

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 579.222

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-54-62>

Поступило в редакцию 01.07.2025

Received 01.07.2025

Е. А. Шляхотко¹, Л. И. Сапунова¹, академик А. Г. Лобанок¹, П. С. Шабуня²¹*Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Купревича, 2, 220084, Минск, Республика Беларусь*²*Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Купревича, 5/2, 220084, Минск, Республика Беларусь***БИОСИНТЕЗ КАРОТИНОИДОВ КРАСНЫМ ДРОЖЖЕВЫМ ГРИБОМ
RHODOTORULA GLUTINIS БИМ Y-159**

Аннотация. Исследованы параметры биосинтеза каротиноидов у штамма *Rhodotorula glutinis* БИМ Y-159, установлен состав и соотношение отдельных пигментов. Показано, что максимальный уровень продукции каротиноидов (5,7 мг/г биомассы) достигается в условиях глубинного культивирования дрожжевого гриба в среде с высоким содержанием углеводов (глюкоза, 11 %) и дефицитом азотного питания. Ионы Cu^{2+} в концентрации 0,5 мМ стимулируют продукцию каротиноидов у *R. glutinis* БИМ Y-159 на 17,5–17,8 %. В условиях глубинного культивирования штамма состав комплекса продуцируемых каротиноидов представлен торуленом, торулородином, ζ - и β -каротинами, а также не идентифицированным компонентом. На долю β -каротина, торулина и торулородина приходится соответственно 16, 40 и 32 % синтезированных *R. glutinis* БИМ Y-159 каротиноидов.

Ключевые слова: дрожжевой гриб, *Rhodotorula glutinis*, каротиноиды, β -каротин, торулен, торулородин, биосинтез

Для цитирования. Биосинтез каротиноидов красным дрожжевым грибом *Rhodotorula glutinis* БИМ Y-159 / Е. А. Шляхотко, Л. И. Сапунова, А. Г. Лобанок, П. С. Шабуня // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 1. – С. 54–62. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-54-62>

Ekaterina A. Shlachotko¹, Leanida I. Sapunova¹, Academician Anatoli G. Lobanok¹, Polina S. Shabunya²¹*Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus,
2, Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus*²*Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,
5/2, Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus***BIOSYNTHESIS OF CAROTENOIDS BY RED YEAST *RHODOTORULA GLUTINIS* БИМ Y-159**

Abstract. Carotenogenesis, composition and ratio of individual carotenoid components synthesized by *Rhodotorula glutinis* БИМ Y-159 was investigated. It was found that peak level of carotenoid production (5.7 mg/g biomass) was reached during submerged fermentation of yeast in media with high concentration of carbohydrates (glucose 11 %) and deficiency of nitrogen nutrition. Cu^{2+} ions in concentration 0.5 mM stimulated production of carotenoids in *R. glutinis* БИМ Y-159 by 17.5–17.8 %. Under optimal conditions the produced carotenoid complex is represented by torulene, torulorhodin, ζ - and β -carotenes plus an unidentified component. β -Carotene, torulene, and torulorhodin amount for 16 %, 40 % and 32 % of carotenoids synthesized by *R. glutinis* БИМ Y-159.

Keywords: yeast, *Rhodotorula glutinis*, carotenoids, β -caroten, torulene, torulorodine, biosynthesis

For citation. Shlachotko E. A., Sapunova L. I., Lobanok A. G., Shabunya P. S. Biosynthesis of carotenoids by red yeast *Rhodotorula glutinis* БИМ Y-159. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2026, vol. 70, no. 1, pp. 54–62 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-54-62>

Введение. Каротиноиды растительного и микробного происхождения – сложные жирорастворимые биологически активные соединения, выполняющие в клетке множество функций: участвуют в фотосинтезе, защищают от повреждающего действия активных форм кислорода (H_2O_2 , O_2^- , $\text{HO}\cdot$) и облучения, являются предшественниками витамина А и др. Из более чем 700 известных соединений каротиноидной природы наиболее известны микробные β - и γ -каротины, ликопин, астаксантин, торулин, торулородин, синтезируемые преимущественно микроорганизмами родов *Cystofilobasidium*, *Dioszegia*, *Neurospora*, *Rhodotorula*, *Rhodospiridium*, *Sporidiobolus*, *Sporobolomyces*. Отмечено повышение продукции торулина, торулородина и β -каротина предста-

вителями красных дрожжевых грибов родов *Rhodotorula*, *Rhodosporidium*, *Sporidiobolus* в ответ на воздействие УФ-облучения, высокой температуры, ионов тяжелых металлов, растворителей. На компонентный состав синтезируемых ими каротиноидов существенно влияют состав и кислотность среды, температура культивирования, аэрация, освещенность и другие физико-химические факторы [1; 2].

Перспективность использования нетоксичных для клеток торулена и торулородина красных дрожжевых грибов в различных сферах хозяйственной деятельности обусловлена множеством их уникальных свойств – противоопухолевых, антиоксидантных, противовоспалительных, фотопротекторных, антимикробных. Значительная часть этих свойств, в том числе их биологическое действие, определяется системой двойных связей в молекулярной структуре каротиноидов. Так, в молекулах торулена и торулородина обнаружены 13 двойных связей, одно β -ионовое кольцо и более длинная, чем у β -каротина, полиеновая цепь. Молекула торулородина, кроме того, содержит карбоксильную группу, которая придает полярность этому пигменту и определяет его сильные антиоксидантные свойства [2]. Так, провитаминная активность торулена и торулородина сопоставима, а определяемая по нейтрализации синглетного кислорода антиоксидантная активность торулородина *Rhodotorula glutinis* в 6,5 раз превышает соответствующие активности β -каротина. У торулородина этого вида дрожжей выявлена, кроме того, антимикробная активность в отношении таких патогенов, как *Helicobacter pylori*, *Fusarium oxysporum*, *Aspergillus ochraceus*, *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* [2; 3].

