

УДК 629.4.077:004.8

**БЕТА-КАРОТИН МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ДЛЯ
КОРМОПРОИЗВОДСТВА: СОВРЕМЕННЫЕ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
РЕШЕНИЯ И ВЕТЕРИНАРНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ****Подъяблонская Кристина Александровна,**

магистрант Высшей школы биотехнологии Химико-технологического института
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Уральский государственный лесотехнический университет», г.
Екатеринбург, 620100, Россия,
e-mail: podyablonskayak@yandex.ru

Аннотация

Статья посвящена оценке микробиологического способа получения β -каротина как перспективной альтернативы химическому синтезу и выделению пигмента из растительного сырья. Его преимущества связаны с круглогодичным культивированием продуцентов, управляемостью состава среды, возможностью стандартизации содержания β -каротина и использованием вторичных агропромышленных субстратов, тогда как растительные источники зависят от сорта, сезона, сроков заготовки и хранения, а химический синтез основан на нефтехимическом сырье. Центральное внимание уделено *Blakeslea trispora* как промышленно значимому продуценту; ограничениями микробиологической технологии признаны чувствительность культуры к режиму ферментации и необходимость контроля выхода и сохранности пигмента. Показано, что эффективность микробиологического β -каротина определяется не только концентрацией пигмента, но и формой продукта: очищенным веществом, цельной биомассой или комплексной добавкой. Рассмотрены показатели выхода биомассы, содержания β -каротина, безопасности, прироста массы, обеспеченности витамином А и биохимического статуса животных. Сделан вывод о необходимости отдельной стандартизации разных типов кормовых продуктов и дальнейшей проверки сохранности β -каротина после сушки, гранулирования и хранения.

Ключевые слова: β -каротин, микробиологический синтез, кормопроизводство, *Blakeslea trispora*, *Rhodotorula mucilaginosa*.

**MICROBIOLOGICALLY DERIVED BETA-CAROTENE FOR FEED
PRODUCTION: MODERN BIOTECHNOLOGICAL SOLUTIONS AND
VETERINARY APPLICATIONS****Podyablonskaya Kristina Aleksandrovna,**

Master's Student, Graduate School of Biotechnology, Institute of Chemical Technology, Ural State
Forest Engineering University, Yekaterinburg, 620100, Russia
e-mail: podyablonskayak@yandex.ru

ABSTRACT

The article evaluates microbiological β -carotene production as a promising alternative to chemical synthesis and pigment recovery from plant materials. Its advantages include year-round cultivation, controlled medium composition, standardization of β -carotene content, and the use of secondary agro-industrial substrates, whereas plant sources depend on cultivar, season, harvesting stage, and storage, and chemical synthesis relies on petrochemical feedstocks. The main focus is placed on *Blakeslea trispora* as an industrially significant producer; the principal limitations of microbial production are the sensitivity of cultures to fermentation conditions and the need to control pigment yield and stability. It is shown that the effectiveness of microbiological β -carotene depends not only on pigment concentration, but also on the product form: purified substance, whole biomass, or complex additive. Biomass yield, β -carotene content, safety, weight gain, vitamin A status, and biochemical parameters of animals are examined. The article concludes that different types of feed products require separate standardization and further assessment of β -carotene stability after drying, pelleting, and storage.

Keywords: β -carotene, microbiological synthesis, feed production, *Blakeslea trispora*, *Rhodotorula mucilaginosa*.

Введение

Дефицит провитамина А в животноводстве сохраняет практическое значение в регионах с продолжительным стойловым периодом, поскольку поступление β -каротина зависит от качества зелёных кормов, сроков их заготовки и условий хранения. В опытах с кормовыми культурами потери β -каротина в сене после хранения составляли 66,84%, 57,34% и 10,14% в зависимости от фазы уборки, тогда как для хорошо приготовленного силоса в литературе указываются потери менее 20% [6].

Химический, растительный и микробиологический способы получения β -каротина различаются прежде всего сырьевой базой и управляемостью производственного процесса. Молекула all-trans- β -каротина, полученная химическим синтезом, соответствует тому же изомеру природного происхождения, однако промышленная технология основана на нефтехимических прекурсорах и многостадийных реакциях, поэтому способ получения сохраняет значение для экологической оценки и сертификации кормовой добавки; в органическом животноводстве применение синтетических витаминов и провитаминов регулируется специальными условиями допуска [10; 11].

