

Научная статья/ Research article

УДК 663.12

DOI: 10.36718/1819-4036-2025-8-226-238

Елена Николаевна Соколова^{1✉}, Антон Юрьевич Шариков²,
Наталья Александровна Фурсова³, Елена Михайловна Серба⁴, Галина Сергеевна Волкова⁵

^{1,3}Всероссийский НИИ пищевой биотехнологии – филиал ФИЦ питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия

¹elenaniksokolova@inbox.ru

²anton.sharikov@gmail.com

³pekardroj@yandex.ru

⁴serbae@mail.ru

⁵galina.volkova@bk.ru

БИОСОВМЕСТИМОСТЬ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОБОГАЩЕННЫХ ПИЩЕВЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ

Цель исследования – изучение совместимости микроэлементов для возможности сочетанного обогащения дрожжей железом и медью. Объекты исследования – штамм хлебопекарных дрожжей из коллекции микроорганизмов ВНИИ пищевой биотехнологии лаборатории биотехнологии пекарных дрожжей и соли железа, меди и марганца – источники микроэлементов. Дрожжи культивировали на микробиологической качалке при скорости вращения 220 об/мин в колбах Эрленмейера объемом 750 см³ с 75,0 см³ стандартной среды с содержанием сухих веществ 8 % в течение 18 ч при температуре 30 °С. Количественное содержание азотистых веществ в дрожжевой биомассе определяли методом Кьельдаля согласно ГОСТ 13496.4-2019. Накопление биомассы исследовали методом весового контроля после культивирования, разделяя центрифугированием твердую и жидкую фракции. Разделение биомассы на твердую и жидкую фракции проводили на лабораторной центрифуге ОПМ-16 в течение 12 мин со скоростью вращения 8000 об/мин. Микроэлементный состав (железо и медь) определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией на приборе «КВАНТ-Z.ЭТА». Проведены сравнительные исследования способов фортификации отобранного штамма *S. cerevisiae* Y-581 с, подтвердившие практическую возможность сочетанного обогащения дрожжей железом и медью: 1 – при культивировании дрожжей; 2 – ферментоллизатов инактивированных клеток, с получением обогащенной продукции с различными функционально-технологическими свойствами и целевыми направлениями их применения. Установлены рациональные дозировки внесения микроэлементов в питательные среды для культивирования отобранного штамма (50 мг железа, 2,5 мг меди и 5,0 мг марганца на 100 см³), позволяющие достичь процент встраивания железа (90,7 %) и меди (72,5 %) и повышения уровня синтеза белка на 15,5 %. Выявлена положительная динамика повышения степени обогащения микроэлементами при фортификации ферментоллизатов инактивированных дрожжей и установлены рациональные условия, обеспечивающие наибольший уровень содержания микроэлементов (Fe + Cu) в целевой продукции. Результаты фракционного состава ферментоллизата дрожжей подтвердили существенное повышение содержания в биодоступной форме свободных аминокислот, низкомолекулярных пептидов и растворимых углеводов. Разработана принципиальная блок-схема по получению ферментоллизата дрожжевого с железом и медью.

Ключевые слова: обогащение, микроэлементы, совместимость, ингредиент, лиганд, ферментоллизат

Для цитирования: Соколова Е.Н., Шариков А.Ю., Фурсова Н.А., и др. Биосовместимость микроэлементов для получения обогащенных пищевых ингредиентов // Вестник КрасГАУ. 2025. № 8. С. 226–238. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-8-226-238.

Финансирование: исследования выполнены в рамках субсидии на выполнение Государственного задания FGMF-2025-0012.

Elena Nikolaevna Sokolova^{1✉}, Anton Yurievich Sharikov², Natalia Alexandrovna Fursova³,
Elena Mikhailovna Serba⁴, Galina Sergeevna Volkova⁵

^{1,3}All-Russian Research Institute of Food Biotechnology – branch of the FRC of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia

¹elenaniksokolova@inbox.ru

²anton.sharikov@gmail.com

³pekardroj@yandex.ru

⁴serbae@mail.ru

⁵galina.volkova@bk.ru

BIOCOMPATIBILITY OF MICRONUTRIENTS TO OBTAIN ENRICHED FOOD INGREDIENTS

*The aim of the study is to investigate the compatibility of trace elements for the possibility of combined enrichment of yeast with iron and copper. The objects of the study were a strain of baker's yeast from the collection of microorganisms of the All-Russian Research Institute of Food Biotechnology, Laboratory of Baker's Yeast Biotechnology, and salts of iron, copper and manganese - sources of trace elements. Yeast was cultured on a microbiological shaker at a rotation speed of 220 rpm in 750 cm³ Erlenmeyer flasks with 75.0 cm³ of a standard medium with a dry matter content of 8 % for 18 hours at a temperature of 30 °C. The quantitative content of nitrogenous substances in yeast biomass was determined by the Kjeldahl method according to GOST 13496.4-2019. Biomass accumulation was studied by the weight control method after cultivation, separating the solid and liquid fractions by centrifugation. Separation of biomass into solid and liquid fractions was carried out on a laboratory centrifuge OPM-16 for 12 minutes at a rotation speed of 8000 rpm. Microelement composition (iron and copper) was determined by atomic absorption spectrometry with electrothermal atomization on a KVANT-Z.ETA device. Comparative studies of the methods of fortification of the selected strain *S. cerevisiae* Y-581 c were carried out, confirming the practical possibility of combined enrichment of yeast with iron and copper: 1 – during yeast cultivation; 2 – enzymatic lysates of inactivated cells, with obtaining enriched products with various functional and technological properties and target areas of their application. Rational dosages of microelements in nutrient media for culturing the selected strain (50 mg iron, 2.5 mg copper and 5.0 mg manganese per 100 cm³) were established, allowing to achieve the percentage of iron incorporation (90.7 %) and copper (72.5 %) and an increase in the level of protein synthesis by 15.5 %. Positive dynamics of increasing the degree of enrichment with microelements during fortification of enzymatic lysates of inactivated yeast was revealed and rational conditions were established that provide the highest level of microelement content (Fe + Cu) in the target product. The results of the fractional composition of the yeast fermentolysate confirmed a significant increase in the content of free amino acids, low-molecular peptides and soluble carbohydrates in bioavailable form. A basic block diagram for obtaining yeast fermentolysate with iron and copper has been developed.*

Keywords: enrichment, micronutrients, compatibility, ingredient, ligand, fermentolysate

For citation: Sokolova EN, Sharikov AU, Fursova NA, et al. Biocompatibility of micronutrients to obtain enriched food ingredients. *Bulletin of KSAU*. 2025;(8):226-238. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-8-226-238.

