

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, No 2. С. 149-169.  
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 2. P. 149-169.

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КОРМЛЕНИЯ

Обзорная статья  
УДК 636.084.087.76  
doi:10.33284/2658-3135-107-2-149

### Эффективность использования каротинсинтезирующих дрожжей *Rhodotorula spp.* в кормлении сельскохозяйственных животных

Мария Валентиновна Довыденкова<sup>1</sup>, Евгения Николаевна Колодина<sup>2</sup>, Дарья Александровна Никанова<sup>3</sup>, Татьяна Ивановна Логвинова<sup>4</sup>, Ольга Анатольевна Артемьева<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика

Л.К. Эрнста, Дубровицы, Россия

<sup>1</sup>vijmikrob@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3093-4117>

<sup>2</sup>vijmikrob@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4017-3390>

<sup>3</sup>vijmikrob@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5164-244X>

<sup>4</sup>vijmikrob@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7075-544X>

<sup>5</sup>vijmikrob@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7706-4182>

**Аннотация.** Успешное развитие отраслей АПК, таких как животноводство, птицеводство и аквакультура, зависит от обеспеченности их кормами. К альтернативным технологиям относится микробиологический синтез. От повышения эффективности корма до использования в качестве альтернативы антибиотикам, стимулирующим рост, и поддержания здоровья кишечника и иммунитета при одновременном снижении выделения патогенов – новые варианты использования обусловлены признанием того, что производные дрожжей содержат специфические биоактивные соединения, обладающие функциональными свойствами. Результаты ряда научных исследований, представленных в данной обзорной статье, подчеркивают важную роль каротинсинтезирующих дрожжей в качестве кормовой добавки для питания сельскохозяйственных животных и птицы. Красные дрожжи способны синтезировать каротиноиды из недорогостоящих источников углерода, каротиноиды важны благодаря своей активности в качестве предшественников витамина А, красителей, антиоксидантов. Каротиноиды могут быть легко получены химическим синтезом, хотя их биотехнологическое производство быстро становится привлекательной альтернативой химическому способу. Также они участвуют в молекулярных процессах, что приводит к возможному благотворному воздействию на организм в целом. Биосинтез каротиноидов является специфической особенностью родов *Rhodotorula*, *Rhodospiridium* и *Phaffia*. Основными каротиноидными пигментами, вырабатываемыми дрожжами *Rhodotorula* и *Rhodospiridium*, являются β-каротин, торулен и торулоролдин в различных пропорциях, а также астаксантин, вырабатываемый *Phaffia rhodozyma*.

**Ключевые слова:** животноводство, корма, пробиотики, каротинсинтезирующие дрожжи, каротиноиды

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-16-00167.

**Для цитирования:** Эффективность использования каротинсинтезирующих дрожжей *Rhodotorula spp.* в кормлении сельскохозяйственных животных (обзор) / М.В. Довыденкова, Е.Н. Колодина, Д.А. Никанова, Т.И. Логвинова, О.А. Артемьева // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 2. С. 149-169. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-2-149>

## THEORY AND PRACTICE OF FEEDING

Review article

**The effectiveness of using carotene-synthesizing yeast *Rhodotorula spp.* in feeding farm animals****Maria V Dovydenkova<sup>1</sup>, Evgenia N Kolodina<sup>2</sup>, Daria A Nikanova<sup>3</sup>, Tatyana I Logvinova<sup>4</sup>,  
Olga A Artemieva<sup>5</sup>**<sup>1,2,3,4,5</sup>Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member LK Ernst, Dubrovitsy, Russia<sup>1</sup>vijmikrob@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3093-4117><sup>2</sup>vijmikrob@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4017-3390><sup>3</sup>vijmikrob@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5164-244X><sup>4</sup>vijmikrob@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7075-544X><sup>5</sup>vijmikrob@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7706-4182>

**Abstract.** The successful development of agricultural sectors, such as livestock farming, poultry farming and aquaculture, depends on the availability of feed. Alternative technologies include microbiological synthesis. New uses are driven by the recognition that yeast derivatives contain specific bioactive compounds that have functional properties - from improving feed efficiency to being used as an alternative to growth-promoting antibiotics and maintaining intestinal health and immunity while reducing pathogen release. The results of scientific research presented in this article emphasize the important role of carotene-synthesizing yeast as a functional feed additive for the nutrition of farm animals and poultry. Red yeast is capable of synthesizing carotenoids from inexpensive carbon sources; carotenoids are important due to their activity as precursors of vitamin A, dyes, and antioxidants. Carotenoids can be easily produced by chemical synthesis, although their biotechnological production is rapidly becoming an attractive alternative to chemical processes. They also participate in molecular processes, which leads to possible beneficial effects on the body as a whole. Biosynthesis of carotenoids is a specific feature of the genera *Rhodotorula*, *Rhodosporidium* and *Phaffia*. The main carotenoid pigments produced by the yeasts *Rhodotorula* and *Rhodosporidium* are  $\beta$ -carotene, torulen and torulorhodine in varying proportions, as well as astaxanthin produced by *Phaffia rhodozyma*.

**Keywords:** animal husbandry, feed, probiotics, carotene-synthesizing yeast, carotenoids

**Acknowledgments:** the work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 23-16-00167.

**For citation:** Dovydenkova MV, Kolodina EN, Nikanova DA, Logvinova TI, Artemyeva OA. Efficiency of using carotene-synthesizing yeast *Rhodotorula spp.* in the feeding of farm animals (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(2):149-169. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-2-149>

**Введение.**

Иногда изменяющиеся климатические и экономические условия ограничивают возможность производства продукции традиционными способами, что в свою очередь может негативно отражаться на обеспеченности кормовой базы некоторых отраслей АПК. К альтернативным технологиям можно отнести микробиологический синтез кормов (Matilde C et al., 2021). Дрожжи богаты питательными и биологически активными веществами (например: белки, липиды, витамины, антиоксиданты, минеральные вещества), которые могут быть внесены в состав основного рациона в качестве пробиотических культур. Основными продуцентами микробного белка являются дрожжи родов *Candida*, *Saccharomyces*, *Trichosporon*, *Schwanniomyces*, *Saccharomycopsis*, *Kluveromyces* и др. (Колодина Е.Н. и др., 2016; Колпакова В.В. и др., 2022).

Первоначально они применялись в качестве источников легкоусвояемого белка в рационах для молодняка, чтобы компенсировать использование традиционных источников белка, таких как соя и рыбная мука, но в последние годы стратегии применения расширились и стали применяться для непитательных целей для всех категорий животных. Что касается производных дрожжей, по-

токов продуктов, поступающих в результате последующей переработки пищевых дрожжей, то расширение вариантов использования по группам видов было обусловлено более глубоким пониманием состава каждого производного наряду с более глубокими знаниями механистического действия ключевых функциональных компонентов. От повышения эффективности корма до использования в качестве альтернативы антибиотикам, стимулирующим рост, и поддержания здоровья кишечника и иммунитета при одновременном снижении выделения патогенов – новые варианты использования обусловлены признанием того, что производные дрожжей содержат специфические биоактивные соединения, обладающие функциональными свойствами (Patterson R et al., 2023). Дускаев Г.К. с соавторами (2019) отметили, что дрожжи оптимизируют функцию рубца крупного рогатого скота, улучшают показатели производства молока. Также добавление дрожжевого пробиотика улучшило выработку молока на 23 % у коров, и пик лактации у коров был увеличен на 1 неделю дольше, чем у контрольных коров (4 против 3 недели соответственно).

#### **Цель исследования.**

Анализ эффективности использования каротинсинтезирующих дрожжей, в частности дрожжей *Rhodotorula spp.*, в кормлении сельскохозяйственных животных, птицы, аквакультуры и других животных.

#### **Материалы и методы исследования.**

Поиск и анализ литературы проводился с использованием интернет-ресурсов: РИНЦ – <https://www.elibrary.ru>, Текнофид – <https://.info@teknofeed.org>, National library of medicine – <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov> за период 1990-2024 гг.

#### **Результаты исследования и обсуждение.**

Дрожжи представляют собой большую группу одноклеточных микроорганизмов, которые могут поддерживать метаболическую активность в кислой среде желудка и потреблять кислород в кишечном тракте посредством дыхания. Также дрожжи обладают антагонистической активностью по отношению к патогенной микрофлоре, т. к. потребляют остаточный кислород в кишечном тракте в результате дыхания, что благотворно влияет на рост полезных бактерий (Yang S-P et al., 2010).

Считается, что добавление дрожжей усиливает пищеварительную и ферментативную функции ЖКТ, одновременно изменяя активность микробиоты ЖКТ, хотя механизмы не ясны (Denev SA et al., 2007). На основании исследований *in vitro* и *in vivo*, добавление дрожжевой культуры в рацион, по-видимому, оказывает несколько воздействий на микробиоту рубца, включая увеличение количества полезных бактерий и бактерий, переваривающих клетчатку, а также переход от метаногенов, потребляющих водород, к бактериям, способным преобразовывать водород и CO<sub>2</sub> в уксусную кислоту, что в свою очередь может принести потенциальную пользу жвачному животному-хозяину прямо или косвенно (Fonty G and Chaucheyras-Durand F, 2006; Jouany JP, 2001).

В исследовании, проведенном Ogunade IM с коллегами (2019), включение дрожжей в рацион бычков вызвало увеличение популяции бактерий, переваривающих углеводы (*Ruminococcus albus*, *R. champanellensis*, *R. bromii* и *R. obeum*), и бактерий, утилизирующих лактат (*M. elsdenii*, *Desulfovibrio desulfuricans* и *Desulfovibrio vulgaris*). У жвачных животных использование *Saccharomyces cerevisiae* в качестве DFM (кормовая добавка, содержащая живые микроорганизмы) было связано со стимулированием микробного роста в рубце (Bach A et al., 2007) улучшением здоровья, снижением частоты заболеваний, сокращением использования антибиотиков и снижением смертности телят перед отъемом (Galvaõ KN et al., 2005). Durand-Chaucheyras F с соавторами (1998) также наблюдали количество жизнеспособных дрожжей (10<sup>5</sup> КОЕ/г) в фекалиях ягнят через 48 часов после приема дрожжей DFM. Fomenky BE с коллегами (2017) в своих исследованиях показали, что живые дрожжи, добавляемые в рацион, могут сохраняться в пищеварительном тракте как овец, так и крупного рогатого скота, а также могут быть обнаружены жизнеспособными в фекалиях (в диапазоне от 17 до 34 %). Поэтому мы предполагаем, что живые дрожжи могут также оказывать пря-

мое влияние на толстую кишку коров. Применение в рационе кормления телят кормового пробиотика Актив Ист на основе живых дрожжевых клеток *Saccharomyces cerevisiae* сопровождалось увеличением живой массы на 8 %, что подтверждается показателями линейного роста телят от рождения до окончания эксперимента. Затраты корма на 1 кг прироста опытных телят были ниже на фоне удорожания рациона на 1,14 %, чем в контрольной группе. Однако дополнительный валовой прирост живой массы телят позволил покрыть данные расходы и получить дополнительный доход от их реализации в живом весе как ремонтный молодняк в размере 17,6 % (Мошкина С.В. и Химичева С.Н., 2020).