Растительное сырьё соответствует критерию природного происхождения, но концентрация β -каротина зависит от вида и сорта культуры, фазы вегетации, сезона, способа заготовки и продолжительности хранения [6]. Микробиологический синтез снижает влияние этих факторов, поскольку продуцент выращивается круглый год в контролируемой среде, а содержание β -каротина можно регулировать выбором штамма, состава субстрата, параметров аэрации, температуры, pH и продолжительности ферментации [3; 4; 7–10].

Сочетание круглогодичного производства, воспроизводимости состава и возможности использования вторичного агропромышленного сырья определяет потенциальное преимущество микробного β -каротина перед растительными и синтетическими источниками. Реализация этого преимущества зависит от выхода пигмента, стоимости питательной среды, энергозатрат на аэрацию и перемешивание, а также расходов на выделение, сушку и стабилизацию продукта, поэтому перспективность

микробиологического способа должна оцениваться вместе с требованиями к контролю ферментации.

Цель статьи состоит в определении технологически и ветеринарно обоснованных условий применения микробного β -каротина в кормопроизводстве. Для достижения цели рассмотрены основные продуценты β -каротина, формы кормовых продуктов на его основе, показатели биологической эффективности и ограничения, которые необходимо учитывать при переходе от лабораторного культивирования к кормовой практике.

Сравнение способов получения β -каротина

Химический синтез обеспечивает высокий объём выпуска и однородность основного вещества, но использует нефтехимические исходные соединения и не устраняет различий между синтетическим и биогенным продуктом по происхождению, изомерному профилю и условиям допуска в органическое производство. Растительная экстракция сохраняет природный статус продукта, однако её результат ограничен сезонностью накопления каротиноидов, неодинаковым содержанием пигмента в сырье и потерями на этапах заготовки, экстракции и хранения [6; 10; 11].

Микробиологический способ объединяет биогенное происхождение β -каротина с управляемостью промышленной ферментации. Продуктивность можно повышать посредством подбора штаммов, состава среды и режима культивирования, а использование сывороток и других вторичных субстратов уменьшает потребность в специально подготовленном сырье [1; 3; 4; 7].

По совокупности критериев микробный β -каротин представляет наиболее перспективную альтернативу для кормопроизводства, поскольку его выпуск не связан с сельскохозяйственным сезоном и допускает стандартизацию по концентрации пигмента и составу биомассы. Ограничениями остаются чувствительность продуцентов к параметрам ферментации, затраты на поддержание массообмена и необходимость контроля сохранности β -каротина после выделения или технологической обработки продукта.

Микробные продуценты β -каротина для кормопроизводства

Микробиологический β -каротин объединяет несколько технологически разных продуктов. В одном случае пигмент выделяется и очищается после культивирования, в другом кормовой ингредиент содержит цельную инактивированную биомассу продуцента; возможна также комплексная добавка, где каротинсодержащий компонент сочетается с пробиотическими штаммами.

В обзоре В. В. Ядерец и соавторов к биотехнологическим продуцентам каротиноидов отнесены дрожжи, нитчатые грибы, бактерии и микроводоросли. Синтезируемый состав неоднороден: вместе с β -каротином могут образовываться ликопин, γ -каротин, торулен, торулародин и другие пигменты, поэтому общий выход каротиноидов нельзя использовать как прямой эквивалент количества β -каротина [3].

Blakeslea trispora как промышленный продуцент β -каротина

Среди микробных продуцентов β -каротина центральное место занимает *Blakeslea trispora*. Этот гетероталлический гриб используется для получения β -каротина за счёт совместного культивирования штаммов противоположных типов спаривания, а усиление каротиногенеза связано с половым взаимодействием культур и образованием триспоровых кислот [3; 8].

Промышленная значимость *B. trispora* определяется тем, что метаболический поток у этого гриба может быть направлен к накоплению β -каротина, а не только к образованию смешанного каротиноидного профиля. В современных работах каротиногенез *B. trispora* связывают с активностью генов *carB* и *carRA*, световой индукцией и действием регуляторных факторов, включая синее освещение, ретинол и ароматические соединения [8].