Financing: the research was carried out as part of a subsidy for the implementation of the State Task FGMF-2025-0012.

Введение. В настоящее время железодефицитная анемия (ЖДА) – самое распространенное заболевание в мире среди женского населения. По данным Всемирной организации здравоохранения, более 2,5 млрд человек имеют скрытый дефицит железа. В Российской Федерации около

50 % населения испытывают недостаток железа, а также меди [1–4]. Это связано с негативной экологической ситуацией, сложившейся в ряде российских регионов, нервными перегрузками и влечет за собой нарушения системы питания, гормональный дисбаланс организма и сердечно-

сосудистые заболевания. Проведенные исследования подтверждают, что ЖДА вызывают многие факторы, но микроэlementозы являются преобладающей причиной возникновения данного заболевания. Железо (Fe) – один из важнейших биокатализаторов в организме человека, присутствует в 2 формах: Fe^{2+} (восстановленное) и Fe^{3+} (окисленное), обладает редкой способностью быть как донором, так и акцептором электронов, является системой многих белков и ферментов [4, 5]. Марганец при лигандообразовании с дрожжами позволяет увеличить биодоступность микроэlementов в комбинации при обогащении биомассы [6, 7].

Основываясь на метаболизме дрожжей – сахаромикетов (окислительно-восстановительные реакции, протекающие в них во время клеточного дыхания), удается повысить эффективность процесса обогащения дрожжей микроэlementами за счет введения в дрожжевое молоко источников различных микроэlementов, углеводов и окислителя [8]. Особенность метаболизма хлебопекарных дрожжей и двух путей одновременного энергетического обмена позволяет получать более высокие биохимические показатели по биомассе. Для четко заданного процесса производства хлебопекарных дрожжей необходимо активное аэробное культивирование с уровнем кислорода выше критической концентрации. Сигнальная наследственность дрожжевой клетки заключается в корреляции биохимических процессов и процессов метаболизма. Недостаточное содержание в культуральной среде одного из макро- и микроэlementов приводит в сжатые сроки к деградации внутриклеточных резервов и одновременно меняет генетическую модель: какая-то часть генов усиливается в действии, другая – ликвидируется. Таким образом, дрожжи рода *Saccharomyces* являются перспективным объектом для получения обогащенных эссенциальными микроэlementами пищевых ингредиентов и создания на их основе новых видов пищевой продукции.

Существует ряд научно обоснованных принципов обогащения макро- и микроэlementами микроорганизмов с учетом первостепенных данных, актуальных для науки, о роли конкретных нутриентов для обеспеченности населения. Первый – критерии выбора основополагающих ингредиентов; второй – обогащение микроорганизмов только для использования в ингредиентах для продуктов массового потребления; тре-

тий – обогащение не должно сказываться на безопасности конечного продукта; четвертый – обеспечение максимальной целостности обогащенных ингредиентов в процессе производства и хранения; пятый – содержание в обогащенном ингредиенте должно быть не менее 15 % от суточной потребности; шестой – количественное содержание нутриента должно быть рассчитано с учетом концентрации в сырье и ее сохранения на всем протяжении срока хранения.

Цель исследований – изучение совместности микроэlementов для возможности сочетанного обогащения дрожжей и их ферментолизатов железом и медью.

Задачи: проведение процесса биофортификации хлебопекарных дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-581с железом и медью в присутствии соли марганца; установление технологических параметров получения обогащенных ферментолизатов дрожжей; исследование фракционного состава ферментолизатов дрожжей.

Объекты и методы. Объектами исследования в данной работе служили штаммы хлебопекарных дрожжей из коллекции микроорганизмов ВНИИ пищевой биотехнологии (лаборатории биотехнологии пекарных дрожжей) и соли железа, меди и марганца – источники микроэlementов.

В качестве солей – источников катионов микроэlementов использовали сульфат железа ($FeSO_4 \times 7H_2O$), сульфат меди ($CuSO_4 \times 5H_2O$) и сульфат марганца ($MnSO_4 \times 5H_2O$), квалификация чистоты – ХЧ.

Культивирование дрожжей проводили на микробиологической качалке при скорости вращения 220 об/мин в колбах Эрленмейера объемом 750 см³ с 75,0 см³ стандартной среды (солодовое сусло 8 % СВ) в течение 18 ч при температуре 30 °С.

Количественное содержание сырого протеина в биомассе определяли по методу Кьельдаля на автоматической установке Vapodest (Gerhardt, Германия) согласно ГОСТ 13496.4-2019 ГОСТ 13496.4-2019 «Корма. Комбикорма. Комбикормовое сырье. Метод определения содержания азота и сырого протеина».

Накопление биомассы определяли весовым методом после культивирования, разделяя центрифугированием твердую и жидкую фракции.

Твердую фракцию получали отделением от фильтрата на лабораторной центрифуге ОПМ-16 в течение 12 мин со скоростью вращения 8000 об/мин.

Концентрацию микроэлементов исследовали с помощью метода атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией на приборе «КВАНТ-Z.ЭТА» (РФ) согласно ГОСТ Р 56372-2015 «Комбикорма, концентраты и премиксы. Определение массовой доли железа, марганца, цинка, кобальта, меди, молибдена и селена методом атомно-абсорбционной спектроскопии», а также методом инверсионной вольтамперометрии (ИВ) согласно МУ 31-17/06 (железо) и МУ 31-04/04 (медь).

Статистическую обработку новых экспериментальных данных, полученных не менее чем в 3 повторностях, осуществляли методом однофакторного дисперсионного анализа с апо-

стериорным критерием Тьюки при $p < 0,05$ с использованием программы Statistica 6.0.

Результаты и их обсуждение. Поскольку известно, что все двухвалентные металлы конкурируют за возможность «закрепления» в организме, а избыток одного с высоким содержанием любого из упомянутых в таблице 1 двухвалентных металлов может блокировать его встраивание [7, 9], на первом этапе была изучена совместимость используемых микроэлементов железа и меди, для исследования способов сочетанного обогащения дрожжей. Результаты по биосовместимости микроэлементов обобщены в таблице 1.

Таблица 1

Совместимость микроэлементов для выбора сочетанного обогащения
Micronutrient compatibility for selecting combined enrichment

Микроэлемент	Железо	Магний	Медь	Фосфор	Кальций	Хром	Марганец	Цинк
Железо	=	=	+	=	-	-	=	-
Магний	=	=	=	-	+	=	-	=
Фосфор	=	-	=	=	-	-	=	=
Цинк	-	=	-	-	-	=	-	=
Медь	+	=	=	=	=	-	=	-
Хром	-	=	-	-	=	=	-	+
Кальций	-	+	=	-	=	=	=	-
Марганец	=	=	=	+	+	-	=	-

Примечание: «+» – оптимальное; «-» – негативное; «=» – нейтральное.