Согоня L с соавторами (1999) показали, что стимуляция роста фибролитических бактерий происходит не всегда, и одни и те же дрожжи могут увеличивать скорость, но не степень деградации целлюлозы (Callaway ES and Martin SA, 1997). В исследованиях Chaucheyras-Durand F с коллегами (2008) культура дрожжей также увеличила количество микробов, разрушающих волокна, и их взаимодействие с бактериями, разрушающими клеточную стенку.

Кормление дрожжевой культурой снижает общую концентрацию ЛЖК в рубце из-за увеличения скорости ферментации и бактериальная популяция при добавлении живой культуры дрожжей (Lascano GL and Heinrichs AJ, 2009).

Некоторые дрожжи, благодаря наличию в своих клетках высокой концентрации каротиноидов, окрашены в красный, розовый, коралловый цвета разных оттенков. В отличие от хлебопекарных и пивных, красные дрожжи в своем составе имеют высокую концентрацию астаксантина и каротина, которые способствуют повышению иммунитета и влияют на кишечную микробиоту животного (Wang J et al., 2015).

Некоторые виды дрожжей естественным образом способны синтезировать широкий спектр каротиноидов, которые впоследствии метаболизируются в витамин А (Buzzini P and Vaughn-Martini A, 2006). Витамин А способствует дифференцировке и пролиферации клеток, что делает его критически важным для поддержания кишечника и здоровья (Sporn MB et al., 1976).

Обычно корма для животных бедны каротиноидами, поэтому их вносят дополнительно к основному рациону. Животные не способны вырабатывать каротиноиды, но способны усваивать поступающие в организм каротиноиды. Каротиноидные пигменты играют важную роль в защите организма, могут служить антиоксидантами, обладать антиканцерогенными свойствами, в том числе и иммуномодулирующими и онкопротекторными, что способствует нормализации репродуктивной функции, роста и развития животных и птицы (Колпакова В.В. и др., 2022). Они имеют структуру изопреноидов, некоторые из них являются предшественниками витамина А, которые в живом организме в результате ферментативного расщепления превращаются в витамин А. Каротиноиды улучшают клеточную коммуникацию и усиливают иммунный ответ у жвачных и моногастрических животных, снижают заболеваемость маститом у молочных коров, усваиваются в молоке в виде витамина А, тем самым улучшая качество хранения молока (Nozietea P et al., 2006), повышают репродуктивную эффективность.

В составе пищевых добавок каротиноиды обладают и антимикробной активностью (Kaulmann A and Bohn T, 2014). Лекарственные препараты, а также пищевые и кормовые добавки, содержащие каротиноиды, нашли большое применение и очень распространены по всему миру (Савчик А.В. и Новик Г.И., 2020). На сегодняшний день всё больше возрастает спрос на каротиноиды, полученные из природного сырья, так как каротиноиды, синтезированные химическим путём, могут негативно влиять на организм животного (Колпакова В.В. и др., 2022). Пигменты, полученные в результате химического синтеза, строго нормируют, поэтому биологические источники каротиноидов являются более приоритетными. Микробиологические процессы с использованием природных субстратов в качестве источников углеводов не зависят от географических и сезонных колебаний, что может быть экономически выгодно (Frengova GI et al., 2006).

В настоящее время широко в практике используют штаммы каротинсинтезирующих дрожжей *Rhodospiridium diobovatum*. Другим примером продуцентов каротиноидов являются микроводоросли рода *Danuliella*, способные накапливать в клетках от 57 до 69 % лютеина, 20 % каротина, 11-24 % ксантофиллов, *Spirulina platensis* содержит до 1700 мг/кг каротиноидов. Водоросль *Danuliella salina* используют в рационах сельскохозяйственных животных и птицы в качестве провитамина А (Dura MA et al., 2004).

Каротиногенные дрожжи считаются повсеместными из-за их распространения по всему миру в наземных, пресноводных и морских средах обитания и их способности колонизировать большое разнообразие субстратов. Наиболее известными представителями каротинсинтезирующих дрожжей являются *Phaffia rhodozyma*, *Rhodotorula*, *Rhodospiridium*, *Sporidiobolus*, *Sporobolomyces*, *Cystofilobasidium*, *Kockovaella*, *Phaffia*. Они применяются при промышленном производстве каротиноидов благодаря своей относительно высокой скорости роста (Buzzini P et al., 2007; Korumilli T and Susmita M, 2014; Moline M et al., 2010; Tang W et al., 2019), также они являются продуцентами липидов и эссенциальных жирных кислот (Колпакова В.В. и др., 2022).

В ряде исследований (Perrier V et al., 1995; Tinoi J et al., 2005; Aksu Z and Eren AT, 2007) описывали производство каротиноидов дрожжами, такими как *Rhodotorula spp.* Эти дрожжи синтезируют  $\beta$ -каротин, торулен и торулародин в различных концентрациях. Количество каротиноидов, продуцируемых этим видом, может быть низким (менее 100 мкг г<sup>-1</sup>), средним (от 101 до 505 мкг г<sup>-1</sup>) и высоким (более 500 мкг г<sup>-1</sup>), как сообщают другие авторы (Davoli P et al., 2004; Kobayashi M et al., 1991; Sarada R et al., 2002). *Rhodotorula* – род эукариотических микроорганизмов семейства *Sporidiobolaceae* (порядок *Sporidiales*, класс *Pucciniomycetes*, тип *Basidiomycota*), который широко встречается в животных, растениях, реках, озерах и океанах (Cudowski A and Pietryczuk A, 2009; Daudu R et al., 2020; Falces-Romero I et al., 2018). Клетки *Rhodotorula* содержат белки, полисахариды, аминокислоты, полиненасыщенные жирные кислоты, витамин Е, нуклеотиды и астаксантин (Gupta A et al., 2012).

Каротиноиды представляют собой природные жирорастворимые пигменты, большинство из которых являются терпеноидами с 40 атомами углерода, которые содержат две концевые кольцевые системы, соединённые цепочкой сопряжённых двойных связей или полиеновой системой, которые действуют как мембранозащитные антиоксиданты, поглощающие O<sub>2</sub> и пероксильные радикалы; их антиоксидантная способность, возможно, обусловлена их структурой (Britton G and Hornero-Mendez D, 1997). Эти пигменты сгруппированы в каротины и ксантофиллы. Некоторые каротины по своей химической структуре содержат только углерод и водород, такие как  $\beta$ -каротин и торулен; в то время как ксантофиллы также содержат кислород, такие как астаксантин и кантаксантин (Bhosale P and Gadre RV, 2001).

Из каротиноидов, основными являются:  $\alpha$ -каротин (Дейнека В.И. и др., 2008; Besarab NV et al., 2018; Frengova GI et al., 2004),  $\beta$ -каротин (предшественник витамина А) (Банницына Т.Е. и др., 2016; Mata-Gomez LC et al., 2014; Mihalcea A et al., 2011),  $\gamma$ -каротин (Даволи П. и др., 2004; Buzzini P, 2001; de C. Cardoso LA et al., 2017; Kot AM et al., 2016), торулен (Червякова О.П. и Караулова С.С., 2009; El-Banna AAE-R et al., 2012; Kanzy HM et al., 2015), торулародин (Buzzini P, 2001; Mata-Gomez LC et al., 2014; Mihalcea A et al., 2011; Somashekar D and Joseph R, 2000), астаксантин (Дейнека В.И. и др., 2008; Захаров З.В. и др., 2012; Ferrao M and Garg S, 2011), лютеин (Дейнека В.И. и др., 2008; Завьялова А.Н. и Суржик А.В., 2008; Chen G et al., 2017; Latha BV et al., 2005), зеаксантин (Кирица Е., 2017; de C. Cardoso LA et al., 2017), ликопин (Кирица Е., 2017; Besarab NV et al., 2018; Kot AM et al., 2016), фитоин (Кирица Е., 2017; Червякова О.П. и Караулова С.С., 2009; Kot AM et al., 2016),  $\beta$ -криптоксантин (de C. Cardoso LA et al., 2017; Frengova GI et al., 2004; Kot AM et al., 2016), виолоксантин, флавоксантин (Kot AM et al., 2016), нейроспорин (Кирица Е., 2017; Червякова О.П. и Караулова С.С., 2009).

Высокие концентрации каротиноидов могут нейтрализовать воздействие свободных радикалов, высвобождающихся во время ранних воспалительных реакций, атакующих бактериальные мембраны. Фагоциты, такие как нейтрофильные гранулоциты и макрофаги, являются частью врождённой иммунной системы, нацеливаясь на патогенные микроорганизмы и уничтожая их. Вместе с оксидом азота (NO), который индуцируется цитокиноиндуцируемой NO-синтазой (iNOS или NOS<sub>2</sub>), как АФК, так и активные формы азота (RNS) являются важными медиаторами бактерицидной активности фагоцитов (Kim J and DellaPenna D, 2006; McGraw KJ et al., 2003; Pasarin D and Rovinaru C, 2018).

В результате обзора литературы было выявлено, что дрожжи *Rhodotorula spp.* являются одним из основных представителей, используемых при биотехнологическом производстве каротиноидов. Они способны накапливать от 93,9 мкг/г сухой массы до 16,9 г/л.

Выработка каротиноидов зависит от различий между штаммами одного и того же вида и от условий культивирования. В результате ряда научных исследований было доказано, что условия

культивирования, источники углерода и азота, влияют на каротиноидный профиль дрожжей (Rucker RB et al., 2001; Costa I et al., 1987) (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение выработки каротиноидов видами *Rhodotorula spp*, культивируемыми на различных субстратах-отходах  
Table 1. Comparison of carotenoid production by *Rhodotorula spp* species cultivated on various waste substrates

Вид <i>Rhodotorula</i> / <i>Rhodotorula species</i>	Источник углерода / <i>Carbon source</i>	Концентрация биомассы (г/л) / <i>Bio-mass concentration (g/l)</i>	Каротин (мг/г высушенная биомасса) / <i>Carotene (mg/g dried bio-mass)</i>	Каротин (мг/л биомасса) / <i>Carotene (mg/l bio-mass)</i>	Литература / <i>References</i>
<i>R. glutinis</i>	Дрожжевой экстракт / <i>Yeast extract</i>	8,12	8,20	66,32	Marova I et al., 2011
<i>R. glutinis</i>	Полужидкая среда+ ферменты / <i>Semi-liquid+ enzymes</i>	11,68	3,60	40,10	Marova I et al., 2010
<i>R. glutinis</i> ATCC 26085	Глюкоза / <i>Glucose</i>				Davoli P et al., 2004
<i>R. glutinis</i> 32	Глюкоза / <i>Glucose</i>	23,90	5,40	129,00	Bhosale P and Gadre RV, 2001
<i>R. glutinis</i> 32	Патока из сахарного тростника / <i>Sugar-cane Molasses</i>	78,00	2,36	183,00	Bhosale P and Gadre RV, 2001
<i>R. glutinis</i> DBVPG 3853 <i>D. castellii</i> DBVPG 3503	Кукурузный сироп / <i>Corn syrup</i>	15,30	0,54	8,20	Buzzini P, 2001
<i>R. glutinis</i> TISTR	Мука из гидролизированных отходов бобов / <i>Flour from hydrolyzed bean waste</i>	10,35	0,35	3,48	Tinoi J et al., 2005
<i>R. glutinis</i> 22P <i>L. helveticus</i> 12A	Ультрафильтрат молочной сыворотки / <i>Whey ultrafiltrate</i>	30,20	0,27	8,10	Frengova GI and Beshkova DM, 2009
<i>R. mucilaginosa</i> NRRL-2502	Патока из сахарной свёклы / <i>Sugar beet molasses</i>	4,20	21,20	89,0	Aksu Z and Eren AT, 2005
<i>R. mucilaginosa</i> NRRR-2502	Сыворотка / <i>Whey</i>	2,40	29,20	70,0	Aksu Z and Eren AT, 2005

