*, *Fusarium venenatum*, *Micrelenchus purpureus*, *Neurospora intermedia*, *Rhizopus oryzae* синтезирован пищевой компонент для замены мяса [21]. Штаммы грибов ферментировали при 35±2 °С в течение 48 ч до 43,13-59,74 % содержания белка в биомассе. Биоконверсия ВПП зерна тритикале на крахмал выполнена с дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* [3] и грибом *Pleurotus* [22], а зерна гороха и нута – сообществом микромицета рода *Geotrichum* и дрожжей *S. cerevisiae* [23]. Для кормовой добавки среда, например, готовилась с сывороточными водами, освобождающимися после извлечения крахмала и белка из зерновых культур. В сыворотку вносили ВПП, образующиеся после извлечения белка и крахмала А из зерна тритикале. Среда засеивалась микроорганизмами, ферментировали, суспензию термически обрабатывали и высушивали. Культивирование *Umbelopsis isabellina* на субстратах, составленных из отходов бобовых и злаковых, обеспечило получение биопродуктов с повышенным содержанием различных полиненасыщенных жирных кислот и каротиноидных пигментов [24]. Очевидно, что биоконверсия ВПП зерновых и зернобобовых культур на белковые продукты и крахмал, основанная на ферментации микроорганизмами, является эффективным способом восполнения полноценных кормовых ресурсов для животных с целью увеличения мясной и молочной продукции и снижения нежелательной нагрузки на биосферу [25, 26]. После извлечения микробной биомассы, как правило, образуется культуральная жидкость с

органическими и минеральными веществами, которая сливается в канализацию/водоемы и загрязняет окружающую среду. При этом не всегда используют и твердые отходы сырья. Имеются только единичные работы и более ранние труды по комплексной утилизации ВПП зерна гороха на БК, но без ферментации сырья [27]. Поэтому для производства биомассы из ВПП зернобобовых культур, наряду с обеспечением кормовой ценности, необходимы новые решения, направленные на ресурсосбережение и экологическую безопасность с вовлечением в процессы биотрансформации всего комплекса таких продуктов.

**Цель исследований** – разработка комплексной биоконверсии жидкой сыворотки с нерастворимым крахмалобелковым остатком, которые образуются как вторичные продукты переработки гороховой муки, на белковый концентрат пищевого назначения и кормовые дрожжи.

**Научная новизна** – впервые теоретически обоснован способ кислотного гидролиза НКБО и его совместной биоконверсией с сывороткой, остающейся после выделения пищевого белкового концентрата, в кормовые дрожжи. Установлена ступенчатая глубина гидролиза и выявлена наиболее эффективная ассоциация культур микроорганизмов для синтеза кормовых дрожжей с ценным химическим составом.

**Материал и методы.** В качестве основных объектов исследования использовали сыворотку из муки, полученной из зерна гороха посевного сорта Ямал, с массовой долей, % на СВ: белок (Nx6,25) – 25,7; зола – 2,67; жир – 1,46; крахмал – 51,50; углеводы – 18,76. Горох выращен в Алтайском крае в 2019-2022 году. Объектом сравнения по отдельным показателям служили кормовые дрожжи, полученные из нутовой муки.

Для получения БК использовали ферментные препараты (ФП) компании Novozymes (Дания): Shearzym 500 L с ксиланазной активностью 500 ед/г, Viscoferm L с целлюлолитической активностью 600 ед/г; Fungamyl 800 L – источник  $\alpha$ -амилазы; AMG 300 L 2500 – источник глюкоамилазы; Alcalase 2,4 L FG – источник протеаз. Осаждение белков из экстракта проводили в изoeлектрической точке лактатом кальция (ГОСТ 31905-2012) – Е<sub>327</sub> и ФП трансклутаминой (Фарма Ингредиентс) с активностью 100 ед/г.

Содержание сухих веществ (СВ) в сыворотке – 3,5±1,3 %, массовая доля, % на СВ: общий белок (Nx6,25) – 28,35±0,75, истинный белок – 11,06±0,23, небелковый азот – 17,28±0,23;

рН 6,0–6,5. Влажность НКБО – 11,37±0,37 %; на СВ, %: белок (Nx6,25) – 7,07±2,80; крахмал – 61,30±0,4; волокна – 28,11±0,41; жир – 2,89±0,23; зола – 0,63±0,02. Для биоконверсии сыворотки и НКБО муки использовали дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* 121 из коллекции Института микробиологии им. С. М. Виноградского и микромицет *Geotrichum candidum* 977, филогенетическое положение которого установлено в ФГБУ ГосНИИгенетика (рег. № ВКПМ Y-300).

Музейные культуры с сусл-агара пересевали в пробирку с сывороткой и культивировали 24 ч. Культуру пересевали в колбы с питательной средой и выращивали на качалке при 27±1 °С и скорости вращения 150 мин<sup>-1</sup> 48 ч. Суспензию инактивировали при 95±5 °С и охлаждали 10-15 мин при температуре 22±2 °С. Биомассу от культуральной жидкости отделяли центрифугированием при 4 000 мин<sup>-1</sup> в течение 10 мин. Кормовые дрожжи из биомассы (КД-1), дрожжи из биомассы с культуральной жидкостью (КД-2) и БК сушили на лиофильной установке Hochvacuum HVDTG-50 (Германия) в вакууме при -80 °С.

Массовую долю общего белка определяли по ГОСТ 10846-91, истинного белка – по методу Барнштейна, влаги – ГОСТ 13586.5-93, золы – ГОСТ 27494-87, жира – ГОСТ 29033-91, восстанавливающих сахаров (ВС) – из данных хроматографии. Идентификацию пиков проводили по библиотеке масс-спектров NIST 11 и метчикам: арабинозе, глюкозе, ксилозе, раффинозе, мальтозе и другим химически чистым углеводам. Аминокислотный состав КД анализировали на хроматографе модели L-8800 фирмы Hitachi (Япония) в режиме анализа белковых гидролизатов с сульфированным сополимером стирола с дивинилбензолом и ступенчатым градиентом натрий-цитратного буферного раствора с возрастающим значением рН и молярности (ГОСТ 32195-2013). Жирнокислотный состав липидов КД исследовали на хроматографе с масс-детектором Shimadzu GCMS-QP 2010 Ultra при 120 °С с носителем гелием при скорости потока 35,6 см/сек.

Для проведения электрофореза в ПААГ с SDS 50 мкг белковой пробы смешивали с буфером в соотношении 1:1. Буфер готовили из 60 см<sup>3</sup> глицерина, 1 мг бромфенол-синего с доведением рН до 6,8 концентрированной HCl. Добавляли 5 см<sup>3</sup> β-меркаптоэтанола, объем доводили до 100 см<sup>3</sup>. Пробы и растворы белковых маркеров в количестве 102 мкг/30 мкл нагревали 2 мин при 95-100 °С. Для приготовления 15%-го разделяющего геля смешивали 4,5 см<sup>3</sup>

раствора АБ (навеску 29,6 г акриламида растворяли в небольшом количестве воды, добавляли 0,4 г бисакриламида, доводили объем до 100 см<sup>3</sup>), 2,5 см<sup>3</sup> трис-НСl буфера, рН 8,0, 8,3 см<sup>3</sup> воды, 20 мкл ТЕМЕД, 160 мкл персульфата аммония (ПСА). Для приготовления концентрирующего геля смешивали 1 см<sup>3</sup> раствора АБ, 1 см<sup>3</sup> трис-НСl буфера с рН 6,8, 3 см<sup>3</sup> воды, 20 мкл ТЕМЕД, 160 мкл ПСА.