Исходя из данных таблицы 1, железо и медь имеют преимущественную совместимость, а марганец по отношению к обоим металлам нейтрален, что свидетельствует о возможности обогащения данными микроэлементами. Использование железа и меди в сочетании с марганцем позволяет повысить биодоступность микроэлементов при встраивании [7].

Проведены сравнительные исследования способов фортификации микроэлементами (железом и медью) дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* 581с: 1-й способ «прижизненного» обогащения – при культивировании дрожжей; 2-й способ обогащения инактивированных клеток – после ферментативной деструкции клеточных полимеров [10–12].

Для получения фортифицированных микроэлементными (железом и медью) дрожжей на первом этапе выбран способ «прижизненного»

обогащения в процессе культивирования клеток на питательных средах, в состав которых введены исследуемые микроэлементы. Добавление марганца осуществляли для исследования возможности повышения степени обогащения дрожжей микроэлементами.

Культивирование дрожжей проводили на питательных средах, содержащих соли в различных концентрациях и соотношениях: железо – 25, 50 и 100 мг%, добавляя в каждом варианте медь (2,5 и 5,0 мг%) и марганец (5,0 и 10,0 мг%). Культивирование проводили в термостатируемом качалочном аппарате в течение 18 ч при температуре 30 °С, 220 об/мин; объем питательной среды – 75,0 см³. Результаты культивирования дрожжей представлены на рисунке 1 (железо+медь без марганца) и на рисунке 2 (железо+медь+марганец).

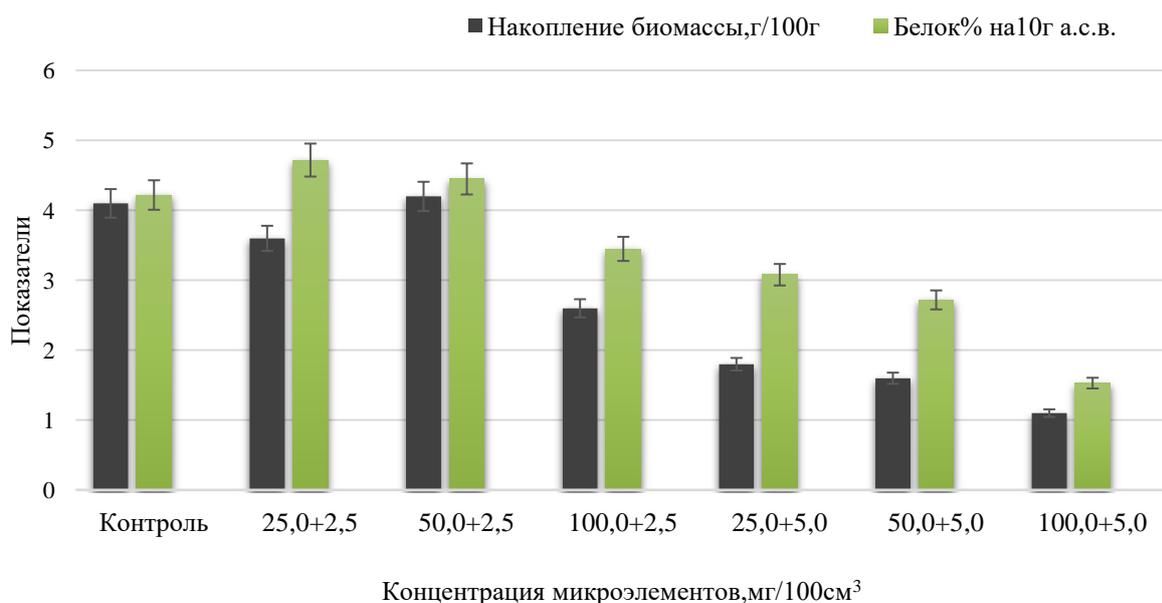


Рис. 1. Показатели сырого протеина и биомассы при культивировании дрожжей *S. cerevisiae* на средах, содержащих ионы железа, меди в различных соотношениях
Crude protein and biomass indices during cultivation of S. cerevisiae yeast on media containing iron and copper ions in different ratios

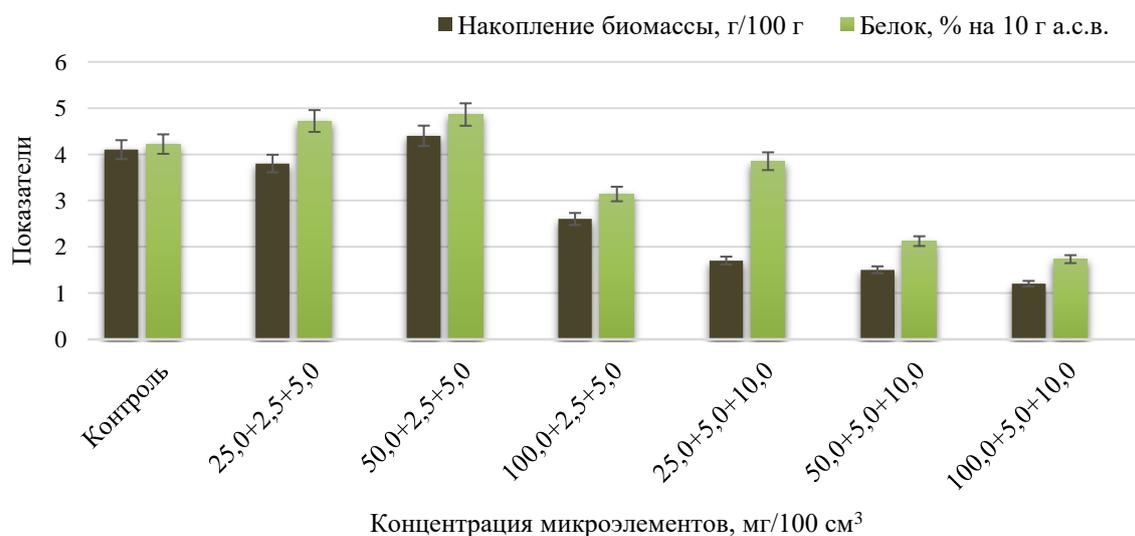


Рис. 2. Показатели сырого протеина и биомассы при культивировании дрожжей *S. cerevisiae* на средах, содержащих ионы железа, меди и марганца в различных соотношениях
Indices of crude protein and biomass during cultivation of yeast S. cerevisiae on media containing iron, copper and manganese ions in different ratios

В результате культивирования при внесении в состав питательной среды 50 мг железа/100 см³, 2,5 мг меди/100 см³ и 5,0 мг марганца/100 см³ накопление биомассы увеличилось на 7,3 %, а содержание белка – на 15,5 %, что свидетельствует об активирующем действии подобранных концентраций ионов металлов на рост дрожжей и

синтез белковых веществ (см. рис. 1, 2). Дальнейшее повышение содержания микроэлементов в питательных средах негативно сказалось на жизнедеятельности дрожжевых клеток.