Ключевыми технологическими факторами синтеза являются соотношение (+) и (-) штаммов, состав источника углерода, липидные компоненты среды, β -ионон, режим аэрации и интенсивность перемешивания. В обобщённых данных продуктивность *B. trispora* составляла от 61,2–64,1 мг/л до 1,357 г/л β -каротина в зависимости от штаммов, состава среды и режима ферментации, а в отдельных опытах содержание пигмента достигало 92,4 мг/г биомассы [3; 7].

Данные по культивированию *B. trispora* на обогащённых сточных водах переработки оливок подтверждают зависимость выхода β -каротина от состава субстрата. В этой работе на обогащённых средах было получено 61,2 мг/л и 64,1 мг/л β -каротина, причём его доля составляла 82–88% от общего количества каротиноидов [7].

Более высокий уровень продуктивности показан в реакторе с перемешиванием, где максимальная концентрация β -каротина достигала 1500 мг/л после внесения смеси природных масел и антиоксиданта. В том же опыте пигментообразование связывалось с морфологией культуры: доля зигоспор в сухой биомассе составляла около 51%, что указывает на связь между половым развитием гриба и накоплением β -каротина [9].

Главное технологическое ограничение *B. trispora* связано с мицелиальной природой продуцента. В глубинной культуре необходимо контролировать вязкость культуральной жидкости, чувствительность мицелия к сдвиговым напряжениям и соотношение пеллетной и филаментозной морфологии, поскольку эти параметры влияют на массообмен, аэрацию и воспроизводимость выхода пигмента.

Следовательно, *B. trispora* следует рассматривать как наиболее значимый объект для получения микробного β -каротина, но не как технологически простой продуцент. Для оценки конкретной технологии необходимо указывать пару штаммов, способ их совместного культивирования, индукторы каротиногенеза, морфологию биомассы и фактический выход β -каротина в пересчёте на объём среды и сухую биомассу.

Дрожжи рода *Rhodotorula*

Дрожжи родов *Rhodotorula*, *Rhodospiridium* и *Sporidiobolus* занимают вспомогательное место по отношению к *B. trispora*, поскольку их практическое значение связано прежде всего с получением каротиноидной биомассы на вторичном растительном сырье. Такая биомасса содержит белки, липиды и смесь каротиноидов, поэтому она ближе к кормовому концентрату, чем к препарату одного β -каротина [3].

В. В. Колпакова и соавторы использовали *Rhodotorula mucilaginosa* 111 для переработки сывороток, образующихся после получения белковых концентратов из гороховой и нутовой муки, а также после переработки картофеля. Наиболее высокий выход биомассы был получен на гороховой сыворотке при температуре 16,9 °С, pH 7,8 и количестве посевного материала 1,85%; он составил 81 г/дм³ [1].

Массовая доля белка в сухой биомассе достигла 58,90±3,03%. В липидах 78% приходилось на ненасыщенные жирные кислоты, в том числе 45,26±0,70% – на линолевую и 24,04±0,76% – на олеиновую кислоту; каротиноидный профиль включал β -каротин, торулен, торулародин, фитоин и его производные [1].

Предварительная биологическая оценка проводилась на инфузории *Tetrahymena pyriformis*. Концентрат на основе гороховой сыворотки повышал рост тест-культуры на 29,1%, а продукт из нутовой сыворотки – на 18,6% относительно дистиллированной воды, тогда как картофельная сыворотка снижала коэффициент роста инфузорий [1].

Замена субстрата меняет биологические свойства продукта, вместе с тем тест на инфузориях не заменяет испытаний на сельскохозяйственных животных и не позволяет установить эффективную дозу β -каротина в рационе.

Бактерия *Mycolicibacterium neoaurum*

Другой вариант технологии основан на использовании бактерии *Mycolicibacterium neoaurum* AC-3067D. При разработке питательной среды учитывалась способность глицерина стимулировать каротиногенез и одновременно затруднять сушку биомассы, если в среде сохраняется остаточное количество субстрата [4]. Комбинация 10 г/л глицерина и 10 г/л глюкозы обеспечила выход сухой биомассы 17,8 г/л и содержание β -каротина 182,5 мг/кг. Внесение Твин-80 в концентрации 1 г/л увеличивало выход биомассы на 14,0%, а содержание β -каротина – на 32,2% по сравнению с контролем [4].