Перевариваемость КД исследовали по ГОСТ 24230-80, количество нуклеиновых кислот – по методу Спирина (ОФС.1.7.2.0018.15). Результаты обработаны в программах Table

Curve 2D 5.1, Table Curve 3D 4.0, Mathematica 10.3 и Statistica 10. Доверительный интервал среднего арифметического рассчитан по уровню значимости  $p = 0,05$ .

**Результаты и их обсуждение.** Для разработки комплексной биотехнологии пищевого и кормовых БК из гороховой муки разработана биоконверсия сыворотки, остающейся после осаждения белков из экстракта в изоэлектрической точке, и биоконверсия ее совместно с НКБО, который выделяли центрифугированием белкового экстракта, полученного из муки с ФП по схеме, приведенной на рисунке 1.

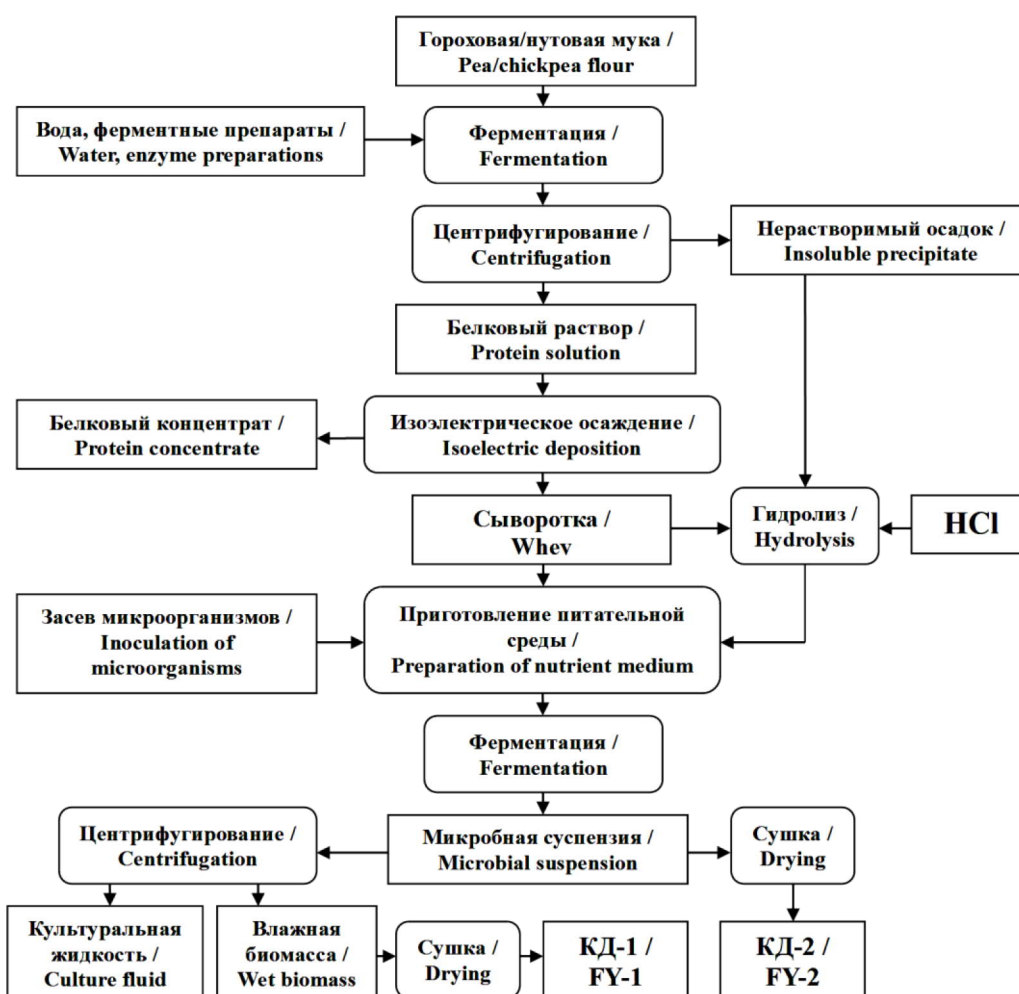


Рис. 1. Схема переработки гороховой муки на белковый концентрат (БК) и кормовые дрожжи (КД) / Fig. 1. Scheme of processing pea flour into protein concentrate (PC) and fodder yeast (FY)

**Биоконверсия гороховой сыворотки.** Для биоконверсии ВПП муки отобрали наиболее эффективные микроорганизмы из дрожжей родов *Pichia*, *Rhodotorula*, *Hansenula*, *Saccharomyces* и микромицетов родов *Geotrichum* и *Penicillium*. Наиболее активно на гороховой

сыворотке росли дрожжи *S. cerevisiae* 121 и микромицет *G. candidum* 977, из которых при соотношении 1:1 на 2-е сутки роста уже формировался консорциум. Морфология клеток монокультур и их консорциума представлена на рисунке 2.



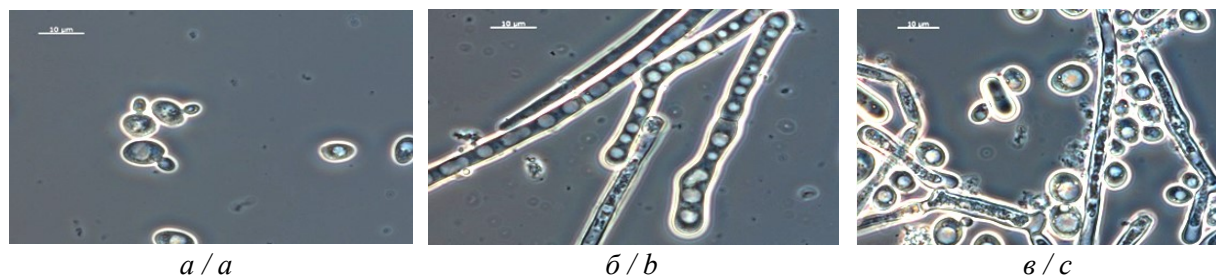


Рис. 2. Клетки монокультур и их консорциума: *S. cerevisiae* 121 (а), *G. candidum* 977 (б), *S. cerevisiae* 121 + *G. candidum* 977 (в) /

Fig. 2. Cells of monocultures and their consortium: *S. cerevisiae* 121 (a), *G. candidum* 977 (b), *S. cerevisiae* 121 + *G. candidum* 977 (c)

Наиболее эффективным для роста микроорганизмов был диапазон pH 6,0-6,5; при более низких значениях pH (4,5-5,0) или более высоких (7,5-8,0) рост замедлялся. При выращивании дрожжей на сыворотке белка в биомассе синте-

зировалось в 3,5 раза меньше, микромицета – на 15 %, чем при их совместном культивировании (57,90±0,51 % на СВ). Самое большее количество СВ также накапливалось при культивировании консорциума (табл. 1).