Проведено микроскопирование дрожжей, обогащенных железом и медью в присутствии марганца. Результаты представлены на рисунке 3.

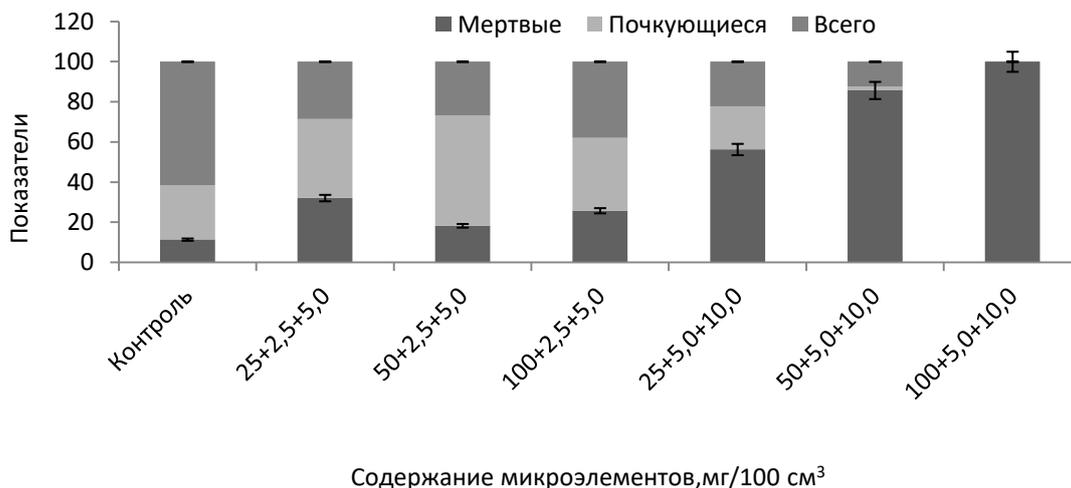


Рис. 3. Результаты микроскопирования дрожжей, обогащенных микроэлементами
Results of microscopy of yeast enriched with micronutrients

В результате микроскопирования дрожжей выявлено влияние различных дозировок микроэлементов, внесенных в питательную среду, на развитие дрожжевых клеток. Подтверждено, что подобранная концентрация солей (50 мг% железа, 2,5 мг% меди и 5,0 мг% марганца) оказывает положительное воздействие на рост и размножение дрожжей. При этом установлено, что повышение концентрации в среде меди и марганца оказывает негативное влияние на процессы генерации дрожжей: снижается коли-

чество почкующихся клеток и повышается количество мертвых (см. рис. 3).

Таким образом, установлена возможность обогащения хлебопекарных дрожжей микроэлементами железом и медью, подобранными экспериментально. Уровень железа в 100 г дрожжей составил 90,7 мг, меди – 36,3 мг.

Далее исследовали уровень обогащения дрожжей при различных дозировках микроэлементов (рис. 4, 5).

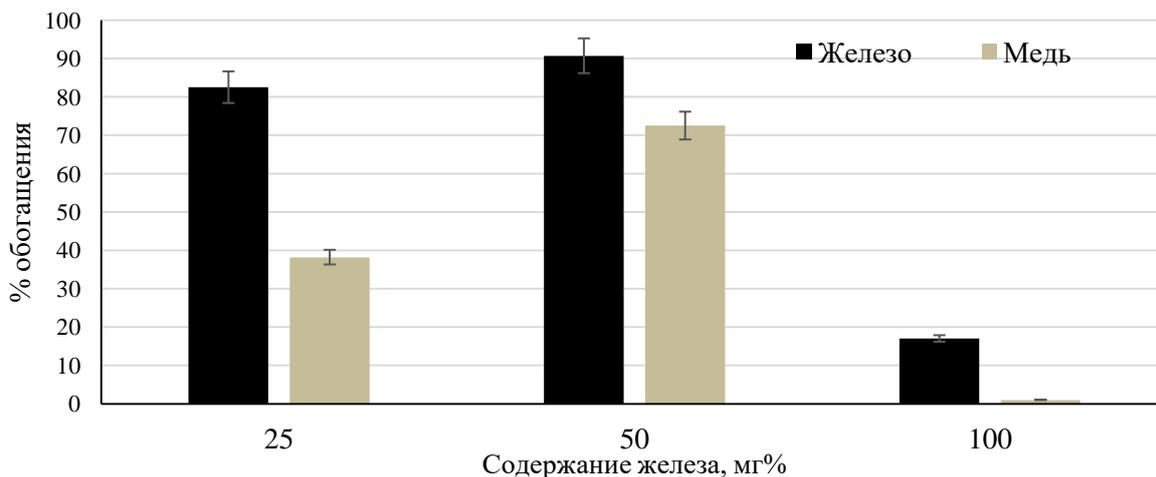


Рис. 4. Результаты обогащения дрожжей микроэлементами в процессе культивирования на средах, содержащих 2,5 мг меди/100см³ и 5,0 мг марганца/100 см³ с различной концентрацией железа
Results of yeast micronutrient enrichment during culturing on media containing 2.5 mg copper/100cm³ and 5.0 mg manganese/100 cm³ with different iron concentrations