Chen G с соавторами (2017) в своих исследованиях пришёл к выводу, что наилучшими условиями для большего выхода продукции каротиноидов *R. Mucilaginosa* были следующие: тем-

пература культивирования +30 °С, время культивирования – 60 ч, значение pH среды – 6, плотность инокулята – 6 %, скорость встряхивания – 180 об./мин во время культивирования и объём жидкости среды – 60 мл /250 мл. В этих условиях выработка каротиноидов достигла 1,3658 г/л, а биомасса – 8,6530 г/л, что на 85,8 и 66,8 % выше, чем до оптимизации соответственно, что свидетельствует о том, что *R. Mucilaginosa* ZTHY2 является штаммом, продуцирующим каротиноиды.

Установлено, что кормовая добавка с клеточной массой *Rhodotorula* безопасна и нетоксична для животных. Её использование в питании кур-несушек также задокументировано (El-Banna AAE-R et al., 2012).

Другие исследования с участием каротиносодержащих дрожжей рода *Rhodotorula* показали, что штаммы оказывают влияние на эффект питания организма животных, иммунную и антиоксидантную функции, а также имеет широкую рыночную перспективу и экономически выгоден в качестве препарата пробиотиков (Guo J et al., 2020).

Например, пробиотик *Rhodotorula benthica* выделяет астаксантин, который является источником витамина А у животных и эффективно удаляет свободные радикалы в организме больше, чем витамин Е (Elwan HAM et al., 2019; Wang L et al., 2018). Согласно исследованиям, имеет преимущества для домашнего скота, заключающиеся в улучшении потребления корма, среднесуточного привеса, коэффициента конверсии корма у поросят-сосунов и у ягнят на откорме (Dávila-Ramírez JL et al., 2020; Haddad SG and Goussous SN, 2005; Lei Y and Kim I H, 2014; Song B et al., 2021). Эти преимущества по усвояемости питательных веществ происходят за счёт содержащегося в дрожжевой клетке маннан-олигосахарида (компонента дрожжей), что улучшает морфологию тонкой кишки за счёт увеличения количества бокаловидных клеток и увеличения высоты ворсинок подвздошной кишки (Ayiku S et al., 2020).

В исследованиях Ge Ye с соавторами (2021) использовали штамм *Rhodotorula mucilaginosa*, выделенный из прибрежных вод Южно-Китайского моря, в качестве дрожжей-мишеней для изучения его влияния на иммунную функцию и кишечную микробиоту мышей. Результаты этих исследований показали, что *Rhodotorula mucilaginosa* ZTHY2 может повышать показатели тимуса и селезёнки мышей, также повышать уровень сывороточных IgG, IgA. Длительное (30 дней) введение через зонд *Rhodotorula mucilaginosa* значительно усиливала фагоцитоз макрофагов у мышей и значительно повышала уровень TNF- $\alpha$  и INF- $\gamma$  в сыворотке крови. *Rhodotorula mucilaginosa* ZTHY2 изменил структуру кишечной микробиоты мышей на уровне типа и рода, что привело к увеличению относительной численности *Firmicutes* и *Lactobacillus* и снижению относительной численности *Bacteroidetes*.

Ряд других учёных из Китая в своих исследованиях доказали успешное применение морских дрожжей родов *Rhodotorula benthica* в качестве кормовой пробиотической добавки для гидробионтов (Wang J et al., 2015).

Обнаружено, что сульфатированный маннан фракции внеклеточных полисахаридов *Rhodotorula rubra* снижает уровень холестерина и триглицеридов в крови, препятствует перекисному окислению, что может использоваться для профилактики и лечения атеросклероза (Савчик А.В. и Новик Г.И., 2020).

Coutinho JOPA с соавторами (2022) оценивала пробиотический потенциал *Rhodotorula mucilaginosa* UFMGCB 18,377 при лечении мышей в случае заболевания мукозитом. Штамм смог уменьшить клинические признаки заболевания, такие как уменьшение потребления пищи и потеря массы тела, а также уменьшил количество энтеробактерий в кишечнике и укоротил длину кишечника. Кроме того, лечение смогло снизить воспалительные инфильтраты, а также гистопатологические поражения, характерные для мукозита в тощей и подвздошной кишке.

Также использование в качестве добавки твёрдофазный продукт ферментации *Rhodotorula mucilaginosa* улучшило качество яиц и микрофлору кишечника кур (Sun J et al., 2020).

Sripthutha C с соавторами (2023) в своих исследованиях оценивали влияние различных уровней *Rhodotorula paludigena* CM33 (RD), включённых в диетическую композицию, в количестве 0 % (контроль), 1 % (1 % RD), 2 % (2 % RD) и 5 % (5 % RD) на рост креветок (*Litopenaeus*

*vannatei*), экспрессию их генов, связанных с иммунитетом, здоровье кишечника, устойчивость к вибрионам. паразитическая инфекция (VPAHPND) и состав мяса. Результаты показали значительное улучшение удельной скорости роста, прибавки в весе и выживаемости креветок. Введение 5 %-ной дозы в группе RD привело к снижению совокупной смертности при заражении VPAHPND по сравнению с контрольной группой. Кроме того, уровни экспрессии иммуночувствительных генов, включая систему pgoPO (профенолоксидаза-2: PO2), антиоксидантный фермент, путь JAK/STAT (преобразователь сигнала и активатор транскрипции: STAT, индуцируемая гамма-интерфероном лизосомальная тиолредуктаза: GILT), путь IMD и гены пути Toll (лизоцим) были повышены в 5 %-й группе. В контексте микробиоты анализ микробиома показал, что основными типами в кишечнике креветок были протеобактерии, *Firmicutes*, *Bacteroidota*, *Campilobacterota*, *Actinobacteriota* и *Verrucomicrobiota*. На уровне рода было обнаружено снижение количества вибрионов в 5 %-й группе, в то время как количество потенциально полезных бактерий *Bifidobacterium* было увеличено. В группе 5 % RD наблюдалось значительное повышение уровня сырого протеина и сырых липидов, которые являются важными питательными компонентами.

Somboonchai TC с соавторами (2022) в исследованиях определяли влияние замены соевого шрота (SBM) отходами тофу, ферментированными красными дрожжами (RYFTO), на потребление корма, показатели роста, характеристики туш и качество мяса у мясного скота брахмановской помеси. Результаты показали, что крупный рогатый скот, получавший рацион с заменой соевого шрота на отходы тофу, ферментированными красными дрожжами (группы с заменой 50 % и 100 %) влияют на потребление грубых кормов, общее потребление сухого вещества и ADG (среднесуточный привес) ( $P < 0,05$ ), за исключением переваримости и FCR (коэффициент конверсии корма) ( $P > 0,05$ ). Затраты на грубые корма, концентрат и общая стоимость корма были самыми низкими в группе, получавшей отходы тофу, ферментированными красными дрожжами 100 % по сравнению с контролем ( $P < 0,05$ ). Содержание азота мочевины в крови крупного рогатого скота, получавшего 100 % отходы тофу, ферментированными красными дрожжами, уменьшалось по сравнению с контролем и отходы тофу, ферментированными красными дрожжами 50 % ( $P < 0,05$ ). Однако характеристики тушек и качество мяса были одинаковыми при разных обработках ( $P > 0,05$ ). Таким образом, отходы тофу, ферментированными красными дрожжами, можно использовать в качестве источника белка для частичной замены соевого шрота в рационе из концентрата на 50 %, что может снизить стоимость корма. Это исследование показало, что дальнейшие эксперименты следует проводить в течение более длительного периода, чтобы оценить преимущества каротина, содержащегося в красных дрожжах, для качества тушек и мяса.

В других исследованиях Ogtanee S с соавторами (2022) оценивали эффективность красных дрожжей в качестве нового связывающего микотоксина у бройлеров. Диетические обработки включали три уровня рационов, загрязнённых микотоксинами (0 мкг кг<sup>-1</sup> (0 % микотоксина; MT)), 50 мкг кг<sup>-1</sup> (50 % MT) и 100 мкг кг<sup>-1</sup> (100 % MT) и четыре уровня микотоксиновых связующих (0,0 и 0,5 г кг<sup>-1</sup> коммерческого связующего и 0,5 и 1,0 г кг<sup>-1</sup> суточной нормы). Результаты показали, что рационы, загрязнённые микотоксинами, снижали среднесуточный прирост массы тела (ADG), высоту ворсинок (VH) и высоту ворсинок в зависимости от соотношения глубины крипт (VH:CD) кишечника, а также популяцию *Lactobacillus spp.* и *Bifidobacterium spp.* в слепой кишке ( $P < 0,05$ ), в то время как они увеличивали концентрацию микотоксинов в образцах крови и клеток апоптоза (TUNEL положительных) в ткани печени ( $P < 0,01$ ) цыплят-бройлеров. При добавлении красных дрожжей в рацион имели лучшие значения прироста массы тела и более низкие показатели смертности цыплят ( $P < 0,05$ ). Во время испытания на микотоксины бройлеры, которых кормили коммерческим микотоксиновым связующим и красными дрожжами, значительно улучшили свои показатели, относительную массу органов и состояние кишечника после 28 дней кормления. Рацион с 0,5 и 1,0 г/кг<sup>-1</sup> красных дрожжей был признан наиболее эффективным для повышения продуктивных качеств и снижения воздействия микотоксинов на бройлеров.

Красные дрожжи *P. rhodozyma* в настоящее время используют для производства астаксантина, который может применяться в аквакультуре для придания привлекательного розового цвета



мякоти лососевых рыб, выращиваемых на фермах, а также помогает достичь желаемый золотистый цвет яичному желтку и мякоти птицы (Meyer SP, 1994).

Однако имеется мало сообщений о специфическом механизме действия красных дрожжей на кишечную флору животных, и для того чтобы использование этих дрожжей стало широко распространённым в животноводстве, необходимо провести дополнительные исследования и разработать оптимальные способы их использования. В целом использование живых дрожжей *Rhodotorula spp.* может иметь положительный эффект на здоровье и качество продуктов животного происхождения, а также помочь в решении проблемы утилизации отходов животноводства.