Таблица 1 – Массовая доля белка и СВ в биомассе микроорганизмов на гороховой сыворотке / Table 1 – Mass fraction of protein and dry matter in the biomass of microorganisms on pea whey

Биомасса с культурой / Biomass with culture	Сухое вещество, % / Dry matter, %	Белок, % на СВ / Protein, % per DM
<i>G. candidum</i> 977	17,49±0,21	16,39±0,31
<i>S. cerevisiae</i> 121	19,21±0,34	50,23±0,42
<i>G. candidum</i> 977 + <i>S. cerevisiae</i> 121	18,89±0,41	57,90±0,51

Для выявления оптимальных параметров и определения закономерностей влияния pH среды, температуры, количества посевного материала на рост биомассы составлен план эксперимента в виде латинских квадратов. Матрица обработана в программе Statistica 12.5. Определены значения коэффициентов регрессии и уровень значимости  $p$ . Все коэффициенты уравнения значимы ( $p \leq 0,05$ ), коэффициент корреляции ( $r = 0,9644$ ) указывал на адекватное описание полученных данных.

Уравнение:

$$md = -2,94 + 0,544 pH - 0,0356 pH^2 + 0,181 t - 0,003 t^2 - 0,147 cm + 0,0276 cm^2 - 0,00447 pH t,$$

где pH – pH среды;  $t$  – температура, °C;  $cm$  – количество посевного материала, %.

Расчетные данные по уравнению и абсолютная ошибка приведены в таблице 2. В программе Mathematica 12.1 определяли зависимость массовой доли биомассы  $md$  от влияющих факторов и их оптимальные значения для ее максимального выхода: pH среды – 6,03, температура 25,7 °C, количество посевного материала  $cm = 4$  %.

Таблица 2 – Зависимость выхода биомассы микроорганизмов от влияющих факторов (экспериментальные, расчетные данные и абсолютная ошибка) /

Table 2 – Dependence of microbial biomass yield on influencing factors (experimental, calculated data and absolute error) /

Данные / Data		Абсолютная ошибка / Absolute error	Данные / Data		Абсолютная ошибка / Absolute error
опыт / experiment	расчет / calculation		опыт / experiment	расчет / calculation	
0,611	0,647450	-0,036450	0,791	0,775625	0,015375
0,816	0,762500	0,053500	0,811	0,809175	0,001825
0,757	0,780425	-0,023425	0,708	0,672100	0,035900
0,570	0,554225	0,015775	0,413	0,437900	-0,024900
0,776	0,756350	0,019650	0,616	0,631775	-0,015775
0,774	0,793900	-0,019900	0,751	0,734825	0,016175
0,711	0,734325	-0,023325	0,553	0,593750	-0,040750
0,573	0,577625	-0,004625	0,313	0,282050	0,030950

На рисунках 3, а (3D) и 3, б приведены закономерности изменения количества выхода биомассы от pH и температуры среды ( $t$ , °C) при концентрации посевного материала  $cm = 4\%$ . На рисунке 3, в представлена зависимость выхода

биомассы от продолжительности роста и количества посевного материала от 1 до 7 %, 3, с – выхода биомассы в процессе роста при всех выявленных оптимальных параметрах.

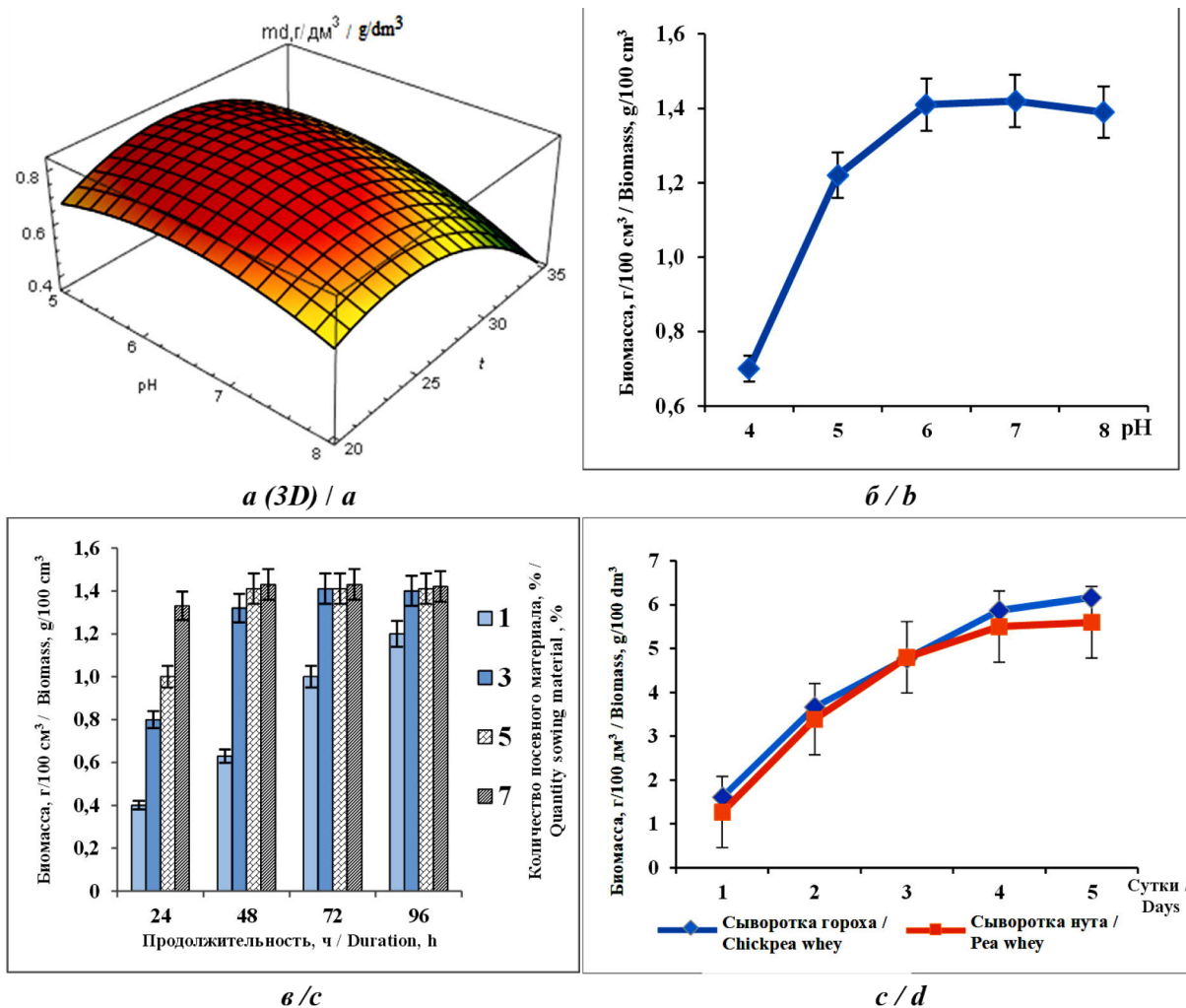


Рис. 3. Зависимость выхода биомассы: а (3D) – от pH и температуры среды ( $t$ , °C); б – от pH; в – от продолжительности роста и количества посевного материала; с – при всех оптимальных параметрах роста /

Fig. 3. Dependence of biomass yield: а (3D) – on pH and ambient temperature ( $t$ , °C); б – on pH; в – on the duration of growth and the amount of seeds; d – for all optimal growth parameters

После 2-й стадии экстракции белков с ФП количество высокомолекулярных соединений (ВМС), по сравнению с 1-й стадией, уменьшилось на 10 %, три- и тетрадисахаридов – почти в 2 раза, но вдвое увеличилось количество глюкозы, в 3 раза – фруктозы, галактозы, ксилозы и на 14 % – арабинозы (табл. 3). Под влиянием протеаз на 3-й стадии экстракции доля ВМС уменьшилась на 37 % относительно 1-й стадии, дисахаридов – на 38 %, а количество моносахаридов (фруктоза, галактоза, ксилоза), часть из которых, вероятно, образовалась при гидролизе гемицеллюлоз, увеличилось в 3,4 раза.