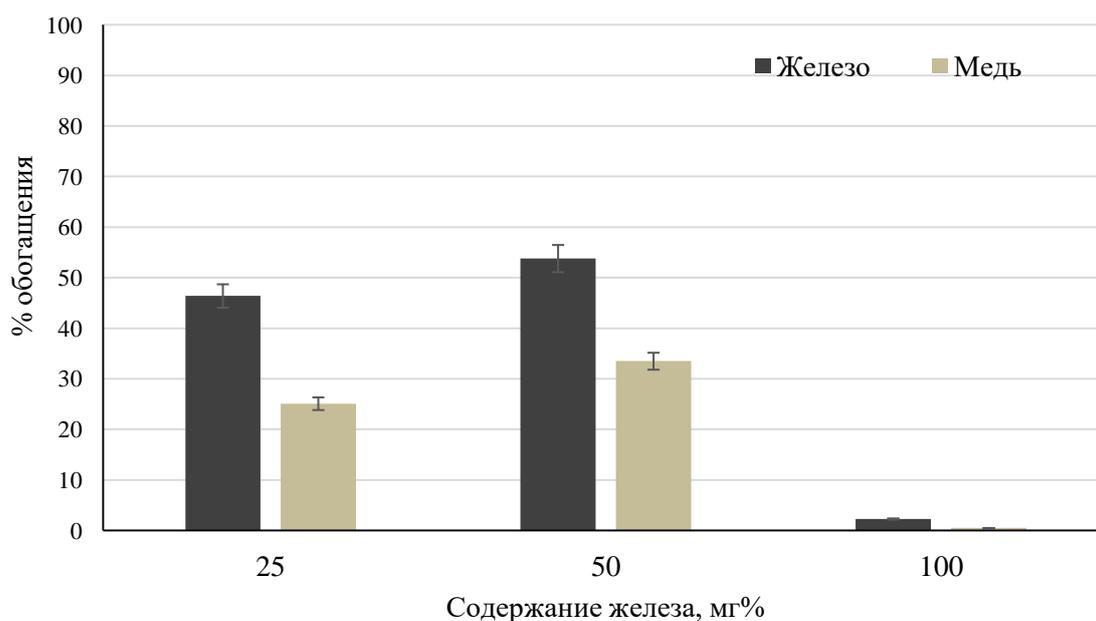


Рис. 5. Результаты обогащения дрожжей микроэлементами в процессе культивирования, на средах, содержащих 5,0 мг меди/100 см³ и 10,0 мг марганца/100 см³ с различной концентрацией железа

Results of yeast enrichment with microelements in the process of cultivation on media containing 5.0 mg copper/100 cm³ and 10.0 mg manganese/100cm³ with different concentration of iron

Отмечено, что введение в питательную среду микроэлементов в дозировках 50 мг железа/100 см³, 2,5 мг меди/100 см³ и 5,0 мг марганца/100 см³ является предпочтительным для обогащения, позволяя достичь процента обогащения для железа – 90,7 %, для меди – 72,5 %, но при этом содержание марганца оказалось нулевым (см. рис. 4). Повышение концентрации марганца в среде до 10 мг%, а железа до 100 мг% негативно сказалось на степени фортификации дрожжей микроэлементами (см. рис. 5).

Проведены сравнительные исследования показателей обогащения железом и медью при культивировании дрожжей на средах, содержащих указанные ионы металлов в присутствии марганца (см. рис. 4, 5) и в отсутствие марганца (рис. 6, 7). Установлено, что наличие марганца в питательной среде с подобранной экспериментально концентрацией железа и меди способствует повышению степени встраивания железа в 1,7 раза, меди – в 2,3 раза (см. рис. 4, 6). Данный факт подтвердил способность марганца принимать участие в процессах лигандообразования и позволил повысить биодоступность микроэлементов с ним в сочетании, а комбинация с

пищевыми лигандами, источником которых являются хлебопекарные дрожжи, подтверждает этот биохимический процесс.

Таким образом, изучена совместимость микроэлементов, установлена возможность смежного обогащения железом и медью в присутствии марганца и подобрана их целесообразная дозировка при культивировании дрожжей.

Ферментолиз является способом деструктурирования субклеточных структур дрожжей, при котором в мягких условиях происходит извлечение ценных нутриентов, а также снижение аллергенности [13–15]. Ферментативный гидролиз дрожжей осуществляли с применением ФП, обладающих субстратной специфичностью по отношению к белково-полисахаридным полимерам дрожжевой биомассы в 2 этапа: I – деструкция полимеров клеточной стенки под действием β-глюканаза (50,0 ед. β-ГК/г), маннаназы (25,0 ед. МС/г) и протеаз (2,0 ед. ПС/г); II – гидролиз белков протоплазмы под действием протеаз (10,0 ед/г) [15]. После отделения жидкой фазы (растворимой части ферментолита дрожжей) центрифугированием осуществлено осаждение белков этиловым спиртом в соотно-

шении 1 : 3. Затем стадия центрифугирования и промывки осадка дистиллированной водой (пятикратно).

Далее проводили «встраивание» микроэлементов путем внесения растворов солей, содержащих ионы железа, меди и марганца в количестве: 50 мг железа/100 см³, 2,5 мг ме-

ди/100см³ и 5,0 мг марганца/100 см³. Обогащение проводили в условиях постоянного перемешивания при $n = (200 \pm 20)$ RPM в течение $t = 30$ мин, затем центрифугировали при $n = 6000$ RPM и анализировали на содержание микроэлементов.

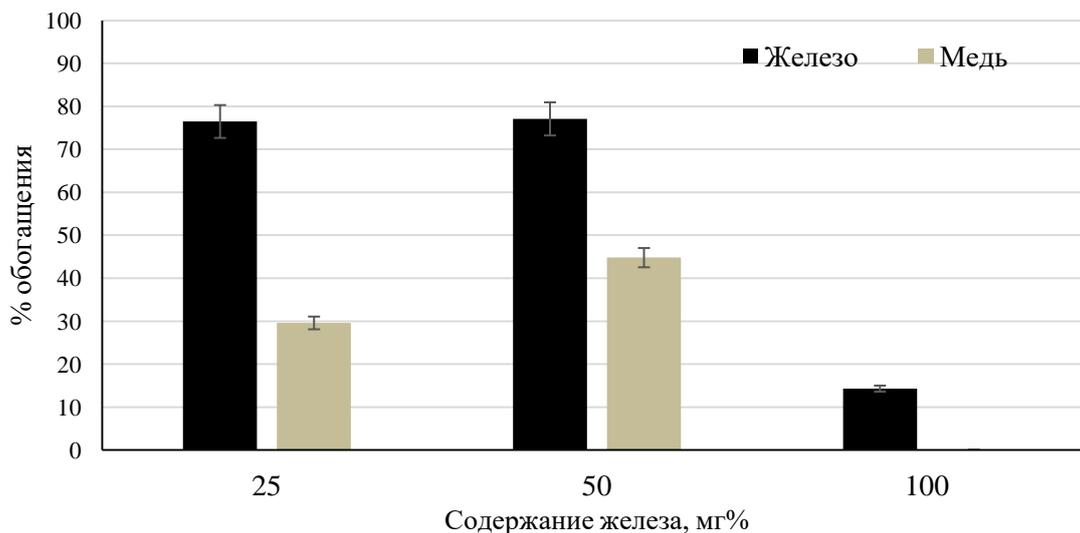


Рис. 6. Результаты обогащения дрожжей микроэлементами в процессе культивирования на средах, содержащих 2,5 мг меди/100 см³ с различной концентрацией железа
 Results of yeast enrichment with microelements during cultivation on media containing 2.5 mg copper/100 cm³ with different concentration of iron