Затруднённое поглощение каротиноидов из-за толстой клеточной стенки дрожжей ограничивало промышленное применение *Rhodotorula* (An GH et al., 2006; Bhosale P et al., 2003; Fang TJ and Wang JM, 2002). В современной биотехнологической промышленности разработаны различные средства выделения пигмента дрожжами, включая оптимизацию условий сушки, механическое разрушение, микроволновую обработку и ферментативную обработку (Frengova GI et al., 2006; Han JY, 2003; Storebakken T et al., 2004).

#### **Заключение.**

Таким образом, использование живых каротинсинтезирующих дрожжей рода *Rhodotorula* в животноводстве может стать новым направлением в производстве качественных продуктов животного происхождения. Следует отметить, что каротинсинтезирующие дрожжи усиливают иммунный ответ, повышают продуктивность животных, являются отличными антиоксидантами, а также имеет широкую рыночную перспективу и экономически выгодны в качестве препаратов для пробиотиков. Однако, для того чтобы использование этих дрожжей стало широко распространённым в сельском хозяйстве, необходимо провести дополнительные исследования и разработать оптимальные способы их использования.

#### **Список источников**

1. Даволи П., Мирау В.А., Вебер Р.В.С. Каротиноиды и жирные кислоты в красных дрожжах *Sporobolomyces roseus* и *Rhodotorula glutinis* // Прикладная биохимия и микробиология. 2004. Т. 40. № 4. С. 460-465. [Davoli P, Mierau VA, Weber RWS. Carotenoids and fatty acids in red yeast *Sporobolomyces roseus* and *Rhodotorula glutinis*. Applied Biochemistry and Microbiology. 2004;40(4):460-465. (In Russ.)].
2. Дрожжи в современной биотехнологии / Т.Е. Банницына, А.В. Канарский, А.В. Щербakov, В.К. Чеботарь, Е.И. Кипрушкина // Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 24-29. [Bannizina TE, Kanarskii AV, Shcherbakov AV, Chebotar VK, Kiprushkina EI. Yeasts in modern biotechnology. Journal of International Academy of Refrigeration. 2016;1:24-29. (In Russ.)]. doi: 10.21047/1606-4313-2016-16-1-24-29
3. Завьялова А.Н., Суржик А.В. Физиологическая роль природных каротиноидов // Вопросы современной педиатрии. 2008. Т. 7. № 6. С.145-149. [Zavyalova AN, Surzhik AV. Physiological role of natural carotenoids. Current Pediatrics (Moscow). 2008;7(6):145-149. (In Russ.)].
4. Изучение биологической безопасности дрожжей рода *Candida* как потенциального источника кормового белка / Е.Н. Колодина, О.А. Артемьева, Е.Н. Котковская, О.В. Павлюченкова, Д.А. Переселкова // Вестник ОрелГАУ. 2016. Т. 5. № 62. С. 72-78. [Kolodina EN, Artemyeva OA, Kotkovskaya EN, Pavlyuchenkova OV, Pereselkova DA. Study of biological safety yeasts of the genus *Candida* as a potential source of feed protein. Vestnik OrelGAU. 2016;5(62):72-78. (In Russ.)]. doi: 10.15217/48484
5. Использование пробиотиков и растительных экстрактов для улучшения продуктивности жвачных животных (обзор) / Г.К. Дускаев, Г.И. Левахин, В.Л. Королёв, Ф.Х. Сиразетдинов // Животноводство и кормопроизводство. 2019. Т. 102. № 1. С. 136-148. [Duskaev GK, Levakhin GI, Korolyov VL, Sirazetdinov FK. Use of probiotics and plant extracts to improve the productivity

of ruminants (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(1):136-148. (*In Russ.*). doi: 10.33284/2658-3135-102-1-136

6. Использование экологически безопасного микромицета рода *Rhodotorula* для получения кормового каротинсодержащего концентрата / В.В. Колпакова и др. // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. № 4(65). С. 61-78. [Kolpakova VV, et al. Use of environmentally safe micromycetes of the genus *Rhodotorula* to obtain fodder carotene containing concentrate. South of Russia: Ecology, Development. 2022;17:4(65):61-78. (*In Russ.*). doi: 10.18470/1992-1098-2022-4-61-78

7. Каротиноиды: строение, биологические функции и перспективы применения / В.И. Дейнека, А.А. Шапошников, Л.А. Дейнека, Т.С. Гусева, С.М. Вострикова, Е.А. Шенцева, Л.Р. Закирова // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Медицина. Фармация. 2008. № 6(46). С.19-25. [Deyneka VI, Shaposhnikov AA, Deyneka LA, Guseva TS, Vostrikova SM, Shentseva EA, Zakirova LR. Carotenoids: the structure, biological functions and perspectives of application. Belgorod State University Scientific Bulletin. Medicine. Pharmacy. 2008;6(46):19-25. (*In Russ.*)].

8. Кирица Е. Влияние растительных экстрактов на процесс биосинтеза каротиноидов дрожжами // Вестник АПК Верхневолжья. 2017. № 3(39). С. 54-58. [Kiritsa E. Effect of plant extracts on the process of carotenoid biosynthesis by yeasts. Herald of Agroindustrial complex of Upper Volga region. 2017;3(39):54-58. (*In Russ.*)].

9. Культивирование дрожжей *Phaffia rhodozyma* при постоянном и периодическом освещении / З.В. Захаров, Л.С. Герман, О.А. Петрищева, М.Ю. Жарко // Известия МГТУ «МАМИ», 2012. Т.4. № 2(14). С.86-89. [Zakharov ZV, German LS, Petrisheva OA, Zharko MY. The cultivation of the yeast *Phaffia rhodozyma* with constant or periodic light. Izvestiya MSTU "MAMI". 2012;4:2(14):86-89. (*In Russ.*)].

10. Мошкина С.В., Химичева С.Н. Влияние кормовой добавки Актив Ист на продуктивные качества ремонтного молодняка молочного скота // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 3. С. 153-164. [Moshkina SV, Khimicheva SN. Influence of Active East feed additive on productive qualities of young dairy replacement cattle. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(3):153-164. (*In Russ.*). doi: 10.33284/2658-3135-103-3-153

11. Савчик А.В., Новик Г.И. Каротиноидсинтезирующие дрожжевые грибы и их применение в биотехнологии (обзор литературы) // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2020. Т. 13. № 3(49). С. 70-83. [Savchik AV, Novik GI. Carotene-producing yeast-like fungi and their application in biotechnologiaia survey. *Food Industry: Science And Technologies*. 2020;13:3(49):70-83. (*In Russ.*)].

12. Червякова О.П., Караулова С.С. Исследование каротиногенеза дрожжами *Rhodotorula rubra* // Успехи в химии и химической технологии. 2009. Т. 13. № 10(103). С. 117-120. [Chervyakova OP, Karaulova SS. Investigation of carotenogenesis by yeast *Rhodotorula rubra*. *Uspеhi v himii i himicheskoy tehnologii*. 2009;13(103):117-120. (*In Russ.*)].

13. Aksu Z, Eren AT. Carotenoids production by the yeast *Rhodotorula mucilaginosa*: Use of agriculture wastes as a carbon source. *Process Biochemistry*. 2005;40(9):2985-2991. doi: 10.1016/j.procbio.2005.01.011

14. Aksu Z, Eren AT. Production of carotenoids by the isolated yeast of *Rhodotorula glutinis*. *Biochem Eng J*. 2007;35(2):107-113. doi: 10.1016/j.bej.2007.01.004

15. An GH, Song JY, Kwak WK, Lee BD, Song KB, Choi JE. Improved astaxanthin availability due to drying and rupturing of the red yeast, *Xanthophyllomyces dendrorhous*. *Food Sci Biotechnol*. 2006;15(4):506-510.

16. Ayiku S, Shen JF, Tan BP, Dong XH, Liu HY. Effects of dietary yeast culture on shrimp growth, immune response, intestinal health and disease resistance against *Vibrio harveyi*. *Fish Shellfish Immun*. 2020;102:286-295. doi: 10.1016/j.fsi.2020.04.036

17. Bach A, Iglesias C, Devant M. Daily rumen pH pattern of loose-housed dairy cattle as affected by feeding pattern and live yeast supplementation. *Animal Feed Science and Technology*. 2007;136(1-2):146-153. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2006.09.011
18. Besarab NV, Gerasimovich K, Kanterova AV, Novik GI. Biosynthetic production of carotenoids using yeast strains of genus *Rhodotorula* on the cheap beer wort substrate. *Journal of Microbiology, Biotechnology And Food Sciences*. 2018;7(4):383-386. doi: 10.15414/jmbfs.2018.7.383-386
19. Bhosale P, Gadre RV. Production of  $\beta$ -carotene by a mutant of *Rhodotorula glutinis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2001;55(4):423-427. doi: 10.1007/s002530000570
20. Bhosale P, Jogdand VV, Gadre RV. Stability of  $\beta$ -carotene in spray dried preparation of *Rhodotorula glutinis* mutant 32. *J Appl Microbiol*. 2003;95(3):584-590. doi: 10.1046/j.1365-2672.2003.02018.x
21. Britton G, Hornero-Méndez D. Carotenoids and colour in fruit and vegetables. In: Tomás-Barberán FA, Robins RJ, editors. *Phytochemistry of fruit and vegetables*. England, Oxford: Clarendon Press; 1997;11-28.
22. Buzzini P, Innocenti M, Turchetti B, Libkind D, et al. Carotenoid profiles of yeasts belonging to the genera *Rhodotorula*, *Rhodospiridium*, *Sporobolomyces* and *Sporidiobolus*. *Canadian Journal of Microbiology*. 2007;53(8):1024-1031. doi: 10.1139/W07-068
23. Buzzini P, Vaughn-Martini A. Yeast biodiversity and biotechnology. In: Péter G, Rosa C, editors. *Biodiversity and Ecophysiology of Yeasts. The Yeast Handbook*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2006:533-559. doi: 10.1007/3-540-30985-3\_22
24. Buzzini P. Batch and fed-batch carotenoid production by *Rhodotorula glutinis*-*Debaryomyces castellii* co-cultures in corn syrup. *Journal of Applied Microbiology*. 2001;90(5):843-847. doi: 10.1046/j.1365-2672.2001.01319.x
25. Callaway ES, Martin SA. Effects of a *Saccharomyces cerevisiae* culture on ruminal bacteria that utilize lactate and digest cellulose. *Journal of Dairy Science*. 1997;80(9):2035-2044. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(97)76148-4
26. Chaucheyras-Durand F, Walker ND, Bach A. Effects of active dry yeasts on the rumen microbial ecosystem: Past, present and future. *Animal Feed Science and Technology*. 2008;145(1-4):5-26. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2007.04.019
27. Chen G, Wang J, Su Y, Zhu Y, Zhang G, Zhao H, et al. Pullulan production from synthetic medium by a new mutant of *Aureobasidium pullulans*. *Prep Biochem Biotechnol*. 2017;47(10):963-969. doi: 10.1080/10826068.2017.1350979
28. Corona L, Mendoza GD, Castrejón FA, Crosby MM, Cobos MA. Evaluation of two yeast cultures (*Saccharomyces cerevisiae*) on ruminal fermentation and digestion in sheep fed a corn stover diet. *Small Ruminant Research*. 1999;31(3):209-214. doi: 10.1016/S0921-4488(98)00146-1
29. Costa I, Martelli HL, De Silva IM, Pomeroy D. Production of  $\beta$ -carotene by *Rhodotorula* Strain. *Biotech Lett*. 1987;9(5):373-375. doi: 10.1007/BF01025808
30. Coutinho JOPA, Quintanilha MF, Campos MRA, et al. Antarctic Strain of *Rhodotorula mucilaginosa* UFMGCB 18,377 Attenuates Mucositis Induced by 5-Fluorouracil in Mice. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. 2022;14:486-500. doi: 10.1007/s12602-021-09817-0
31. Cudowski A, Pietryczuk A. Biochemical response of *Rhodotorula mucilaginosa* and *Cladosporium herbarum* isolated from aquatic environment on iron (III) ions. *Sci Rep*. 2009;9:19492. doi: 10.1038/s41598-019-56088-5
32. Daudu R, Parker CW, Singh NK, Wood JM, Debieu M, O'hara NB et al. Draft genome sequences of *Rhodotorula mucilaginosa* strains isolated from the international space station. *Microbiol Resour Announc*. 2020;9:00570-20. doi: 10.1128/MRA.00570-20
33. Dávila-Ramírez JL, Carvajal-Nolazco MR, López-Millanes MJ, González-Ríos H, Celaya-Michel H, Sosa-Castañeda J, et al. Effect of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation on growth performance, blood metabolites, carcass traits, quality, and sensorial traits of meat from pigs under heat stress. *J Anim Feed Sci*. 2020;267:114573. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2020.114573