После осаждения белка из экстракта в сыворотке преобладали галактоза, ксилоза, фруктоза, раффиноза, стахиоза, обнаружены также мальтоза, глюкоза, арабиноза, т. е. она содержала низкомолекулярные сахараиды, что являлось благоприятным для роста микроорганизмов. За 4-5 суток синтеза биомассы микроорганизмы усваивали глюкозу, ксилозу, галактозу, фруктозу, сумма которых в культуральной жидкости уменьшилась более чем в 40 раз (табл. 4). Раффиноза, стахиоза, арабиноза почти не усваивались. Наличие сахарозы в культу-

ральной жидкости, возможно, было связано с гидролизом  $\alpha$ -1 $\rightarrow$ 6- гликозидной связи между остатками галактозы и сахарозы в молекуле раффинозы. Росту биомассы способствовало также наличие в сыворотке небелкового азота (~17,3 %) и низкомолекулярных одноцепочечных

белковых компонентов (ММ 10÷25 кДа). Если мука содержала белки с ММ от 15 до >250 кДа из одноцепочечных компонентов, соединенных—S—S— связями с ММ от 10 до 150 кДа, то сывортка имела в составе только одноцепочечные полипептиды с низкой ММ.

Таблица 3 – Массовая доля углеводов в экстрактах, % от общего количества /  
Table 3 – Mass fraction of carbohydrates in extracts, % of total amount

Продукт, стадия экстракции (ст) / Product, extraction stage (st)	ВМС / HMC	Раффиноза, стахиоза / Raffinose, stachyose	Сахароза / Мальтоза / Sucrose / Maltose	Глюкоза / Glucose	Фруктоза, галактоза, ксилоза / Fructose, galactose, xylose	Арабиноза / Arabinose
Экстракт, 1 ст / Extract, 1 st	23,43	23,93	0/31,81	10,11	8,40	2,31
Экстракт, 2 ст / Extract, 2 st	21,12	11,95	6,70/12,33	20,48	24,79	2,64
Экстракт, 3 ст / Extract, 3 st	14,77	20,27	8,99/10,91	13,89	28,39	2,78

Таблица 4 – Углеводный состав сыворотки и культуральной жидкости в процессе синтеза биомассы, % от общего количества /  
Table 4 – Carbohydrate composition of whey and culture fluid in the process of biomass synthesis, % of total amount

Рост биомассы, сутки / Biomass growth, days	ВМС / HMC	Раффиноза, стахиоза / Raffinose, stachyose	Сахароза / Sucrose	Мальтоза / Maltose	Глюкоза / Glucose	Фруктоза, галактоза, ксилоза / Fructose, galactose, xylose	Арабиноза / Arabinose
	Сыворотка / Whey						
	13,01±0,43	26,38±1,2	0,0	14,98±2,3	9,66±1,2	32,06±1,6	4,90±0,2
	Культуральная жидкость / Culture fluid						
1	57,56±0,10	26,00±0,81	4,73±0,21	8,21±0,07	0,0	0,0	3,51±0,41
2	53,78±0,09	33,30±0,70	0,0	8,07±0,06	0,0	0,0	4,86±0,13
3	55,88±0,08	28,28±1,20	3,05±0,50	7,79±0,08	0,0	0,0	5,02±0,05
4	58,47±1,10	27,04±0,92	0,0	10,05±0,10	0,0	0,0	4,45±0,33

Консорциум, сформированный из клеток *S. cerevisiae* 121 и *G. candidum* 977, при росте на благоприятном составе сыворотки (рис. 4), обеспечивал следующий химический состав сухих препаратов: из биомассы (КД-1), в % на СВ: белок (N×6,25) – 70,48±0,41, зола – 1,55±0,07,

жир – 4,47±0,27, углеводы – 24,5±0,76; из биомассы с культуральной жидкостью (КД-2): белок (N×6,25) – 61,68±0,4, зола – 8,60±0,03, жир – 8,31±0,36, углеводы – 21,41±0,55. Препараты представляли собой порошки светло-кремового цвета без горюхового запаха.

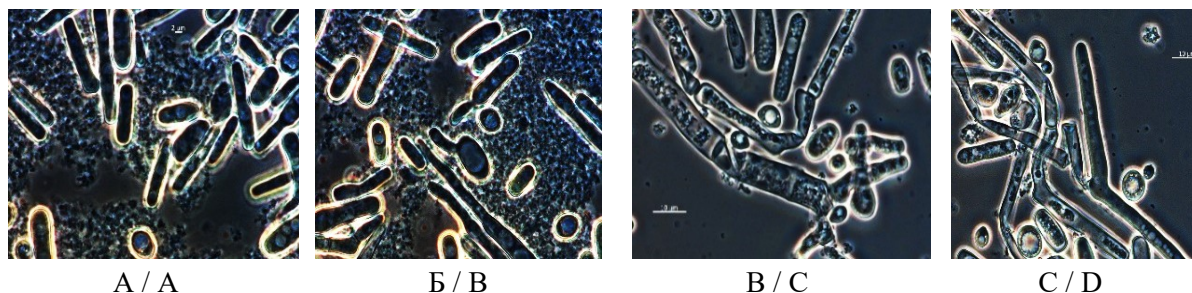


Рис. 4. Клетки *S. cerevisiae* 121 и *G. candidum* 977 в процессе роста на сыворотке: А, Б – 24 ч; В, С – 48 ч /  
Fig. 4. Cells of *S. cerevisiae* 121 and *G. candidum* 977 during growth on whey: А, В – 24 hours; С, D – 48 hours



Гидролиз НКБО и биоконверсия его с сывороткой. Для утилизации НКБО, образующегося после центрифугирования белкового экстракта из мучной суспензии, предварительно разработаны параметры его гидролиза и условия микробной биоконверсии с тем же консорциумом микроорганизмов. НКБО содержал  $61,30 \pm 0,4$  % крахмала и  $28,11 \pm 0,41$  % некрахмальных полисахаридов.

Гидролиз полисахаридов и белка выполнен с 2,5 % HCl при гидромодуле 1:8, температуре 95 °C и перемешивании при 4000 мин<sup>-1</sup>. Наибольшее количество сухого вещества, восстанавливающих сахаров (ВС) и растворимого белка накапливалось при pH 1,8 (табл. 5, рис. 5). Крахмал гидролизировался до мальтодекстринов, неокрашивающихся с йодом.