Состав среды уточнялся с помощью полного факторного эксперимента типа 2^3 . Для апробации были выбраны концентрации глицерина 15 г/л, глюкозы 5 г/л и Твин-80 1,5 г/л, после чего в колбах содержание β -каротина составило 258,23 мг/кг [4]. В биореакторе объёмом 3 л поддерживали pH 7,0–7,2 и концентрацию растворённого кислорода 50%, а через 30 ч вносили раствор глюкозы. На 68–72-м часу были получены 25,2 г/л биомассы и 376,5 мг/кг β -каротина [4].

Этот опыт показывает, что повышение продуктивности зависит от согласования состава среды и режима ферментации. Для производственного масштабирования необходимо проверить воспроизводимость показателей при изменении геометрии ферментера, интенсивности перемешивания и массообмена.

Типы кормовых продуктов на основе микробного β -каротина

Преимущество микробиологического способа не ограничивается заменой источника β -каротина, поскольку ферментация допускает выбор формы готового продукта уже на стадии проектирования технологии. После культивирования пигмент может быть выделен в виде концентрированного вещества либо сохранён в цельной биомассе вместе с белками, липидами и сопутствующими каротиноидами, что расширяет возможности кормового применения, но требует различать дозу β -каротина и массу многокомпонентного ингредиента.

Рассмотренные технологии формируют три типа кормового продукта. Первый представляет собой очищенный или концентрированный β -каротин, пригодный для точного дозирования; второй тип – цельная микробная биомасса, содержащая пигмент, белки, липиды и другие каротиноиды; третий тип – комбинированная рецептура с каротинсодержащей биомассой и пробиотиками.

Очищенный β -каротин удобен для стандартизации, поскольку дозирование можно вести по массе действующего вещества. Ограничение такой формы связано с затратами на выделение, очистку, стабилизацию и защиту пигмента от окисления.

Цельная микробная биомасса технологически проще, но требует более сложной аналитической характеристики. Для неё необходимо отдельно определять содержание сухого вещества, сырого протеина, липидов, общих каротиноидов и β -каротина.

Высокий выход биомассы не гарантирует высокой концентрации пигмента, а насыщенная β -каротином биомасса не всегда обеспечивает большой объёмный выход, если рост продуцента ограничен. Поэтому полная характеристика ферментации должна включать выход биомассы, содержание β -каротина, длительность процесса и стабильность полученного продукта.

Комплексная добавка занимает промежуточное положение между витаминным препаратом и функциональным кормовым продуктом. Её эффект может быть связан не только с β -каротином, но и с белком, липидами, пробиотическими штаммами, фосфолипидами или другими компонентами рецептуры.

Биомасса *M. neoaurum* была использована при разработке комплексной пробиотической добавки. В её состав вошли инактивированные клетки *M. neoaurum* ВКМ Ас-3067D с содержанием не менее 250 мкг β -каротина на 1 г и спорообразующие бактерии

Bacillus subtilis ВКМ В-3826D и *Bacillus licheniformis* ВКМ В-3825D в количестве не менее 5×10^7 КОЕ/г каждого штамма [5].

Массовая доля сырого протеина в этой добавке составляла $21,5 \pm 1,6\%$. Токсикологическая оценка проводилась в соответствии с ГОСТ 32296–2013, а класс опасности определялся по ГОСТ 12.1.007–76; добавка была отнесена авторами к 4-му классу опасности и охарактеризована как малотоксичная [5].

Для серийного производства такой результат должен дополняться контролем содержания β -каротина, количества жизнеспособных спор, микробиологической чистоты и полноты инактивации каротинсинтезирующей биомассы. Если продукт заявлен как источник β -каротина, то нормативная оценка должна фиксировать не только безопасность, но и сохранность пигмента в течение срока годности.

Использование вторичного сырья способно снизить расход специально подготовленных компонентов среды. Вместе с тем результаты культивирования *R. tucilaginosus* на разных сыворотках показывают, что каждый вид вторичного сырья требует входного контроля и отдельной настройки режима ферментации [1].

Отдельной проблемой остаётся сохранность микробного β -каротина после приготовления кормового продукта. Концентрация пигмента сразу после культивирования не показывает, какая его доля останется после инактивации, сушки, смешивания, гранулирования и хранения.