34. Davoli P, Mierau V, Weber RWS. Carotenoids and fatty acids in red yeasts *Sporobolomyces roseus* and *Rhodotorula glutinis*. *Appl Biochem Microbiol*. 2004;40:392-397. doi: 10.1023/B:ABIM.0000033917.57177.f2
35. de C. Cardoso LA, Kanno KYF, Karp SG. Microbial production of carotenoids — A review. *African Journal of Biotechnology*. 2017;16(4):139-146. doi: 10.5897/AJB2016.15763
36. Denev SA, Peeva T, Radulova P, Stancheva P, Staykova G, Beev G, et al. Yeast cultures in ruminant nutrition. *Bulg J Agric Sci*. 2007;13:357-74.
37. Durá MA, Flores M, Toldrá F. Effect of *Debaryomyces* spp. on the proteolysis of dry-fermented sausages. *Meat Science*. 2004;68(2):319-328. doi: 10.1016/j.meatsci.2004.03.015
38. Durand-Chaucheyras F, Fonty G, Bertin G, Théveniot M, Gouet P. Fate of Levucell® SC I-1077 yeast additive during digestive transit in lambs. *Reproduction Nutrition Development*. 1998;38(3):275-280. doi: 10.1051/rnd:19980307
39. El-Banna AAE-R, El-Razek AMA, El-Mahdy AR. Isolation, Identification and Screening of Carotenoid-Producing Strains of *Rhodotorula glutinis*. *Food and Nutrition Sci*. 2012;3(5):627-633. doi: 10.4236/fns.2012.35086
40. El-Banna Amr A, Amal M Abd El-Razek, El-Mahdy AR. Some factors affecting the production of carotenoids by *Rhodotorula glutinis* var. *Glutinis*. *Food and Nutrition Sciences*. 2012;3:64-71. doi: 10.4236/fns.2012.31011
41. Elwan HAM, Elnesr SS, Abdallah Y, Hamdy A, El-Bogdady AH. Red yeast (*Phaffia rhodozyma*) as a source of astaxanthin and its impacts on productive performance and physiological responses of poultry. *World Poultry Sci J*. 2019;75(2):273-284. doi:10.1017/S0043933919000187
42. Falces-Romero I, Cendejas-Bueno E, Romero-Gomez MP, Garcia-Rodriguez J. Isolation of *Rhodotorula mucilaginosa* from blood cultures in a tertiary care hospital. *Mycoses*. 2018;61(1):35-39. doi: 10.1111/myc.12703
43. Fang TJ, Wang JM. Extractability of astaxanthin in a mixed culture of a carotenoid over-producing mutant of *Xanthophyllomyces dendrorhous* and *Bacillus circulans* in two-stage batch fermentation. *Process Biochem*. 2002;37(11):1235-1245. doi: 10.1016/S0032-9592(02)00011-0
44. Ferrao M, Garg S. Studies on effect of media components on growth and  $\beta$ -carotene production by *Rhodotorula graminis* RC04. *Journal of Cell and Tissue Research*. 2011;11(1):2551-2556.
45. Fomenky BE, Bissonnette N, Talbo G et al. Impact of *Saccharomyces cerevisiae* boulardii CNCMI-1079 and *Lactobacillus acidophilus* BT1386 on total lactobacilli population in the gastrointestinal tract and colon histomorphology of Holstein dairy calves. *Animal Feed Science and Technology*. 2017;234:151-161. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2017.08.019
46. Fonty G, Chaucheyras-Durand F. Effects and modes of action of live yeasts in the rumen. *Biologia*. 2006;61:741-50. doi: 10.2478/s11756-006-0151-4
47. Frengova G, Simova E, Beshkova D. Caroteno-protein and exopolysaccharide production by co-cultures of *Rhodotorula glutinis* and *Lactobacillus helveticus*. *J Ind Microbiol Biotechnol*. 1997;18:272-277. doi: 10.1038/sj.jim.2900379
48. Frengova GI, Beshkova DM. Carotenoids from *Rhodotorula* and *Phaffia*: yeasts of biotechnological importance. *J Ind Microbiol Biotechnol*. 2009;36(2):163-80. doi: 10.1007/s10295-008-0492-9
49. Frengova GI, Simova ED, Beshkova DM. Improvement of carotenoid-synthesizing yeast *Rhodotorula rubra* by chemical mutagenesis. *Zeitschrift fur Naturforschung C*. 2004;59(1-2):99-103. doi: 10.1515/znc-2004-1-220
50. Frengova GI, Simova ED, Beshkova DM.  $\beta$ -Carotene rich carotenoid-protein preparation and exopolysaccharide production by *Rhodotorula rubra* GED8 grown with a yogurt starter culture. *Z Naturforsch C*. 2006;61(7-8):571-577. doi: 10.1515/znc-2006-7-817
51. Galvão KN et al. Effect of feeding live yeast products to calves with failure of passive transfer on performance and patterns of antibiotic resistance in fecal *Escherichia coli*. *Reproduction Nutrition Development*. 2005;45(4):427-440. doi: 10.1051/rnd:2005040

52. Ge Ye, Kaisen H, Weitian X, Chunhou X, Qiucheng Y, Ying L. Effects of *Rhodotorula mucilaginosa* on the Immune Function and Gut Microbiota of Mice. *Front Fungal Biol.* 2021;2:705696. doi: 10.3389/ffunb.2021.705696
53. Guo J, Chen S, Feng Y, Guo Z, Wu D, Xing C et al. Effects of feeding *Rhodotorula mucilaginosa* on the growth properties in *Scorturm barcoo*. *Siliao Gongye.* 2020;41:44-49.
54. Gupta A, Vongsvivut J, Barrow CJ, Puri M. Molecular identification of marine yeast and its spectroscopic analysis establishes unsaturated fatty acid accumulation. *J Biosci Bioeng.* 2012;114(4):411-417. doi: 10.1016/j.jbiosc.2012.05.013
55. Haddad SG, Goussous SN. Effect of yeast culture supplementation on nutrient intake, digestibility and growth performance of Awassi lambs. *Anim Feed Sci Tech.* 2005;118(3-4):343-348. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2004.10.003
56. Han JY, Lee SJ, Jung MK, Choi SK, Roh JS. Process for extracting astaxanthin pigment from yeast and extracted pigment thereof. US patent 2003/0087335 A1. 8 May 2003.
57. Jouany JP. A new look at yeast cultures as probiotics for ruminants. *Feed Mix.* 2001;9:17-19.
58. Kanzy HM et al. Optimization of carotenoids production by yeast strains of *Rhodotorula* using salted cheese whey. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences.* 2015;4(1):456-469.
59. Kaulmann A, Bohn T. Carotenoids, inflammation, and oxidative stress-implications of cellular signaling pathways and relation to chronic disease prevention. *Nutrition Research.* 2014;34(11):907-929. doi: 10.1016/j.nutres.2014.07.010
60. Kim J, DellaPenna D. Defining the primary route for lutein synthesis in plants: the role of *Arabidopsis* carotenoid beta-ring hydroxylase CYP97A3. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2006;103(9):3474-3479. doi: 10.1073/PNAS.0511207103
61. Kobayashi M, Kakizono T, Nagai S. Astaxanthin production by a green alga, *Haematococcus pluvialis* accompanied with morphological changes in acetate media. *J Ferm Bioeng.* 1991;71(5):335-339. doi: 10.1016/0922-338X(91)90346-I
62. Korumilli T, Susmita M. Carotenoid production by *Rhodotorula* sp. on fruit waste extract as a sole carbon source and optimization of key parameters. *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-International.* 2014;33(3-71):89-99. doi: 10.30492/IJCCE.2014.11344
63. Kot AM, Błażej S, Kurcz A, Gientka I, et al. *Rhodotorula glutinis* — potential source of lipids, carotenoids, and enzymes for use in industries. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2016;100(14):6103-6117. doi: 10.1007/s00253-016-7611-8
64. Lascano GL, Heinrichs AJ. Rumen fermentation pattern of dairy heifers fed restricted amounts of low, medium, and high concentrate diets without and with yeast culture. *Livestock Science.* 2009;124(1-3):48-57. doi: 10.1016/j.livsci.2008.12.007
65. Latha BV, Jeevaratnam K, Murali HS, Manja KS. Influence of growth factors on carotenoid pigmentation of *Rhodotorula glutinis* DFR-PDY from natural source. *Indian Journal of Biotechnology.* 2005;4(3):353-357.
66. Lei Y, Kim I H. Effect of *Phaffia rhodozyma* on performance, nutrient digestibility, blood characteristics, and meat quality in finishing pigs. *J Anim Sci.* 2014;92(1):171-176. doi: 10.2527/jas.2013-6749
67. Marova I, Certic M, Breierova E. Production of enriched biomass with carotenogenic yeast - Application of whole-cell yeast biomass to production of pigments and other lipid compounds. In: Matovic D, editor. *Biomass - detection, production and usage.* Intech. 2011:345-384. doi: <http://dx.doi.org/10.5772/19235>
68. Mata-Gómez LC, Montañez JC, Méndez-Zavala A, et al. Biotechnological production of carotenoids by yeast: an overview. *Microb Cell Fact.* 2014;13(1):12. doi: 10.1186/1475-2859-13-12
69. Matilde C, Lippolis A, Fava F, Rodolfi L, et al. *Microbes: Food for the Future.* *Foods.* 2021;10(5):971. doi: 10.3390/foods10050971