Таблица 5 – Состав декстринов, содержание сухого вещества и белка при различном pH гидролиза НКБО / Table 5 – Composition of dextrins, dry matter and protein content at different pH values of ISPR hydrolysis

Показатель / Index	pH в контроле (без гидролиза) / pH in control (no hydrolysis)	pH гидролиза / pH of hydrolysis			
	5,5	5,1	4,0	3,3	1,8
Декстрины / Dextrins	-	амило- / amylo-	эритро- / erythro-	ахро- / achro-	мальто- / malto-
СВ, % / DM, %	4,0	4,6	5,0	5,0	6,4
Белок, % на СВ / Protein, % on DM	8,05	8,90	11,75	12,71	17,69

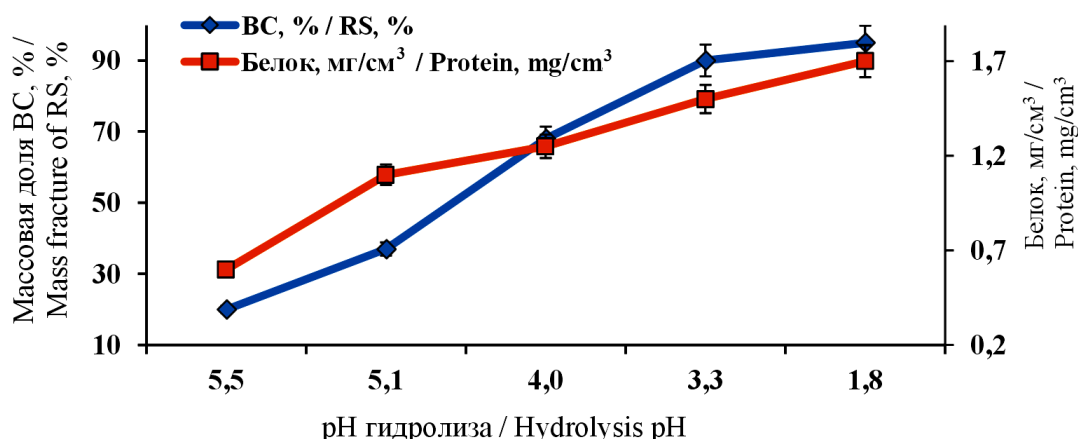


Рис. 5. Влияние pH среды на массовую долю ВС и растворимого белка в гидролизате /

Fig. 5. Influence of medium pH on the mass fraction of RS and soluble protein in the hydrolysate

В гидролизате НКБО pH корректировали до 6,0-6,5, суспензию центрифугировали, стерилизовали при 1 атм и  $125 \pm 2$  °C в течение 15 мин и засеивали *S. cerevisiae* 121 и *G. candidum* 977. После роста культур в течение 4 суток их инактивировали 15 мин при  $95 \pm 5$  °C. Чем выше степень гидролиза НКБО (мальтодекстрины), тем больше массовая доля растворимого белка в гидролизате. При pH 1,8 количество белка в биомассе повышалось в 2,2 раза по сравнению с контролем (табл. 5). С другой стороны, в культуральной жидкости увеличивалось количество ВМС: с 43,34 % в контроле до 80,32-90,0 % в опытах; полностью отсутствовала глюкоза и большая часть мальтозы (табл. 6). Фруктоза, арабиноза, ксилоза при pH 1,8 не усваивалась культурами.

Совместная биоконверсия НКБО и сыворотки. К массе сыворотки добавляли 2-10 % НКБО и проводили кислотный гидролиз при pH 1,8-2,0 в течение 25-30 мин при температуре 110-129 °C и давлении 1 атм. Доводили pH до 6,5-6,7, продукт выдерживали при 110-120 °C в течение 15-20 мин и охлаждали. В среду вносили 3-5 % к ее массе *S. cerevisiae* 121 и *G. Candidum* 977 и ферментировали 3-4 суток. Суспензию нагревали до температуры 90-100 °C в течение 10-20 мин и высушивали. В процессе роста биомассы из ВПП полностью усваивались стахиоза, мальтоза, сахароза, арабиноза, больше чем наполовину – глюкоза, и почти вся фруктоза, галактоза, ксилоза (табл. 7). Сухие КД представляли собой рассыпчатые порошки светло-кремового цвета с приятным запахом.

Таблица 6 – Углеводный состав культуральной жидкости, % от общего количества /  
Table 6 – Carbohydrate composition of the culture fluid, % of total amount

<i>pH</i> гидролиза / <i>Hydrolysis pH</i>	<i>ВМС</i> / <i>HMC</i>	<i>Олиго-сахариды</i> / <i>Oligosaccharides</i>	<i>Мальтоза</i> / <i>Maltose</i>	<i>Глюкоза</i> / <i>Glucose</i>	<i>Фруктоза</i> / <i>Fructose</i>	<i>Арабиноза, ксилоза</i> / <i>Arabinose, xylose</i>
Контроль / Control	43,34±0,1	0	1,28±0,5	55,38±0,5	0	0
4,0	90,0±0,9	6,03±0,8	0	0	3,43±0,3	0
3,3	80,32±0,4	15,52±0,6	0,41±0,1	0	3,47±0,2	0
1,8	86,74±1,1	2,43±0,9	0,33±0,3	0	3,49±0,5	7,06±0,1

Таблица 7 – Углеводный состав ВПП гороховой муки и кормовых дрожжей, % от общего количества /  
Table 7 – Carbohydrate composition of pea flour and fodder yeast SPP, % of total amount

<i>Продукт</i> / <i>Product</i>	<i>ВМС</i> / <i>HMC</i>	<i>Стахиоза</i> / <i>Stachyose</i>	<i>Раффиноза</i> / <i>Raffinose</i>	<i>Сахароза, мальтоза</i> / <i>Sucrose, maltose</i>	<i>Глюкоза</i> / <i>Glucose</i>	<i>Фруктоза, галактоза, ксилоза</i> / <i>Fructose, galactose, xylose</i>	<i>Арабиноза</i> / <i>Arabinose</i>
ВПП / SPP	32,01	26,38	0	14,98	9,66	12,06	4,90
КД / FY	68,83	0	26,21	0	3,87	1,09	0

Химический состав и кормовая ценность дрожжей. КД-1, полученные из сыворотки, содержали почти на 10 абс.% больше белка, в 4 раза больше жира, в 1,4 и 2,5 раза меньше

нерастворимых и растворимых волокон, чем КД-2, полученные из сыворотки совместно с гидролизатом НКБО (табл. 8).

Таблица 8 – Химический состав КД из вторичных продуктов переработки гороховой муки, % на СВ /  
Table 8 – Chemical composition of FY from secondary products of pea flour processing, % on DM

<i>Продукт</i> / <i>Product</i>	<i>Влажность, %</i> / <i>Moisture, %</i>	<i>Белок (Nx6,25)</i> / <i>Protein</i>	<i>Зола</i> / <i>Ash</i>	<i>Жир</i> / <i>Lipids</i>	<i>Волокна</i> / <i>Fibers</i>	
					<i>растворимые</i> / <i>soluble</i>	<i>нерастворимые</i> / <i>insoluble</i>
КД-1 / FY-1	6,81±0,4	61,68±0,47	8,60±0,03	8,31±0,36	7,13±0,55	14,27±0,44
КД-2 / FY-2	6,81±0,4	51,09±0,47	5,60±0,03	2,04±0,19	13,51±0,55	20,48±0,35

Наряду с высоким содержанием белка (51,09-64,10 %), КД имели и ценный аминокислотный состав (рис. 6). У КД-1 из сыворотки в большей степени он представлен глютаминовой, аспарагиновой кислотами, аланином, пролином, глицином, в КД-2 из сыворотки с

НКБО – аспарагиновой кислотой, глютаминовой, аланином, лизином, лейцином. Аминокислотный скор КД-1 (107-247 %) и КД-2 (81-128 %) указывал на высокую биологическую ценность кормовых дрожжей (табл. 9).