Ветеринарно-зоотехнические аспекты применения

Ветеринарная ценность β -каротина связана с его провитаминной функцией, участием в антиоксидантной защите и влиянием на физиологическое состояние животных. Однако при анализе кормовых добавок необходимо различать действие β -каротина как вещества и действие комплексной рецептуры, в которой присутствуют дополнительные биологически активные компоненты.

При введении пробиотической добавки с микробным β -каротином в рацион бройлеров в количестве 1 кг/т комбикорма среднесуточный прирост живой массы увеличился на 4,3%, а содержание витамина А в печени – в 1,4 раза относительно контроля. У свиней прирост живой массы превысил контрольное значение на 6,7% [5].

Повышение содержания витамина А подтверждает использование каротиноидного компонента организмом птицы. Изменение прироста массы менее специфично, поскольку добавка одновременно содержала β -каротин, микробный белок и два пробиотических штамма [5].

Для разграничения механизмов действия необходимы контрольные группы, получающие отдельно пробиотическую часть, каротинсодержащую биомассу и полную композицию. Без такого построения опыта результаты относятся к добавке в целом и не доказывают, что аналогичный прирост будет получен при использовании одного микробного β -каротина. Ветеринарно значимые показатели применения каротинсодержащих продуктов исследованы Р. М. Хоменко, В. В. Александровым и И. В. Кныш. В опыт включили две группы коров в транзитный период по 10 животных, а опытной группе в течение 15 дней до отёла давали комплексную добавку, растворённую в тёплой воде из расчёта 300 мл на 25 л [2].

Биохимические исследования проводили до применения продукта, на девятые сутки кормления и через семь суток после отёла. На девятые сутки содержание каротина в крови составило $0,71 \pm 0,34$ мг% в опытной группе и $0,48 \pm 0,46$ мг% в контрольной [2]. Количество кетонных тел равнялось соответственно $0,86 \pm 0,40$ и $1,23 \pm 0,07$ ммоль/л, общего белка – $80,9 \pm 0,18$ и $69,0 \pm 0,5$ г/л, общего кальция – $2,65 \pm 0,38$ и $2,25 \pm 0,26$ ммоль/л. Через семь суток после отёла содержание каротина достигло $0,91 \pm 0,13$ мг% в опытной группе, тогда как в контрольной составляло $0,45 \pm 0,01$ мг% [2].

В состав исследованного продукта входили β -каротин в мицеллярной форме, углеводы, фосфолипиды, эфирные масла и полиолы. Источник β -каротина в публикации не указан, поэтому результаты характеризуют действие комплексной каротинсодержащей добавки, но не могут использоваться как прямое доказательство эффективности вещества микробиологического происхождения [2].

Ценность этих данных состоит в определении показателей, пригодных для последующих ветеринарных испытаний. К таким показателям относятся содержание каротина в крови, витамина А в печени, кетонных тел, общего белка, кальция и цинка, а также потребление корма, прирост массы и восстановление после физиологической нагрузки.

В выбранных публикациях отсутствует прямое сравнение равных доз микробного, растительного и синтетического β -каротина. Не установлена дозозависимость добавки с *M. neoaurum*, а действие её каротинсодержащей части не отделено от пробиотических компонентов.

Последующие исследования должны предусматривать одинаковые по энергии, протеину и витамину А рационы, различающиеся только источником и дозой β -каротина. Для цельноклеточных продуктов дополнительно требуется учитывать поступление микробного белка, липидов и сопутствующих каротиноидов.

При оценке ветеринарной эффективности прирост живой массы следует дополнять показателями, связанными с провитаминной функцией вещества. Для транзитных коров информативны кетонные тела, глюкоза, кальций и клиническое восстановление, для птицы – сохранность, конверсия корма, витаминный статус и качество продукции.

Выводы

1. Микробиологический синтез представляет перспективный способ получения β -каротина для кормопроизводства, поскольку совмещает биогенное происхождение продукта, круглогодичное производство и возможность стандартизации концентрации пигмента. В отличие от растительной экстракции он не зависит непосредственно от сезона, сорта и сохранности исходных культур, а по сравнению с химическим синтезом исключает получение β -каротина из нефтехимических прекурсоров; его технологическое преимущество реализуется при строгом контроле штамма, среды, pH, температуры, аэрации и морфологии продуцента.