70. McGraw KJ, Beebee MD, Hill GE, Parker RS. Lutein-based plumage coloration in songbirds is a consequence of selective pigment incorporation into feathers. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol.* 2003;135(4):689-696. doi: 10.1016/s1096-4959(03)00164-7
71. Meyer SP. Developments in world aquaculture, formulations, and the role of carotenoids. *Pure Appl Chem.* 1994;66(5):1069-1076.
72. Mihalcea A, Ferdes M, Chirvase AA, Ungureanu C, et al. The influence of operating conditions on the growth of the yeast *Rhodotorula rubra* ICCF 209 and on torularhodin formation. *Rev Chim. (Bucharest).* 2011;62(6):659-665.
73. Moline M, Flores MR, Libkind D, del Carmen DM, Farias ME, van Broock M. Photoprotection by carotenoid pigments in the yeast *Rhodotorula mucilaginosa*: the role of torularhodin. *Photochemical & Photobiological Sciences.* 2010;9:1145-1151. doi: 10.1039/c0pp00009d
74. Nozierea P, Graulet B, Lucas A, Martin B, Grolier P, Doreau M. Carotenoids for ruminants: From forages to dairy products. *Animal Feed Sci Technol.* 2006;131(3-4):418-450. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2006.06.018
75. Ogunade IM, Lay J, Andries K, et al. Effects of live yeast on differential genetic and functional attributes of rumen microbiota in beef cattle. *J Animal Sci Biotechnol.* 2019;10:68. doi: 10.1186/s40104-019-0378-x
76. Orranee S, Moonmanee T, Lumsangkul C, Doan HV, et al. Can red yeast (*Sporidiobolus pararoseus*) be used as a novel feed additive for mycotoxin binders in broiler chickens? *Toxins.* 2022;14(10):678. doi:10.3390/toxins14100678
77. Pasarin D, Rovinaru C. Sources of carotenoids and their uses as animal feed additives- a review. *Scientific Papers. Series D. Animal Science.* 2018; LXI(2):74-85.
78. Patterson R, Rogiewicz AG, Kiarie E, Slominski BA. Yeast derivatives as a source of bioactive components in animal nutrition: A brief review. *Front Vet Sci.* 2023;9:2022. doi: 10.3389/fvets.2022.1067383
79. Perrier V, Dubreucq E, Galzy P. Fatty acid and carotenoid composition of *Rhodotorula* strains. *Arch Microbiol.* 1995;164(3):173-179. doi: 10.1007/BF02529968
80. Rucker RB, Suttie JW, McCormick DB, Machlin LJ, editors. *Handbook of Vitamins: 3rd ed.* New York: Marcel Dekker, Inc; 2001. 616 p.
81. Sarada R, Usha T, Ravishankar GA. Influence of stress on astaxanthin production in *Haematococcus pluvialis* grown under different culture conditions. *Process Biochem.* 2002;37(6):623-627. doi: 10.1016/S0032-9592(01)00246-1
82. Somashekar D, Joseph R. Inverse relationship between carotenoid and lipid formation in *Rhodotorula fragilis* according to the C/N ratio of the growth medium. *Word Journal of Microbiology & Biotechnology.* 2000;16:491-493. doi: 10.1023/A:1008917612616
83. Somboonchai T, Foiklang S, Panatuk J, et al. Replacement of soybean meal by red yeast fermented tofu waste on feed intake, growth performance, carcass characteristics, and meat quality in Thai Brahman crossbred beef cattle. *Trop Anim Health Prod.* 2022;54(2):133. doi: 10.1007/s11250-022-03127-5
84. Song B, Wu T, You P, Wang H, Burke JL, Kang K, et al. Dietary supplementation of yeast culture into pelleted total mixed rations improves the growth performance of fattening lambs. *Front Vet Sci.* 2021;8:657816. doi: 10.3389/fvets.2021.657816
85. Sporn MB, Dunlop NM, Newton DL, Smith JM. Prevention of chemical carcinogenesis by vitamin A and its synthetic analogs (retinoids). *Fed Proc.* 1976;35(6):1332-8.
86. Sriphuttha C, Limkul S, Pongsetkul J, Phiwthong T, Massu A, Sumniangyen N, Boontawan P, Ketudat-Cairns M, Boontawan A, Boonchuen P. Effect of fed dietary yeast (*Rhodotorula paludigena* CM33) on shrimp growth, gene expression, intestinal microbial, disease resistance, and meat composition of *Litopenaeus vannamei*. *Developmental and Comparative Immunology.* 2023;147:104896. doi: 10.1016/j.dci.2023.104896
87. Storebakken T, Sorensen M, Bjerkend B, Hiu S. Utilization of astaxanthin from red yeast, *Xanthophyllomyces dendrorhous*, in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*: effects of enzy-

matic cell wall disruption and feed extrusion temperature. *Aquaculture*. 2004;236(1-4):391-403. doi: 10.1016/j.aquaculture.2003.10.035

88. Sun J, Li M, Tang Z, Zhang X, Chen J, Sun Z. Effects of *Rhodotorula mucilaginosa* fermentation product on the laying performance, egg quality jejunal mucosal morphology and intestinal microbiota of hens. *J Appl Microbiol*. 2020;28 (1):54-64. doi: 10.1111/jam.14467

89. Tang W, Wang Y, Zhang J, Cai Y, He Z. Biosynthetic pathway of carotenoids in *Rhodotorula* and strategies for enhanced their production. *J Microbiol Biotechnol*. 2019;29(4):507-517. doi: 10.4014/jmb.1801.01022

90. Tinoi J, Rakariyatham N, Deming RL. Simplex optimization of carotenoid production by *Rhodotorula glutinis* using hydrolyzed mung bean waste flour as substrate. *Process Biochem*. 2005;40(7):2551-2557. doi: 10.1016/j.procbio.2004.11.005

91. Wang J, Zhao L, Liu J, Wang H, Xiao Sh. Effect of potential probiotic *Rhodotorula benthica* D30 on the growth performance, digestive enzyme activity and immunity in juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicas*. *Fish & Shellfish Immunology*. 2015;43(2):330-336. doi: 10.1016/j.fsi.2014.12.028

92. Wang L, Xie J, Wu W, Li B, Ou J. Excellent microbial cultivation for astaxanthin production and its extraction by *Rhodotorula benthica*. *Med Res*. 2018;2(4):180015. doi: 10.21127/yaoyimr20180015

93. Yang S-P, Wu Z-H, Jian J-Ch, Zhang X-Z. Effect of marine red yeast *Rhodospiridium paludigenum* on growth and antioxidant competence of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*. 2010;309(1-4):62-65. doi: 10.1016/j.aquaculture.2010.09.032

### References

1. Davoli P, Mierau VA, Weber RWS. Carotenoids and fatty acids in red yeast *Sporobolomyces roseus* and *Rhodotorula glutinis*. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2004;40(4):460-465.

2. Bannizina TE, Kanarskii AV, Shcherbakov AV, Chebotar VK, Kiprushkina EI. Yeasts in modern biotechnology. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2016;1:24-29. doi: 10.21047/1606-4313-2016-16-1-24-29

3. Zavyalova AN, Surzhik AV. Physiological role of natural carotinoids. *Current Pediatrics (Moscow)*. 2008;7(6):145-149.

4. Kolodina EN, Artemyeva OA, Kotkovskaya EN, Pavlyuchenkova OV, Pereselkova DA. Study of biological safety yeasts of the genus *Candida* as a potential source of feed protein. *Vestnik Orel-GAU*. 2016;5(62):72-78. doi: 10.15217/48484

5. Duskaev GK, Levakhin GI, Korolyov VL, Sirazetdinov FK. Use of probiotics and plant extracts to improve the productivity of ruminants (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(1):136-148. doi: 10.33284/2658-3135-102-1-136

6. Kolpakova VV et al. Use of environmentally safe micromycetes of the genus *Rhodotorula* to obtain fodder carotene containing concentrate. *South of Russia: Ecology, Development*. 2022;17:4(65):61-78. doi: 10.18470/1992-1098-2022-4-61-78

7. Deyneka VI, Shaposhnikov AA, Deyneka LA, Guseva TS, Vostrikova SM, Shentseva EA, Zakirova LR. Carotenoids: the structure, biological functions and perspectives of application. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Medicine. Pharmacy*. 2008;6(46):19-25.

8. Kiritsa E. Effect of plant extracts on the process of carotenoid biosynthesis by yeasts. *Herald of Agroindustrial complex of Upper Volga region*. 2017;3(39):54-58.

9. Zakharov ZV, German LS, Petrisheva OA, Zharko MY. The cultivation of the yeast *Phaffia rhodozyma* with constant or periodic light. *Izvestiya MSTU "MAMI"*. 2012;4:2(14):86-89.

10. Moshkina SV, Khimicheva SN. Influence of Active East feed additive on productive qualities of young dairy replacement cattle. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(3):153-164. doi: 10.33284/2658-3135-103-3-153