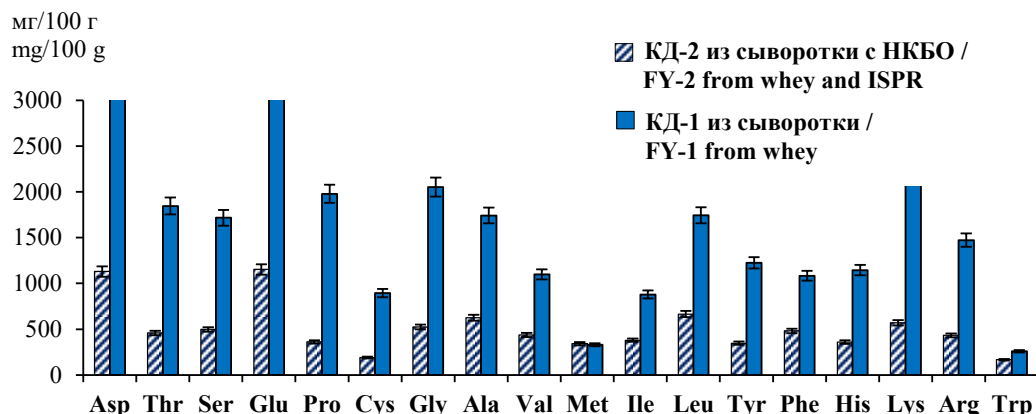


Рис. 6. Аминокислотный состав дрожжей из ВПП гороховой муки /  
Fig. 6. Amino acid composition of yeast from pea flour SPP

Таблица 9 – Аминокислотный скор КД из сыворотки и сыворотки с НКБО, % /

Table 9 – Amino acid score of FY from serum and serum with ISPR, %

Дрожжи / Yeast	Скор незаменимых аминокислот, % / Essential amino acids score, %								
	Вал / Val	Гис / His	Изо / Ile	Лей / Leu	Лиз / Lys	Мет + Цис / Met + Cys	Тре / Thr	Три / Trp	Фен+Тир / Phe+Tyr
КД-1 / FY-1	107	219	124	107	116	226	179	247	197
КД-2 / FY-2	100	124	91	90	81	93	128	100	100

Жирнокислотный состав КД из ВПП гороховой муки на 97,0 % представлен кислотами, входящими в состав растительных и животных жиров (пальмитиновая, олеиновая, стеариновая, линолевая, маргариновая и др.), а также эфиром и спиртами со свойствами ароматизаторов, эфирных масел и метаболитов (3,0 %). Соотношение в КД суммы насыщенные (23,5 %) и ненасыщенные жирные кислоты (71,67 %) – 1:3, содержание омега-6 кислот – 19,73 %, цис-изомеров – 91,1 %, транс-изомеров – до 5,0 %. КД-2 содержали 14 макро- и микроэлементов (табл. 10). Массовая доля нуклеиновых кислот в КД-1, выращенных на сыворотке, составила  $5,20 \pm 0,97$  мг/100 г, или 0,005 % к массе продукта, в КД-2, выращенных на сыворотке с НКБО –  $71,72 \pm 0,49$  мг/100 г, или 0,072 % к массе продукта. Перевариваемость дрожжей составила 85,73-89,74 %. Полученные показатели указывают на высокое качество и безопасность продуктов.

Между цветом КД и массовой долей в них фенолкарбоновых кислот и их производных (ФККиП) обнаружена тесная взаимосвязь. КД-1 светло-желтого цвета содержали в 13,7 раза меньше таких соединений по сравнению со светло-коричневыми КД-2 (рис. 7, табл. 11).

Коэффициент корреляции между оптической плотностью  $D_{590}$  водных растворов КД и массовой долей ФККиП к 1 г белка составил  $r = 0,897$ .

Таблица 10 – Содержание макро- и микроэлементов в КД-2 /

Table 10 – The content of macro- and microelements in FY-2

Элемент / Element	Содержание / Content
Натрий, мг/100 г / Sodium, mg/100 g	$1163 \pm 81$
Калий, мг/100 г / Potassium, mg/100 g	$1844 \pm 100$
Кальций, мг/100 г / Calcium, mg/100 g	$2000 \pm 120$
Магний, мг/100 г / Magnesium, mg/100 g	$121 \pm 8$
Железо, мг/100 г / Iron, mg/100 g	$6,30 \pm 0,46$
Цинк, мг/100 г / Zinc, mg/100 g	$14,0 \pm 1,2$
Медь, мг/100 г / Copper, mg/100 g	$1,12 \pm 0,04$
Марганец, мг/100 г / Manganese, mg/100 g	$1,56 \pm 0,08$
Кобальт, мкг/100 г / Cobalt, µg/100 g	$57 \pm 2$
Никель, мкг/100 г / Nickel, µg/100 g	$440 \pm 36$
Свинец, мг/кг / Lead, mg/kg	$\leq 0,001$
Кадмий, мг/кг / Cadmium, mg/kg	$0,071 \pm 0,009$
Хром, мг/кг / Chromium, mg/kg	$\leq 0,005$
Молибден, мг/кг / Molybdenum, mg/kg	$\leq 0,04$



Рис. 7. Внешний вид кормовых дрожжей: гороховый 1 – КД-1, 2 – КД-2; нутовый 3 – КД-1, 4 – КД-2 / Fig. 7. Appearance of fodder yeast: pea 1 – FY-1, 2 – FY-2; chickpea 3 – FY-1, 4 – FY-2

В линейку полученных данных включили и результаты для КД, полученные из нутовой муки по аналогичной схеме экстрагирования

(рис. 1). Данные результаты следует учитывать при выборе сырья с целью получения стабильно светло-желтого цвета дрожжей.

Таблица 11 – Массовая доля ФККиП и оптическая плотность растворов кормовых дрожжей /  
Table 11 – Mass fraction of PAaD and optical density of feed yeast solutions

Продукт / Product	Цвет продукта / Product color	$D_{590, \text{нм}}^* / D_{590, \text{nm}}$	Белок, % на СВ / Protein, % DM	ФККиП**, мг/г белка / PAaD*, mg/g protein
Дрожжи из гороховых субстратов / Yeast from pea substrates				
КД-1 из сыворотки / FY-1 from whey	Светло-желтый / Light yellow	0,040	61,68±0,47	2,85±0,38
КД-2 из сыворотки и НКБО / FY-2 from whey and ISPR	Светло-коричневый / Light brown	0,100	51,09±0,47	39,14±0,85
Дрожжи из нутовых субстратов / Yeast from chickpea substrates				
КД-2 из сыворотки и НКБО / FY-2 from whey and ISPR	Темно-желтый / Dark yellow	0,085	47,15±0,62	26,68±0,55

\*Оптическая плотность; \*\*Фенолкарбоновые кислоты и их производные /

\*Optical density; \*\*Phenolcarboxylic acids and their derivatives

**Выводы.** 1. Доказана возможность проведения комплексной биоконверсии ВПП гороховой муки (жидкая сыворотка, НКБО) на пищевой БК для получения кормовых дрожжей. С помощью математических методов планирования и обработки данных определены оптимальные параметры биоконверсии. Предварительно разработаны режимы кислотного гидролиза НКБО (рН среды, продолжительность, температура, давление). Наряду с гексозами (глюкоза, фруктоза, галактоза) и дисахаридами (мальтоза, сахароза), культуры усваивали и арабинозу, ксилозу и тетрасахарид – стахиозу.