2. Среди рассмотренных продуцентов *Blakeslea trispora* занимает центральное место как промышленно значимый источник β -каротина. Максимальные значения, приведённые в литературе, достигают 1,357 г/л по обобщённым данным и 1500 мг/л в реакторе с перемешиванием, однако масштабирование такой технологии ограничивается морфологией мицелия, вязкостью культуральной жидкости и чувствительностью культуры к режиму перемешивания.

3. Дрожжи *Rhodotorula mucilaginosa* и бактерия *Mycolicibacterium neoaurum* перспективны для получения каротиноидной биомассы и комплексных кормовых продуктов. Их применение требует указания не только выхода биомассы, но и фактического содержания β -каротина, белка, липидов и сопутствующих каротиноидов.

4. Ветеринарно значимые эффекты показаны преимущественно для комплексных добавок, где β -каротин сочетается с белковыми, липидными или пробиотическими компонентами. Раздельный вклад каротинсодержащей биомассы и сопутствующих компонентов остаётся недостаточно установленным, поэтому дальнейшие опыты должны включать отдельные контрольные группы.

5. Потенциальная экономическая выгодность микробного β -каротина связана с использованием дешёвых и вторичных субстратов, сокращением сезонных колебаний сырьевой базы и воспроизводимым выпуском продукта заданного состава. Окончательная

оценка должна учитывать продуктивность штамма, продолжительность ферментации, расходы на аэрацию, перемешивание, выделение и сушку, а также потери β -каротина при гранулировании и хранении.

Список литературы:

1. Колпакова В. В. Использование экологически безопасного микромицета рода *Rhodotorula* для получения кормового каротинсодержащего концентрата / В. В. Колпакова, Р. В. Уланова, Д. С. Куликов, В. А. Гулакова, Л. В. Васильева, Ю. Ю. Берестовская, Е. Г. Черемных, А. А. Ашихмин // Юг России: экология, развитие. – 2022. – Т. 17, № 4. – С. 61–78.
2. Хоменко Р. М. Влияние комплексной кормовой добавки «Комплекс Бета-Каротин» на биохимические показатели крови в транзитный период / Р. М. Хоменко, В. В. Александров, И. В. Кныш // Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии. – 2025. – № 1. – С. 149–153.
3. Ядерец В. В. Каротиноиды: обзор основных биотехнологических способов и условий получения / В. В. Ядерец, Н. В. Карпова, Е. В. Глаголева, К. С. Петрова, А. С. Шибаева, В. В. Джавахия // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2024. – Т. 14, № 1. – С. 41–54.
4. Ядерец В. В. Оптимизация питательной среды для глубинного культивирования штамма *Mycolicibacterium neoaurum* AC-3067D – продуцента β -каротина / В. В. Ядерец, Н. В. Карпова, Е. В. Глаголева, В. А. Цыганов, А. С. Шибаева, В. В. Джавахия // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2025. – Т. 15, № 2. – С. 252–261.
5. Ядерец В. В. Пробиотическая кормовая добавка с микробным бета-каротином: разработка и свойства / В. В. Ядерец, Н. В. Карпова, Е. В. Глаголева, В. В. Джавахия // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2025. – Т. 33, № 1. – С. 141–160.
6. Zhao G. Q. Effect of harvest dates on β -carotene content and forage quality of rye silage and hay / G. Q. Zhao, S. N. Wei, C. Liu, H. J. Kim, J. G. Kim // Journal of Animal Science and Technology. – 2021. – Vol. 63, № 2. – P. 354–366.
7. Papadaki E. Natural β -carotene production by *Blakeslea trispora* cultivated in Spanish-style green olive processing wastewaters / E. Papadaki, F. T. Mantzouridou // Foods. – 2021. – Vol. 10, № 2. – Article 327.
8. Zheng Q. The photoinduced β -carotene synthesis in *Blakeslea trispora* is dependent on WC-2A / Q. Zheng, K. Zhu, K. Wang, Y. Wang, X. Yu, W. Luo // Frontiers in Microbiology. – 2025. – Vol. 16. – Article 1554367.
9. Mantzouridou F. Optimization of β -carotene production from synthetic medium by *Blakeslea trispora* in a stirred tank reactor and relationship between morphological changes and pigment formation / F. Mantzouridou, T. Roukas, P. Kotzekidou // Food Biotechnology. – 2002. – Vol. 16, № 3. – P. 167–187.
10. Larroude M. Removal of lycopene substrate inhibition enables high carotenoid productivity in *Yarrowia lipolytica* / M. Larroude, C. Celinska, A. Back, et al. // Nature Communications. – 2022. – Vol. 13. – Article 572. DOI: 10.1038/s41467-022-28277-w.