11. Savchik AV, Novik GI. Carotene-producing yeast-like fungi and their application in biotechnologiaia survey. *Food Industry: Science and Technologies*. 2020;13:3(49):70-83.
12. Chervyakova OP, Karaulova SS. Investigation of carotenogenesis by yeast *Rhodotorula rubra*. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2009;13(10(103)):117-120.
13. Aksu Z, Eren AT. Carotenoids production by the yeast *Rhodotorula mucilaginosa*: Use of agriculture wastes as a carbon source. *Process Biochemistry*. 2005;40(9):2985-2991. doi: 10.1016/j.procbio.2005.01.011
14. Aksu Z, Eren AT. Production of carotenoids by the isolated yeast of *Rhodotorula glutinis*. *Biochem Eng J*. 2007;35(2):107-113. doi: 10.1016/j.bej.2007.01.004
15. An GH, Song JY, Kwak WK, Lee BD, Song KB, Choi JE. Improved astaxanthin availability due to drying and rupturing of the red yeast, *Xanthophyllomyces dendrorhous*. *Food Sci Biotechnol*. 2006;15(4):506-510.
16. Ayiku S, Shen JF, Tan BP, Dong XH, Liu HY. Effects of dietary yeast culture on shrimp growth, immune response, intestinal health and disease resistance against *Vibrio harveyi*. *Fish Shellfish Immun*. 2020;102:286-295. doi: 10.1016/j.fsi.2020.04.036
17. Bach A, Iglesias C, Devant M. Daily rumen pH pattern of loose-housed dairy cattle as affected by feeding pattern and live yeast supplementation. *Animal Feed Science and Technology*. 2007;136(1-2):146-153. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2006.09.011
18. Besarab NV, Gerasimovich K, Kanterova AV, Novik GI. Biosynthetic production of carotenoids using yeast strains of genus *Rhodotorula* on the cheap beer wort substrate. *Journal of Microbiology, Biotechnology And Food Sciences*. 2018;7(4):383-386. doi: 10.15414/jmbfs.2018.7.383-386
19. Bhosale P, Gadre RV. Production of  $\beta$ -carotene by a mutant of *Rhodotorula glutinis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2001;55(4):423-427. doi: 10.1007/s002530000570
20. Bhosale P, Jogdand VV, Gadre RV. Stability of  $\beta$ -carotene in spray dried preparation of *Rhodotorula glutinis* mutant 32. *J Appl Microbiol*. 2003;95(3):584-590. doi: 10.1046/j.1365-2672.2003.02018.x
21. Britton G, Hornero-Méndez D. Carotenoids and colour in fruit and vegetables. In: Tomás-Barberán FA, Robins RJ, editors. *Phytochemistry of fruit and vegetables*. England, Oxford: Clarendon Press; 1997;11-28.
22. Buzzini P, Innocenti M, Turchetti B, Libkind D, et al. Carotenoid profiles of yeasts belonging to the genera *Rhodotorula*, *Rhodosporidium*, *Sporobolomyces* and *Sporidiobolus*. *Canadian Journal of Microbiology*. 2007;53(8):1024-1031. doi: 10.1139/W07-068
23. Buzzini P, Vaughn-Martini A. Yeast biodiversity and biotechnology. In: Péter G, Rosa C, editors. *Biodiversity and Ecophysiology of Yeasts. The Yeast Handbook*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2006:533-559. doi: 10.1007/3-540-30985-3\_22
24. Buzzini P. Batch and fed-batch carotenoid production by *Rhodotorula glutinis*-*Debaryomyces castellii* co-cultures in corn syrup. *Journal of Applied Microbiology*. 2001;90(5):843-847. doi: 10.1046/j.1365-2672.2001.01319.x
25. Callaway ES, Martin SA. Effects of a *Saccharomyces cerevisiae* culture on ruminal bacteria that utilize lactate and digest cellulose. *Journal of Dairy Science*. 1997;80(9):2035-2044. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(97)76148-4
26. Chaucheyras-Durand F, Walker ND, Bach A. Effects of active dry yeasts on the rumen microbial ecosystem: Past, present and future. *Animal Feed Science and Technology*. 2008;145(1-4):5-26. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2007.04.019
27. Chen G, Wang J, Su Y, Zhu Y, Zhang G, Zhao H, et al. Pullulan production from synthetic medium by a new mutant of *Aureobasidium pullulans*. *Prep Biochem Biotechnol*. 2017;47(10):963-969. doi: 10.1080/10826068.2017.1350979
28. Corona L, Mendoza GD, Castrejón FA, Crosby MM, Cobos MA. Evaluation of two yeast cultures (*Saccharomyces cerevisiae*) on ruminal fermentation and digestion in sheep fed a corn stover diet. *Small Ruminant Research*. 1999;31(3):209-214. doi: 10.1016/S0921-4488(98)00146-1



29. Costa I, Martelli HL, De Silva IM, Pomeroy D. Production of  $\beta$ -carotene by *Rhodotorula* Strain. *Biotech Lett.* 1987;9(5):373-375. doi: 10.1007/BF01025808
30. Coutinho JOPA, Quintanilha MF, Campos MRA, et al. Antarctic Strain of *Rhodotorula mucilaginosa* UFMGCB 18,377 Attenuates Mucositis Induced by 5-Fluorouracil in Mice. *Probiotics and Antimicrobial Proteins.* 2022;14:486-500. doi: 10.1007/s12602-021-09817-0
31. Cudowski A, Pietryczuk A. Biochemical response of *Rhodotorula mucilaginosa* and *Cladosporium herbarum* isolated from aquatic environment on iron (III) ions. *Sci Rep.* 2009;9:19492. doi: 10.1038/s41598-019-56088-5
32. Daudu R, Parker CW, Singh NK, Wood JM, Debieu M, O'hara NB et al. Draft genome sequences of *Rhodotorula mucilaginosa* strains isolated from the international space station. *Microbiol Resour Announc.* 2020;9:00570-20. doi: 10.1128/MRA.00570-20
33. Dávila-Ramírez JL, Carvajal-Nolazco MR, López-Millanes MJ, González-Ríos H, Cela-ya-Michel H, Sosa-Castañeda J, et al. Effect of yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation on growth performance, blood metabolites, carcass traits, quality, and sensorial traits of meat from pigs under heat stress. *J Anim Feed Sci.* 2020;267:114573. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2020.114573
34. Davoli P, Mierau V, Weber RWS. Carotenoids and fatty acids in red yeasts *Sporobolomyces roseus* and *Rhodotorula glutinis*. *Appl Biochem Microbiol.* 2004;40:392-397. doi: 10.1023/B:ABIM.0000033917.57177.f2
35. de C. Cardoso LA, Kanno KYF, Karp SG. Microbial production of carotenoids — A review. *African Journal of Biotechnology.* 2017;16(4):139-146. doi: 10.5897/AJB2016.15763
36. Denev SA, Peeva T, Radulova P, Stancheva P, Staykova G, Beev G, et al. Yeast cultures in ruminant nutrition. *Bulg J Agric Sci.* 2007;13:357-74.
37. Durá MA, Flores M, Toldrá F. Effect of *Debaryomyces* spp. on the proteolysis of dry-fermented sausages. *Meat Science.* 2004;68(2):319-328. doi: 10.1016/j.meatsci.2004.03.015
38. Durand-Chaucheyras F, Fonty G, Bertin G, Théveniot M, Gouet P. Fate of Levucell® SC I-1077 yeast additive during digestive transit in lambs. *Reproduction Nutrition Development.* 1998;38(3):275-280. doi: 10.1051/rnd:19980307
39. El-Banna AAE-R, El-Razek AMA, El-Mahdy AR. Isolation, Identification and Screening of Carotenoid-Producing Strains of *Rhodotorula glutinis*. *Food and Nutrition Sci.* 2012;3(5):627-633. doi: 10.4236/fns.2012.35086
40. El-Banna Amr A, Amal M Abd El-Razek, El-Mahdy AR. Some factors affecting the production of carotenoids by *Rhodotorula glutinis* var. *Glutinis*. *Food and Nutrition Sciences.* 2012;3:64-71. doi: 10.4236/fns.2012.31011
41. Elwan HAM, Elnesr SS, Abdallah Y, Hamdy A, El-Bogdady AH. Red yeast (*Phaffia rhodozyma*) as a source of astaxanthin and its impacts on productive performance and physiological responses of poultry. *World Poultry Sci J.* 2019;75(2):273-284. doi:10.1017/S0043933919000187
42. Falces-Romero I, Cendejas-Bueno E, Romero-Gomez MP, Garcia-Rodriguez J. Isolation of *Rhodotorula mucilaginosa* from blood cultures in a tertiary care hospital. *Mycoses.* 2018;61(1):35-39. doi: 10.1111/myc.12703
43. Fang TJ, Wang JM. Extractability of astaxanthin in a mixed culture of a carotenoid over-producing mutant of *Xanthophyllomyces dendrorhous* and *Bacillus circulans* in two-stage batch fermentation. *Process Biochem.* 2002;37(11):1235-1245. doi: 10.1016/S0032-9592(02)00011-0
44. Ferrao M, Garg S. Studies on effect of media components on growth and  $\beta$ -carotene production by *Rhodotorula graminis* RC04. *Journal of Cell and Tissue Research.* 2011;11(1):2551-2556.
45. Fomenky BE, Bissonnette N, Talbo G et al. Impact of *Saccharomyces cerevisiae* boulardii CNCMI-1079 and *Lactobacillus acidophilus* BT1386 on total lactobacilli population in the gastrointestinal tract and colon histomorphology of Holstein dairy calves. *Animal Feed Science and Technology.* 2017;234:151-161. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2017.08.019
46. Fonty G, Chaucheyras-Durand F. Effects and modes of action of live yeasts in the rumen. *Biologia.* 2006;61:741-50. doi: 10.2478/s11756-006-0151-4

47. Frengova G, Simova E, Beshkova D. Caroteno-protein and exopolysaccharide production by co-cultures of *Rhodotorula glutinis* and *Lactobacillus helveticus*. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 1997;18:272-277. doi: 10.1038/sj.jim.2900379
48. Frengova GI, Beshkova DM. Carotenoids from *Rhodotorula* and *Phaffia*: yeasts of biotechnological importance. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 2009;36(2):163-80. doi: 10.1007/s10295-008-0492-9
49. Frengova GI, Simova ED, Beshkova DM. Improvement of carotenoid-synthesizing yeast *Rhodotorula rubra* by chemical mutagenesis. *Zeitschrift fur Naturforschung C.* 2004;59(1-2):99-103. doi: 10.1515/znc-2004-1-220
50. Frengova GI, Simova ED, Beshkova DM.  $\beta$ -Carotene rich carotenoid-protein preparation and exopolysaccharide production by *Rhodotorula rubra* GED8 grown with a yogurt starter culture. *Z Naturforsch C.* 2006;61(7-8):571-577. doi: 10.1515/znc-2006-7-817
51. Galvão KN et al. Effect of feeding live yeast products to calves with failure of passive transfer on performance and patterns of antibiotic resistance in fecal *Escherichia coli*. *Reproduction Nutrition Development.* 2005;45(4):427-440. doi: 10.1051/rnd:2005040
52. Ge Ye, Kaisen H, Weitian X, Chunhou X, Qiucheng Y, Ying L. Effects of *Rhodotorula mucilaginosa* on the Immune Function and Gut Microbiota of Mice. *Front Fungal Biol.* 2021;2:705696. doi: 10.3389/ffunb.2021.705696
53. Guo J, Chen S, Feng Y, Guo Z, Wu D, Xing C et al. Effects of feeding *Rhodotorula mucilaginosa* on the growth properties in *Scorturm barcoo*. *Siliao Gongye.* 2020;41:44-49.
54. Gupta A, Vongsvivut J, Barrow CJ, Puri M. Molecular identification of marine yeast and its spectroscopic analysis establishes unsaturated fatty acid accumulation. *J Biosci Bioeng.* 2012;114(4):411-417. doi: 10.1016/j.jbiosc.2012.05.013
55. Haddad SG, Goussous SN. Effect of yeast culture supplementation on nutrient intake, digestibility and growth performance of Awassi lambs. *Anim Feed Sci Tech.* 2005;118(3-4):343-348. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2004.10.003
56. Han JY, Lee SJ, Jung MK, Choi SK, Roh JS. Process for extracting astaxanthin pigment from yeast and extracted pigment thereof. US patent 2003/0087335 A1. 8 May 2003.
57. Jouany JP. A new look at yeast cultures as probiotics for ruminants. *Feed Mix.* 2001;9:17-19.
58. Kanzy HM et al. Optimization of carotenoids production by yeast strains of *Rhodotorula* using salted cheese whey. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences.* 2015;4(1):456-469.
59. Kaulmann A, Bohn T. Carotenoids, inflammation, and oxidative stress-implications of cellular signaling pathways and relation to chronic disease prevention. *Nutrition Research.* 2014;34(11):907-929. doi: 10.1016/j.nutres.2014.07.010
60. Kim J, DellaPenna D. Defining the primary route for lutein synthesis in plants: the role of *Arabidopsis* carotenoid beta-ring hydroxylase CYP97A3. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2006;103(9):3474-3479. doi: 10.1073/PNAS.0511207103
61. Kobayashi M, Kakizono T, Nagai S. Astaxanthin production by a green alga, *Haematococcus pluvialis* accompanied with morphological changes in acetate media. *J Ferm Bioeng.* 1991;71(5):335-339. doi: 10.1016/0922-338X(91)90346-1
62. Korumilli T, Susmita M. Carotenoid production by *Rhodotorula* sp. on fruit waste extract as a sole carbon source and optimization of key parameters. *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-International.* 2014;33(3-71):89-99. doi: 10.30492/IJCCE.2014.11344
63. Kot AM, Błażej S, Kurcz A, Gientka I, et al. *Rhodotorula glutinis* — potential source of lipids, carotenoids, and enzymes for use in industries. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2016;100(14):6103-6117. doi: 10.1007/s00253-016-7611-8