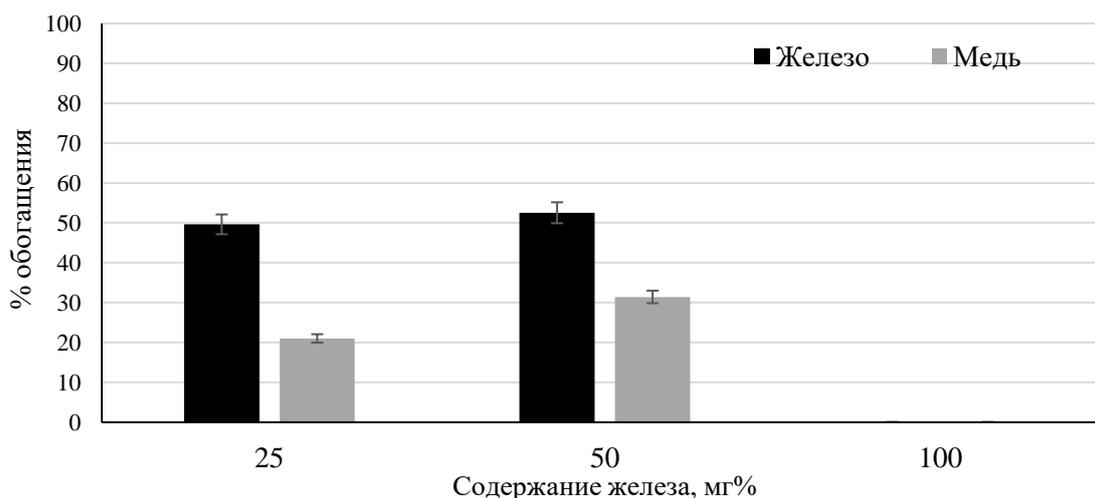


Рис. 7. Результаты обогащения дрожжей микроэлементами в процессе культивирования на средах, содержащих 5,0 мг меди/100 см³ с различной концентрацией железа
 Results of yeast enrichment with micronutrients during cultivation on media containing 5.0 mg copper/100 cm³ with different iron concentrations

Содержание микроэлементов составило: железа – 96,5 мг в 100 г ферментолита и меди – 41,1 мг в 100 г ферментолита (табл. 2).

Исследовали фракционный состав ферментолита дрожжей *S. cerevisiae* Y-581c. По сравнению с исходной биомассой в нем существенно сократилось содержание клетчатки, белков и высокомолекулярных пептидов; при этом повысилась концентрация аминокислот в свободной форме, низкомолекулярных пептидов и растворимых углеводов.

В результате ферментализации обогащенной дрожжевой биомассы содержание полисахаридов сократилось в 13 раз, а растворимых углеводов и свободных аминокислот значительно увеличилось. Содержание низкомолекулярных пептидов с молекулярной массой менее 1 000 Да и аминокислот в свободной форме достигло 37,5 и 18,7 % соответственно (рис. 8).

Далее был исследован фракционный состав ферментолита методом молекулярно-массового распределения пептидно-аминокислотных фракций (рис. 9, табл. 3).

Таблица 2

Расчет содержания микроэлементов в ферментолите дрожжей согласно МР 2.3.1.0253-21
Calculation of trace elements content in yeast fermentolysate according to MR 2.3.1.0253-21

Образец	Железо, мг/100 г	Удовлетворение суточной потребности, г	Медь, мг/100г	Удовлетворение суточной потребности, г
Ферментолит дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> Y-581c	96,5	19,3	41,1	41,1

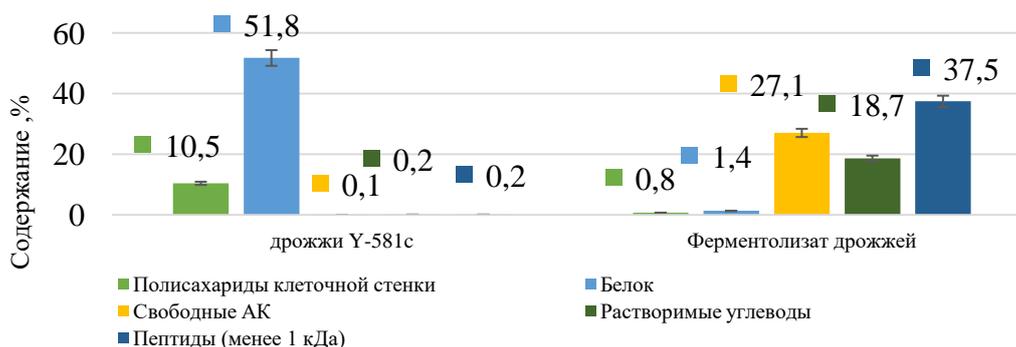


Рис. 8. Изменение биохимического состава биомассы дрожжей *S. cerevisiae* Y-581c в результате ферментализации: АК – аминокислоты; Mr – молекулярная масса
Changes in the biochemical composition of yeast *S. cerevisiae* Y-581c biomass as a result of fermentation: АК – amino acids; Mr – molecular weight

Таблица 3

Результаты хроматографического анализа биомассы и ферментолита дрожжей
Results of chromatographic analysis of yeast biomass and fermentolysate

Номер образца	Образец	мг	Мл H ₂ O	D260	D280
1	Биомасса дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , обогащенная железом и медью (4,78 мг Fe/1 г С.В. дрожжей; 0,25 мг Cu/1 г С.В. дрожжей)	499	2,49	25,2	19,3
2	Ферментолит дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , обогащенный железом и медью (3,05 мг Fe/1 г С.В. дрожжей; 0,06 мг Cu/1 г С.В. дрожжей)	200	2,0	9,7	5,6

Из представленных в таблице 3 данных установлено, что при длинах волн 260 и 280 нм количество нуклеиновых кислот заметно сни-

жается, что подтверждает факт расщепления до нуклеотидов, низкомолекулярных пептидов и аминокислот.