11. Commission Implementing Regulation (EU) 2021/1165 of 15 July 2021 authorising certain products and substances for use in organic production and establishing their lists // Official Journal of the European Union. – 2021. – L 253. – P. 13–48.

References:

1. Kolpakova V. V. Use of an environmentally friendly micromycete of the genus *Rhodotorula* to obtain a feed carotene-containing concentrate / V. V. Kolpakova, R. V. Ulanova, D. S. Kulikov, V. A. Gulakova, L. V. Vasilyeva, Yu. Yu. Berestovskaya, E. G. Cheremnykh, A. A. Ashikhmin // South of Russia: ecology, development. – 2022. – Vol. 17, No. 4. – Pp. 61-78.
2. Khomenko R. M. Effect of the complex feed additive "Beta-Carotene Complex" on biochemical blood parameters during the transition period / R. M. Khomenko, V. V. Aleksandrov, I. V. Knysh // Normative and legal regulation in veterinary medicine. – 2025. – No. 1. – Pp. 149-153.
3. Yaderets V. V. Carotenoids: a review of the main biotechnological methods and conditions for their production / V. V. Yaderets, N. V. Karpova, E. V. Glagoleva, K. S. Petrova, A. S. Shibaeva, V. V. Dzhavakhiya // News of the universities. Applied chemistry and biotechnology. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – Pp. 41-54.
4. Yaderets V. V. Optimization of the nutrient medium for submerged cultivation of the *Mycolicibacterium neoaurum* strain AC-3067D - producer of β -carotene / V. V. Yaderets, N. V. Karpova, E. V. Glagoleva, V. A. Tsyganov, A. S. Shibaeva, V. V. Dzhavakhiya // News of the universities. Applied chemistry and biotechnology. – 2025. – Vol. 15, No. 2. – P. 252–261.
5. Yaderets V. V. Probiotic feed additive with microbial beta-carotene: development and properties / V. V. Yaderets, N. V. Karpova, E. V. Glagoleva, V. V. Dzhavakhiya // Storage and processing of agricultural raw materials. – 2025. – Vol. 33, No. 1. – P. 141–160.
6. Zhao G. Q. Effect of harvest dates on β -carotene content and forage quality of rye silage and hay / G. Q. Zhao, S. N. Wei, C. Liu, H. J. Kim, J. G. Kim // Journal of Animal Science and Technology. – 2021. – Vol. 63, No. 2. – P. 354–366.
7. Papadaki E. Natural β -carotene production by *Blakeslea trispora* cultivated in Spanish-style green olive processing wastewaters / E. Papadaki, F. T. Mantzouridou // Foods. – 2021. – Vol. 10, No. 2. – Article 327.
8. Zheng Q. The photoinduced β -carotene synthesis in *Blakeslea trispora* is dependent on WC-2A / Q. Zheng, K. Zhu, K. Wang, Y. Wang, X. Yu, W. Luo // Frontiers in Microbiology. – 2025. – Vol. 16. – Article 1554367.
9. Mantzouridou F. Optimization of β -carotene production from synthetic medium by *Blakeslea trispora* in a stirred tank reactor and relationship between morphological changes and pigment formation / F. Mantzouridou, T. Roukas, P. Kotzekidou // Food Biotechnology. – 2002. – Vol. 16, No. 3. – P. 167–187.
10. Larroude M. Removal of lycopene substrate inhibition enables high carotenoid productivity in *Yarrowia lipolytica* / M. Larroude, C. Celinska, A. Back, et al. // Nature Communications. – 2022. – Vol. 13. – Article 572. DOI: 10.1038/s41467-022-28277-w.

11. Commission Implementing Regulation (EU) 2021/1165 of 15 July 2021 authorising certain products and substances for use in organic production and establishing their lists // Official Journal of the European Union. – 2021. – L 253. – P. 13–48.