2. Сухие КД содержали 51,09-61,68 % белка на СВ, липиды, растворимые и нерастворимые волокна, зольные элементы. Аминокис-

лотный скор белков – 90-247 %, соотношение насыщенные (23,5 %) и ненасыщенные жирные кислоты – 1:3, омега-6 жирные кислоты – 19,73 %, транс-изомеры – менее 5,0 %. Дрожжи содержали 14 макро-микроэлементов, включая натрий, калий, кальций, магний, цинк. КД безопасны по содержанию нуклеиновых кислот и тяжелых металлов, перевариваемость *in vitro* – 85,73-89,74 %.

3. Способ утилизации ВПП гороховой муки комплексной биоконверсией в кормовые дрожжи с их ценным химическим составом перспективен для получения качественных белоксодержащих кормовых добавок и сохранения экологической безопасности окружающей среды.

#### References

1. Xu J. C., Zhang M. L., He T., Luo H. J., Peng K. M., Huang X. F., Liu J. Application of de-lignified cellulose to enhance intracellular and extracellular lipid production from oleaginous yeast using acetic acid. *Bioresource Technology*. 2019;293:122032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122032>
2. Sarris D., Sampani Z., Rapti A., Papanikolaou S. Valorization of Crude Glycerol, Residue Deriving from Biodiesel- Production Process, with the Use of Wild-type New Isolated *Yarrowialipolytica* Strains: Production of Metabolites with Pharmaceutical and Biotechnological Interest. *Current Pharmaceutical Biotechnology*. 2019;20(10):881-894. DOI: <https://doi.org/10.2174/1389201020666190211145215>
3. Колпакова В. В., Уланова Р. В., Куликов Д. С., Гулакова В. А., Кадиева А. Т. Зерновые композиты с комплексным аминокислотным составом для пищевых и кормовых целей. Техника и технология пищевых производств. 2019;49(2):301-311. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-301-311> EDN: EUOTKW
4. Kolpakova V. V., Ulanova R. V., Kulikov D. S., Gulakova V. A., Kadiyeva A. T. Grain composites with a complementary amino acid composition in food and fodder. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(2):301-311. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-301-311>
5. Alves S. C., Diaz-Ruiz E., Lisboa B., Sharma M., Mussatto S. I., Thakur V. K., Kalaskar D. M., Gupta V. K., Chandel A. K. Microbial meat: A sustainable vegan protein source produced from agri-waste to feed the world. *Food Research International*. 2023;166:112596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112596>
6. Kurecz A., Błażej S., Kot A. M., Bzducha-Wróbel A., Kieliszek M. Application of Industrial Wastes for the Production of Microbial Single-Cell Protein by Fodder Yeast *Candida utilis*. *Waste and Biomass Valorization*. 2018;9(1):57-64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9782-z>
7. Błażej S., Gientka I., Bzducha-Wróbel A., Stasiak L., Maszewska M. Evaluation of the ability of the intracellular fat biosynthesis by *Rhodotorula gracilis* yeast in media containing potato wastewater enriched with glycerol. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. 2014;576:3-12. URL: [https://www.researchgate.net/publication/272086076\\_Evaluation\\_of\\_the\\_ability\\_of\\_the\\_intracellular\\_fat\\_biosynthesis\\_by\\_Rhodotorula\\_gracilis\\_yeast\\_in\\_media\\_containing\\_potato\\_wastewater\\_enriched\\_with\\_glycerol](https://www.researchgate.net/publication/272086076_Evaluation_of_the_ability_of_the_intracellular_fat_biosynthesis_by_Rhodotorula_gracilis_yeast_in_media_containing_potato_wastewater_enriched_with_glycerol)



7. Yadav J. S. S., Bezawada J., Ajila C. M., Yan S., Tyagi R. D., Surampalli R. Y. Mixed culture of *Kluyveromyces marxianus* and *Candida krusei* for single-cell protein production and organic load removal from whey. *Bioresource Technology*. 2014;164:119-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.069>
8. Yue-Ming Zho, You-Peng Chen, Jin-Song Guo, Yu Shen, Peng Yan, Ji-Xiang Yang. Recycling of orange waste for single cell protein production and the synergistic and antagonistic effects on production quality. *Journal of Cleaner Production*. 2019;213(10):384-392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.168>
9. Carranza-Méndez R. C., Chávez-González M. L., Sepúlveda Torre L., Aguilar C. N., Govea-Salas M., Ramos-González R. Production of single cell protein from orange peel residues by *Candida utilis*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2022;40:102298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102298>
10. Ahlborn J., Stephan A., Meckel T., Maheshwari G., Rühl M., Zorn H. Upcycling of food industry side streams by basidiomycetes for production of a vegan protein source. *International journal of recycling of organic waste in agriculture*. 2019;8(1):447-455. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40093-019-00317-4>
11. Kot A. M., Błażejak S., Kieliszek M., Gientka I., Bryś J., Reczek L., Pobiega K. Effect of exogenous stress factors on the biosynthesis of carotenoids and lipids by *Rhodotorula* yeast strains in media containing agro industrial waste. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2019;35:157. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2732-8>
12. Shakira G., Qubtia M., Ahmed I., Hasan F., Anjum M. I., Imran M. Effect of indigenously isolated *Saccharomyces cerevisiae* probiotics on milk production, nutrient digestibility, blood chemistry and fecal microbiota in lactating dairy cows. *Journal of animal and plant sciences*. 2018;28(2):407-420. URL: [https://www.researchgate.net/publication/318959513\\_Effect\\_of\\_Indigenously\\_Isolated\\_Saccharomyces\\_cerevisiae\\_Probiotics\\_on\\_Milk\\_Production\\_Nutrient\\_Digestibility\\_Blood\\_Chemistry\\_and\\_Fecal\\_Microbiota\\_in\\_Lactating\\_Dairy\\_Cows](https://www.researchgate.net/publication/318959513_Effect_of_Indigenously_Isolated_Saccharomyces_cerevisiae_Probiotics_on_Milk_Production_Nutrient_Digestibility_Blood_Chemistry_and_Fecal_Microbiota_in_Lactating_Dairy_Cows)
13. Сербя Е. М., Соколова Е. Н., Фурсова Н. А., Волкова Г. С., Борщева Ю. А., Курбатова Е. И., Кукова Е. В. Получение биологически активных добавок на основе обогащенной дрожжевой биомассы. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2018;(2):74-79.
- Serba E. M., Sokolova E. N., Fursova N. A., Volkova G. S., Borshcheva Yu. A., Kurbatova E. I., Kuksova E. V. Obtaining biologically active additives based on enriched yeast biomass. *Khrenenie i pererabotka sel'khozsyrya*. 2018;(2):74-79. (In Russ.).
14. Türker M., Mert Selimoğlu S., Taşpınar-Demir H. Chapter 12 – Waste(water) to feed protein effluent characteristics, protein recovery, and single-cell protein production from food industry waste streams. In book: *Clean Energy and Resource Recovery: Wastewater Treatment Plants as Biorefineries*, 2022. Pp. 201-243. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90178-9.00017-2>
15. Zott T., Solieri L., Iacumin L., Picozzi C., Gullo M. Valorization of cheese whey using microbial fermentations. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020;104:2749-2764. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10408-2>
16. Barba F. J. An integrated approach for the valorization of cheese whey. *Foods*. 2021;10(3):564. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10030564>
17. Sibtain A., Ghulam M., Muhammad A., Muhammad I. R. Fungal Biomass Protein Production from *Trichoderma harzianum* Using Rice Polishing. *BioMed Research International*. 2017;2017:6232793. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/6232793>
18. Сон О. М., Черевач Е. И., Текутьева Л. А. Использование отходов зерноперерабатывающей промышленности в микробиологическом синтезе кормового белка. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2016;(12):24-27.
- Son O. M., Cherevach E. I., Tekut'eva L. A. Use of grain-processing industry wastes in the microbiological synthesis of feed protein. *Khrenenie i pererabotka sel'khozsyrya*. 2016;(12):24-27. (In Russ.).
19. Machado W. R. M., Silva L. G., Vanzela E. S. L., Del Bianchi V. L. Production of carotenoids by *Rhodotorula toruloides* isolated from Brazilian tropical savannah. *International food research journal*. 2019;26(4):1259-1267. URL: [https://www.researchgate.net/publication/350095973\\_Production\\_of\\_carotenoids\\_by\\_Rhodotorula\\_toruloides\\_isolated\\_from\\_Brazilian\\_tropical\\_savannah](https://www.researchgate.net/publication/350095973_Production_of_carotenoids_by_Rhodotorula_toruloides_isolated_from_Brazilian_tropical_savannah)
20. Фоменко И. А., Дегтярев И. А., Иванова Л. А., Машенцева Н. Г. Разработка технологии белкового концентрата из дрожжевой биомассы *Kluyveromyces marxianus* Van der Walt (1965). *Сельскохозяйственная биология*. 2021;56(6):1172-1182. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.6.1172rus> EDN: TCIRAD
- Fomenko I. A., Degtyarev I. A., Ivanova L. A., Mashentseva N. G. A technology for obtaining a protein concentrate from yeast biomass of *Kluyveromyces marxianus* Van der Walt (1965). *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural Biology*. 2021;56(6):1172-1182. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.6.1172rus>
21. Souza P. F. F., Nair R. B., Andersson D., Lennartsson P. R., Taherzadeh M. J. Vegan-mycoprotein concentrate from pea-processing industry byproduct using edible filamentous fungi. *Fungal Biology and Biotechnology*. 2018;5:5. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40694-018-0050-9>
22. Лукин Н. Д., Уланова Р. В., Кравченко И. К., Колпакова В. В., Гольдштейн В. Г. Биоконверсия вторичных продуктов переработки зерна тритикале на крахмал с использованием гриба *Pleurotus ostreatus* 23. *Химия растительного сырья*. 2018;(4):225-234. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcpm.2018043993> EDN: VQQTUD
- Lukin N. D., Ulanova R. V., Kravchenko I. K., Kolpakova V. V., Gol'dshteyn V. G. Bioconversion of secondary grain treatment products of triticale on starch using the *Pleurotus ostreatus* 23 mushroom. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw material*. 2018;(4):225-234. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14258/jcpm.2018043993>