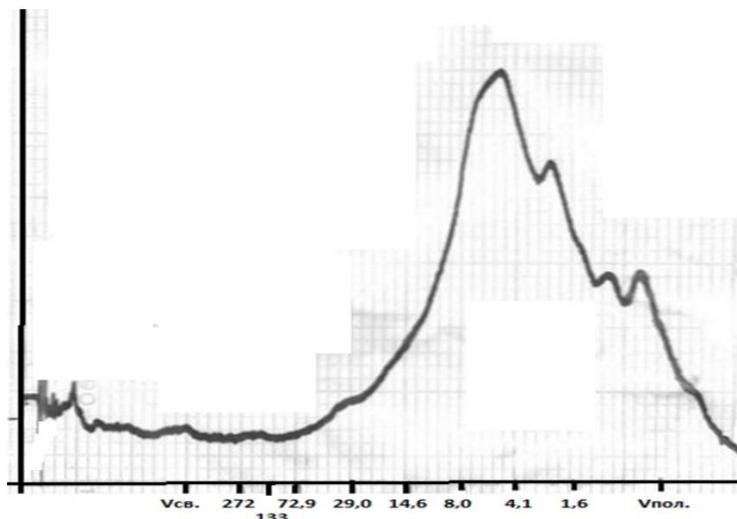


Рис. 9. Хроматограмма фракционного состава ферментолизата дрожжей с железом и медью.
По оси абсцисс – молекулярная масса, кДа; по оси ординат – оптическая плотность при 280 нм
Chromatogram of fractional composition of yeast fermentolysate with iron and copper.
On the abscissa, molecular weight, kDa; on the ordinate, optical density at 280 nm

В результате молекулярно-массового распределения фракций установлено, что основная часть микроэлементов распределена в области низкомолекулярных соединений ферментолизата дрожжей, что позволяет предполагать их «встраивание» в клеточную структуру и в даль-

нейшем исследовании направить на количественное содержание микроэлемента (см. рис. 9).

На основании полученных результатов исследований разработана блок-схема получения ферментолизата дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-581c (рис. 10).



Рис. 10. Блок-схема получения обогащенного ферментолизата дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-581c

Block diagram of preparation of enriched fermentolysate of yeast *Saccharomyces cerevisiae* Y-581c

Штамм дрожжей культивируют при температуре 28–30 °С в условиях ферментационной установки в течение 20 ч. Затем полученную дрожжевую биомассу подвергают 1-й стадии

ферментной обработки при температуре 50 °С в течение 4 ч, затем протеолизу при температуре 35 °С в течение 12 ч. Полученный ферментоллизат подвергают сепарированию с отделением

жидкой фракции, а в твердую фракцию добавляют соли железа, меди и марганца в подобранной концентрации. По окончании процесса обогащения полученный ферментоллизат пастеризуют при температуре 85–95 °С в течение 15–20 мин. После охлаждения до 35–37 °С его направляют на сушку. Для получения сухого ферментолизата применяют распылительные сушилки или сушильные агрегаты, снабженные циклонами. Температура теплоносителя на входе составляет 160–165 °С, на выходе – 65 °С.

Заключение. Проведены сравнительные исследования способов фортификации отобранного штамма *S. cerevisiae* Y-581 с, подтвердившие практическую возможность сочетанного обогащения дрожжей железом и медью: 1 – при культивировании дрожжей; 2 – ферментоллизатов инактивированных клеток, с получением обогащенной продукции с различными функционально-технологическими свойствами и целевыми направлениями их применения.

Установлены рациональные дозировки внесения микроэлементов в питательные среды для культивирования отобранного штамма (50 мг железа, 2,5 мг меди и 5,0 мг марганца на 100 см³), позволяющие достичь процент встраивания: железа – 90,7 и меди – 72,5, и повышение уровня синтеза белка на 15,5 %.

Выявлена положительная динамика повышения степени обогащения микроэлементами при фортификации ферментоллизатов инактивированных дрожжей и установлены рациональные условия, обеспечивающие наибольший уровень содержания микроэлементов (Fe + Cu) в целевой продукции.

Результаты фракционного состава ферментоллизата дрожжей подтвердили существенное повышение содержания в биодоступной форме свободных аминокислот, низкомолекулярных пептидов и растворимых углеводов.

Разработана принципиальная блок-схема по получению ферментолизата дрожжевого с железом и медью.

Список источников

1. Ayele A., Haile S.T., Alemu D., et al. Comparative Utilization of Dead and Live Fungal Biomass for the Removal of Heavy Metal: A Concise Review // *The Scientific World Journal*. 2021. N 1. P. 1–10. DOI: 10.1155/2021/5588111.
2. Потемина Т.Е., Волкова С.А., Кузнецова С.В., и др. Общие вопросы метаболизма железа и патогенеза железодефицитной анемии // *Вестник медицинского института «Реавиз»: реабилитация, врач и здоровье*. 2020. № 3. С. 125–137.
3. Igbiosa I., Berube C., Lyell D. J. Iron deficiency anemia in pregnancy // *Current Opinion in Obstetrics and Gynecology*. 2022. Vol. 34. P. 69–76. DOI: 10.1097/GCO.0000000000000772.
4. Kumar S. B., Arnipalli S.R., Mehta P., et al. Iron deficiency anemia: efficacy and limitations of nutritional and comprehensive mitigation strategies // *Nutrients*. 2022. Vol. 14. P. 2976. DOI: 10.3390/nu14142976.
5. Freeland-Graves J., Kaang P., Zamora A., et al. Global diversity of dietary intakes and standards for zinc, iron, and copper // *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2020. Vol. 61. P. 126515. DOI: 10.1016/j.jtemb.2020.126515.
6. Кадырова Р.Г., Кабиров Г.Ф., Муллахметов Р.Р. Биологические свойства и синтез комплексных солей α-аминокислот биогенных металлов. Казань, 2014. 108 с.
7. Громова О.А., Трошин И.Ю., Хаджидис А.К. Анализ молекулярных механизмов воздействия железа (II), меди, марганца в патогенезе железодефицитной анемии // *Клиническая фармакология и фармаэкономика*. 2010. № 1.
8. Старовойтова О.В., Садриева А.А., Мингалеева З.Ш., и др. Активация дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в технологии приготовления хлеба // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. № 5. С. 235–237.
9. Ших Е.В. Взаимодействия компонентов витаминно-минеральных комплексов и рациональная витаминотерапия // *Российский медицинский журнал*. 2004. № 17. С. 1011.
10. Соколова Е.Н., Волкова Г.С., Фурсова Н.А., и др. Дрожжевая биомасса-потенциальная модель для обогащения микроэлементами методами биотехнологии // *Пищевая промышленность*. 2024. № 6. С. 41–44.