64. Lascano GL, Heinrichs AJ. Rumen fermentation pattern of dairy heifers fed restricted amounts of low, medium, and high concentrate diets without and with yeast culture. *Livestock Science*. 2009;124(1-3):48-57. doi: 10.1016/j.livsci.2008.12.007
65. Latha BV, Jeevaratnam K, Murali HS, Manja KS. Influence of growth factors on carotenoid pigmentation of *Rhodotorula glutinis* DFR-PDY from natural source. *Indian Journal of Biotechnology*. 2005;4(3):353-357.
66. Lei Y, Kim I H. Effect of *Phaffia rhodozyma* on performance, nutrient digestibility, blood characteristics, and meat quality in finishing pigs. *J Anim Sci*. 2014;92(1):171-176. doi: 10.2527/jas.2013-6749
67. Marova I, Certic M, Breierova E. Production of enriched biomass with carotenogenic yeast - Application of whole-cell yeast biomass to production of pigments and other lipid compounds. In: Matovic D, editor. *Biomass - detection, production and usage*. Intech. 2011:345-384. doi: <http://dx.doi.org/10.5772/19235>
68. Mata-Gómez LC, Montañez JC, Méndez-Zavala A, et al. Biotechnological production of carotenoids by yeast: an overview. *Microb Cell Fact*. 2014;13(1):12. doi: 10.1186/1475-2859-13-12
69. Matilde C, Lippolis A, Fava F, Rodolfi L, et al. *Microbes: Food for the Future*. *Foods*. 2021;10(5):971. doi: 10.3390/foods10050971
70. McGraw KJ, Beebe MD, Hill GE, Parker RS. Lutein-based plumage coloration in songbirds is a consequence of selective pigment incorporation into feathers. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol*. 2003;135(4):689-696. doi: 10.1016/s1096-4959(03)00164-7
71. Meyer SP. Developments in world aquaculture, formulations, and the role of carotenoids. *Pure Appl Chem*. 1994;66(5):1069-1076.
72. Mihalcea A, Ferdes M, Chirvase AA, Ungureanu C, et al. The influence of operating conditions on the growth of the yeast *Rhodotorula rubra* ICCF 209 and on torularhodin formation. *Rev Chim. (Bucharest)*. 2011;62(6):659-665.
73. Moline M, Flores MR, Libkind D, del Carmen DM, Farias ME, van Broock M. Photoprotection by carotenoid pigments in the yeast *Rhodotorula mucilaginosa*: the role of torularhodin. *Photochemical & Photobiological Sciences*. 2010;9:1145-1151. doi: 10.1039/c0pp00009d
74. Nozierea P, Graulet B, Lucas A, Martin B, Grolier P, Doreau M. Carotenoids for ruminants: From forages to dairy products. *Animal Feed Sci Technol*. 2006;131(3-4):418-450. doi: 10.1016/j.anifeeds.2006.06.018
75. Ogunade IM, Lay J, Andries K, et al. Effects of live yeast on differential genetic and functional attributes of rumen microbiota in beef cattle. *J Animal Sci Biotechnol*. 2019;10:68. doi: 10.1186/s40104-019-0378-x
76. Orranee S, Moonmanee T, Lumsangkul C, Doan HV, et al. Can red yeast (*Sporidiobolus pararoseus*) be used as a novel feed additive for mycotoxin binders in broiler chickens? *Toxins*. 2022;14(10):678. doi:10.3390/toxins14100678
77. Pasarin D, Rovinaru C. Sources of carotenoids and their uses as animal feed additives- a review. *Scientific Papers. Series D. Animal Science*. 2018; LXI(2):74-85.
78. Patterson R, Rogiewicz AG, Kiarie E, Slominski BA. Yeast derivatives as a source of bioactive components in animal nutrition: A brief review. *Front Vet Sci*. 2023;9:2022. doi: 10.3389/fvets.2022.1067383
79. Perrier V, Dubreucq E, Galzy P. Fatty acid and carotenoid composition of *Rhodotorula* strains. *Arch Microbiol*. 1995;164(3):173-179. doi: 10.1007/BF02529968
80. Rucker RB, Suttie JW, McCormick DB, Machlin LJ, editors. *Handbook of Vitamins*: 3rd ed. New York: Marcel Dekker, Inc; 2001. 616 p.
81. Sarada R, Usha T, Ravishankar GA. Influence of stress on astaxanthin production in *Haematococcus pluvialis* grown under different culture conditions. *Process Biochem*. 2002;37(6):623-627. doi: 10.1016/S0032-9592(01)00246-1

82. Somashekar D, Joseph R. Inverse relationship between carotenoid and lipid formation in *Rhodotorula fragilis* according to the C/N ratio of the growth medium. *Word Journal of Microbiology & Biotechnology*. 2000;16:491-493. doi: 10.1023/A:1008917612616
83. Somboonchai T, Foiklang S, Panatuk J, et al. Replacement of soybean meal by red yeast fermented tofu waste on feed intake, growth performance, carcass characteristics, and meat quality in Thai Brahman crossbred beef cattle. *Trop Anim Health Prod*. 2022;54(2):133. doi: 10.1007/s11250-022-03127-5
84. Song B, Wu T, You P, Wang H, Burke JL, Kang K, et al. Dietary supplementation of yeast culture into pelleted total mixed rations improves the growth performance of fattening lambs. *Front Vet Sci*. 2021;8:657816. doi: 10.3389/fvets.2021.657816
85. Sporn MB, Dunlop NM, Newton DL, Smith JM. Prevention of chemical carcinogenesis by vitamin A and its synthetic analogs (retinoids). *Fed Proc*. 1976;35(6):1332-8.
86. Sriphuttha C, Limkul S, Pongsetkul J, Phiwthong T, Massu A, Sumniangyen N, Boontawan P, Ketudat-Cairns M, Boontawan A, Boonchuen P. Effect of fed dietary yeast (*Rhodotorula paludigena* CM33) on shrimp growth, gene expression, intestinal microbial, disease resistance, and meat composition of *Litopenaeus vannamei*. *Developmental and Comparative Immunology*. 2023;147:104896. doi: 10.1016/j.dci.2023.104896
87. Storebakken T, Sorensen M, Bjerkend B, Hiu S. Utilization of astaxanthin from red yeast, *Xanthophyllomyces dendrorhous*, in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*: effects of enzymatic cell wall disruption and feed extrusion temperature. *Aquaculture*. 2004;236(1-4):391-403. doi: 10.1016/j.aquaculture.2003.10.035
88. Sun J, Li M, Tang Z, Zhang X, Chen J, Sun Z. Effects of *Rhodotorula mucilaginosa* fermentation product on the laying performance, egg quality jejunal mucosal morphology and intestinal microbiota of hens. *J Appl Microbiol*. 2020;28 (1):54-64. doi: 10.1111/jam.14467
89. Tang W, Wang Y, Zhang J, Cai Y, He Z. Biosynthetic pathway of carotenoids in *rhodotorula* and strategies for enhanced their production. *J Microbiol Biotechnol*. 2019;29(4):507-517. doi: 10.4014/jmb.1801.01022
90. Tinoi J, Rakariyatham N, Deming RL. Simplex optimization of carotenoid production by *Rhodotorula glutinis* using hydrolyzed mung bean waste flour as substrate. *Process Biochem*. 2005;40(7):2551-2557. doi: 10.1016/j.procbio.2004.11.005
91. Wang J, Zhao L, Liu J, Wang H, Xiao Sh. Effect of potential probiotic *Rhodotorula benthica* D30 on the growth performance, digestive enzyme activity and immunity in juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicas*. *Fish & Shellfish Immunology*. 2015;43(2):330-336. doi: 10.1016/j.fsi.2014.12.028
92. Wang L, Xie J, Wu W, Li B, Ou J. Excellent microbial cultivation for astaxanthin production and its extraction by *Rhodotorula benthica*. *Med Res*. 2018;2(4):180015. doi: 10.21127/yaoyimr20180015
93. Yang S-P, Wu Z-H, Jian J-Ch, Zhang X-Z. Effect of marine red yeast *Rhodospiridium paludigenum* on growth and antioxidant competence of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*. 2010;309(1-4):62-65. doi: 10.1016/j.aquaculture.2010.09.032

#### **Информация об авторах:**

**Мария Валентиновна Довыденкова**, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории микробиологии, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, городской округ Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: 8(4967)651133.

**Евгения Николаевна Колодина**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории микробиологии, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, городской округ Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: 8(4967)651133.

**Дарья Александровна Никанова**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории микробиологии, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, городской округ Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: 8(4967)651133.

**Татьяна Ивановна Логвинова**, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории микробиологии, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, городской округ Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: 8(4967)651133.

**Ольга Анатольевна Артемьева**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микробиологии, Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, 142132, Московская область, городской округ Подольск, п. Дубровицы, д. 60, тел.: 8(4967)651133.

**Information about the authors:**

**Maria V Dovydenkova**, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher at the Microbiology Laboratory, Federal Research Center of Animal Husbandry – VIZ named after Academician L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy village, Podolsk City district, Moscow region, 142132, tel.: 8(4967)651133.

**Evgeniya N Kolodina**, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher at the Microbiology Laboratory, Federal Research Center of Animal Husbandry – VIZ named after Academician L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy village, Podolsk City district, Moscow region, 142132, tel.: 8(4967)651133.

**Daria A Nikanova**, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher at the Microbiology Laboratory, Federal Research Center of Animal Husbandry – VIZ named after Academician L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy village, Podolsk City district, Moscow region, 142132, tel.: 8(4967)651133.

**Tatiana I Logvinova**, Cand. Sci. (Biology), Researcher at the Microbiology Laboratory, Federal Research Center of Animal Husbandry – VIZ named after Academician L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy village, Podolsk City district, Moscow region, 142132, tel.: 8(4967)651133.

**Olga A Artemieva**, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher at the Microbiology Laboratory, Federal Research Center of Animal Husbandry – VIZ named after Academician L.K. Ernst, 60 Dubrovitsy village, Podolsk City district, Moscow region, 142132, tel.: 8(4967)651133.

Статья поступила в редакцию 15.04.2024; одобрена после рецензирования 23.04.2024; принята к публикации 10.06.2024.

The article was submitted 15.04.2024; approved after reviewing 23.04.2024; accepted for publication 10.06.2024.