23. Колпакова В. В., Куликов Д. С., Уланова Р. В., Чумикина Л. В. Пищевые и кормовые белковые препараты из гороха и нута: производство, свойства, применение. Техника и технология пищевых производств. 2021;51(2):333-348. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-333-348> EDN: PQCGGQ

Kolpakova V. V., Kulikov D. S., Ulanova R. V., Chumikina L. V. Food and feed protein preparations from peas and chickpeas: production, properties, application. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):333-348. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-333-348>

24. Slaný O., Klemková T., Marcinčák S., Čertík M. Production of high-value bioproducts enriched with  $\gamma$ -linolenic acid and  $\beta$ -carotene by filamentous fungi. *Umbelopsis isabellina* using solid-state fermentations. *Annals of Microbiology*. 2020;70:5. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13213-020-01545-0>

25. Chuppa-Tostain G., Hoarau J., Watson M., Adelard L., Sing A. S. Ch., Caro Y., Grondin I., Bourven I., Francois J.-M., Girbal-Neuhausser E., Petit T. Production of *Aspergillus niger* biomass on sugarcane distillery wastewater: physiological aspects and potential for biodiesel production. *Bioremediation, Biodiesel, Lipids. Fungal Biology and Biotechnology*. 2018;5:1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40694-018-0045-6>

26. Kamani M. H., Meera M. S., Bhaskar N., Modi V. K. Partial and total replacement of meat by plant-based proteins in chicken sausage: evaluation of mechanical, physico-chemical and sensory characteristics. *Journal of Food Science and Technology*. 2019;56:2660-2669. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03754-1>

27. Бограчева Т. Я., Гаревский Г. В., Гонсалес Р. О., Корабленко М. А. Способ получения изолята белка и крахмала из гороха: пат. № 2054265 Российская Федерация. №94007599: заявл. 28.02.1994; опубл. 20.02.1996. 10 с. Режим доступа: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2054265C1\\_19960220](https://yandex.ru/patents/doc/RU2054265C1_19960220)

Bogacheva T. Ya., Garevskiy G. V., Gonsales R. O., Korablenko M. A. Method of preparing protein isolate and starch from pea: Patent RF, no. 2054265. 1996. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2054265C1\\_19960220](https://yandex.ru/patents/doc/RU2054265C1_19960220)

#### Сведения об авторах

✉ **Колпакова Валентина Васильевна**, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья – филиал «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха», ул. Некрасова, 11, Красково, Люберецкий район, Московская область, Российская Федерация, 140051, e-mail: [vniik@arrisp.ru](mailto:vniik@arrisp.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7288-8569>, e-mail: [val-kolpakova@rambler.ru](mailto:val-kolpakova@rambler.ru)

**Уланова Рузалия Владимировна**, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник, научный сотрудник, Институт микробиологии имени С. Н. Виноградского, ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук», Ленинский пр-т, 33, г. Москва, Российская Федерация, 119071, e-mail: [info@fbras.ru](mailto:info@fbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6315-7211>

**Куликов Денис Сергеевич**, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья – филиал «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха», ул. Некрасова, 11, Красково, Люберецкий район, Московская область, Российская Федерация, 140051, e-mail: [vniik@arrisp.ru](mailto:vniik@arrisp.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2171-0522>

**Гулакова Валентина Андреева**, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья – филиал «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха», ул. Некрасова, 11, Красково, Люберецкий район, Московская область, Российская Федерация, 140051, e-mail: [vniik@arrisp.ru](mailto:vniik@arrisp.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8393-9256>

#### Information about the authors

✉ **Valentina V. Kolpakova**, DSc in Engineering, professor, chief researcher, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing – Branch of Russian Potato Research Centre, 11, Nekrasov Street, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation, 140051, e-mail: [vniik@arrisp.ru](mailto:vniik@arrisp.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7288-8569>, e-mail: [val-kolpakova@rambler.ru](mailto:val-kolpakova@rambler.ru)

**Ruzaliya V. Ulanova**, PhD in Biology, senior researcher, researcher, S. N. Vinogradsky Institute of Microbiology, Federal Research Centre «Fundamentals of Biotechnology» of the Russian Academy of Sciences, Leninskiy avenue, 33, Moscow, Russian Federation, 119071, e-mail: [info@fbras.ru](mailto:info@fbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6315-7211>

**Denis S. Kulikov**, researcher, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing – Branch of Russian Potato Research Centre, 11, Nekrasov Street, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation, 140051, e-mail: [vniik@arrisp.ru](mailto:vniik@arrisp.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2171-0522>

**Valentina A. Gulakova**, researcher, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing – Branch of Russian Potato Research Centre, 11, Nekrasov Street, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russian Federation, 140051, e-mail: [vniik@arrisp.ru](mailto:vniik@arrisp.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8393-9256>

✉ – Для контактов / Corresponding author