11. Юраскина Т.В., Соколова Е.Н., Фурсова Н.А., и др. Инновационный подход к обогащению пищевых продуктов с применением хлебопекарных дрожжей // *Пищевые системы*. 2023. Т. 6, № 4. С. 554–560. DOI: 10.21323/2618-9771-2023-6-4-554-560.
12. Соколова Е.Н., Серба Е.М., Фурсова Н.А., и др. Биотехнологические возможности обогащения дрожжевой биомассы // *АПК России*. 2023. Т. 30, № 5. С. 696–702. DOI: 10.55934/2587-8824-2023-30-5-696-702.
13. Серба Е.М., Юраскина Т.В., Римарева Л.В., и др. Микробная биомасса – биоресурс для получения функциональных пищевых ингредиентов (обзор) // *Техника и технология пищевых производств*. 2023. Т. 53. № 3. С. 426–444. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-3-2446.
14. Ревякина В.А., Серба Е.М., Кувшинова Е.Д., и др. Влияние ферментолита непатогенных (пивных) дрожжей (Протамина К) на показатели физического развития массы тела и роста больных пищевой аллергией // *Российский вестник перинатологии и педиатрии*. 2022. Т. 67, № 4. С. 220. DOI: 10.21508/1027–4065-congress-2022.
15. Серба Е.М., Юраскина Т.В., Римарева Л.В., и др. Ферментолит *Saccharomyces cerevisiae*: научно-практическое обоснование использования в качестве биологически активной добавки // *Биотехнология*. 2022. Т. 38, № 4. С. 107–113. DOI: 10.56304/S0234275822040123.

References

1. Ayele A, Haile ST, Alemu D, et al. Comparative Utilization of Dead and Live Fungal Biomass for the Removal of Heavy Metal: A Concise Review. *The Scientific World Journal*. 2021;1:1-10. DOI: 10.1155/2021/5588111.
2. Potemina TE, Volkova SA, Kuznetsova SV, et al. General issues of iron metabolism and pathogenesis of iron deficiency anaemia. *Bulletin of the Medical Institute 'Reaviz': rehabilitation, doctor and health*. 2020;3:125-137.
3. Igbiosa I, Berube C, Lyell DJ. Iron deficiency anemia in pregnancy. *Current Opinion in Obstetrics and Gynecology*. 2022;34:69-76. DOI: 10.1097/GCO.0000000000000772.
4. Kumar SB, Arnipalli SR, Mehta P, et al. Iron deficiency anemia: efficacy and limitations of nutritional and comprehensive mitigation strategies. *Nutrients*. 2022;14:2976. DOI: 10.3390/nu14142976.
5. Freeland-Graves J, Kaang P, Zamora A, et al. Global diversity of dietary intakes and standards for zinc, iron, and copper. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2020;61:126515. DOI: 10.1016/j.jtemb.2020.126515.
6. Kadyrova RG, Kabirov GF, Mullakhmetov RR. *Biological properties and synthesis of complex salts of α -amino acids of biogenic metals*. Kazan; 2014. 108 p.
7. Gromova OA, Troshin IYu, Hadjidis AK. Analysis of molecular mechanisms of iron (II), copper, manganese in the pathogenesis of iron deficiency anaemia. *Clinical Pharmacology and Pharmacoeconomics*. 2010. № 1. URL: <https://medi.ru/info/5757>.
8. Starovoitova OV, Sadrieva AA, Mingaleeva ZSh, et al. Activation of yeast *Saccharomyces cerevisiae* in the technology of bread preparation. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014;5:235-237.
9. Shikh EV. Interactions of components of vitamin-mineral complexes and rational vitamin therapy. *Russian Medical Journal*. 2004;17:1011.
10. Sokolova EN, Volkova GS, Fursova NA, et al. Yeast biomass-potential model for enrichment of trace elements by biotechnology methods. *Food Industry*. 2024;6:41-44.
11. Yuraskina TV, Sokolova EN, Fursova NA, et al. Innovative approach to the enrichment of food products using baker's yeast. *Food Systems*. 2023;6(4):554-560. DOI: 10.21323/2618-9771-2023-6-4-554-560.
12. Sokolova EN, Serba EM, Fursova NA, et al. Biotechnological opportunities for enrichment of yeast biomass. *APK Russia*. 2023;30(5):696-702. DOI: 10.55934/2587-8824-2023-30-5-696-702.
13. Serba EM, Yuraskina TV, Rimareva LV, et al. Microbial biomass – bioresource for obtaining functional food ingredients (review). *Technique and technology of food production*. 2023;53(3):426-444. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-3-2446.

14. Revyakina VA, Serba EM, Kuvshinova ED, et al. Effect of fermentolysate of non-pathogenic (brewer's) yeast (Protamine K) on physical development indicators of body weight and growth of food allergy patients. *Russian journal of perinatology and paediatrics*. 2022;67(4):220. DOI: 10.21508/1027-4065-congress-2022.
15. Serba EM, Yuraskina TV, Rimareva LV, et al. Fermentolysate *Saccharomyces cerevisiae*: scientific and practical justification for use as a biologically active additive. *Biotechnology*. 2022;38(4):107-113. DOI: 10.56304/S0234275822040123.

Информация об авторах:

Елена Николаевна Соколова¹, ведущий научный сотрудник отдела биотехнологии ферментов, дрожжей, органических кислот и биологически активных добавок, кандидат биологических наук
Антон Юрьевич Шариков², заведующий отделом оборудования пищевых производств и мембранных технологий, кандидат технических наук
Наталья Александровна Фурсова³, заведующая лабораторией биотехнологии пекарных дрожжей
Елена Михайловна Серба⁴, заместитель директора по научной работе, доктор биологических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, доцент
Галина Сергеевна Волкова⁵, заведующая отделом биотехнологии ферментов, дрожжей, органических кислот и биологически активных добавок, доктор технических наук

Information about the authors:

Elena Nikolaevna Sokolova¹, Leading Researcher at the Department of Biotechnology of Enzymes, Yeast, Organic Acids and Biologically Active Additives, Candidate of Biological Sciences
Anton Yurievich Sharikov², Head of the Department of Food Production Equipment and Membrane Technologies, Candidate of Technical Sciences
Natalia Alexandrovna Fursova³, Head of the Laboratory of Baker's Yeast Biotechnology
Elena Mikhailovna Serba⁴, Deputy Director for Research, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Associate Professor
Galina Sergeevna Volkova⁵, Head of the Department of Biotechnology of Enzymes, Yeast, Organic Acids and Biologically Active Additives, Doctor of Technical Sciences