Помимо каротиноидов дрожжевые грибы рода *Rhodotorula*, в частности, *R. glutinis* продуцируют также липиды, коэнзим Q_{10} и другие коммерчески востребованные ферменты – липазу, эстеразу, α -L-арабинофуранозидазу, инвертазу, пектиназу, танин-ацил-гидролазу (таниназу), фенил-аланинаммоний-лиазу и др. [4].

Свойство дрожжевых грибов *R. glutinis* утилизировать сложные органические и неорганические соединения [4–9] и синтезировать при этом каротиноиды и другие биологически активные метаболиты позволяет использовать их для трансформации отходов переработки сельскохозяйственного сырья, содержащих в своем составе растворимые и нерастворимые углеводы, белки, жиры, минеральные соединения, в продукты с высокой добавленной стоимостью для кормопроизводства, косметической, фармацевтической и пищевой промышленности. При этом решается остро стоящая экологическая проблема, связанная с хранением и утилизацией, например, таких побочных продуктов пищевых производств, как меласса, зерновая послеспиртовая барда, молочная и подсырная сыворотка, шроты и жомы семян масличных культур и сахарной свеклы и др.

Цель работы – установление особенностей каротиногенеза у штамма *Rhodotorula glutinis* БИМ Y-159 и компонентного состава синтезируемых каротиноидов как основы для разработки биотехнологии получения белково-витаминной кормовой добавки.

Материалы и методы исследования. Культуры микроорганизмов. В работе использовали штамм дрожжевого гриба *Rhodotorula glutinis* БИМ Y-159 из Белорусской коллекции непатогенных микроорганизмов Института микробиологии НАН Беларуси.

Культивирование микроорганизма. Культуру исследуемого дрожжевого гриба поддерживали методом периодических пересевов на сусло-агар.

Для оценки роста и каротиногенеза штамм *R. glutinis* БИМ Y-159 выращивали глубинным способом в течение 5–7 сут в 50 мл жидкой среды в колбах Эрленмейера объемом 250 мл при 25 °С, 200 об/мин в условиях круглосуточного освещения лампами дневного света (световой поток 1200 Лм, температура света – 5000 К). Стерильные питательные среды различного состава (табл. 1) инокулировали суспензией ($OP_{600} = 0,7–0,8$; 5 об. %) клеток дрожжей, выращенных в бульоне Лурия–Бертрани с глюкозой (0,5 %) в течение 24 ч. Среды стерилизовали при 0,75 атм в течение 30 мин.

По окончании культивирования *R. glutinis* БИМ Y-159 в культуральной жидкости определяли биомассу спектрофотометрически в кварцевой кювете с длиной оптического пути 1 см при длине волны $\lambda = 600$ нм или гравиметрически после отделения дрожжевых клеток центрифугированием при 7000 g в течение 20 мин, отмывки дистиллированной водой и высушивания при 105 °С до постоянного веса. Количество биомассы выражали в единицах оптической плотности (OP_{600}) или в мг в 1 мл культуральной жидкости (мг/мл).

Т а б л и ц а 1. Состав питательных сред для культивирования *Rhodotorula glutinis* БИМ Y-159T a b l e 1. Composition of nutrient media for *Rhodotorula glutinis* BIM Y-159 cultivation

Компонент питательной среды, г/л Nutrient medium component, g/l	Питательная среда Nutrient medium					
	1 (Лундина)	2 (MS-1)	3	4	5	6
(NH ₄) ₂ SO ₄	1,0	5,0	0,4	4,0	0,4	—
KH ₂ PO ₄	1,0	1,0	0,2	—	0,2	—
K ₂ HPO ₄	—	—	0,08	—	0,08	—
K ₂ SO ₄	—	—	—	0,174	—	—
MgSO ₄ ·7H ₂ O	1,0	0,5	0,2	0,5	0,2	—
FeCl ₃ ·7H ₂ O	следы	—	—	—	—	—
NaCl	0,5	0,1	0,04	—	0,04	—
CaCl ₂	—	—	0,02	—	0,02	—
CuSO ₄	—	—	—	—	0,08	—
Глюкоза	20	40	110	15	110	—
Пептон	—	—	1,3	—	1,3	—
Дрожжевой экстракт	—	—	2,0	1,5	2,0	—
Послеспиртовая барда	—	—	—	—	—	100
pH	6,0	6,0	6,5	6,5	6,5	4,4*

П р и м е ч а н и е. * – соответствует pH цельной послеспиртовой барды.

N o t e. * – corresponds to the pH of vinasse.

Выделение и количественное определение каротиноидов. Выделение каротиноидов из отмытых клеток дрожжевого гриба проводили экстракцией ацетоном согласно [10]. Содержание каротиноидов определяли спектрофотометрическим методом при длине волны λ_{490} (Amersham Ultrospec 2010 pro, США) и выражали в мкг в 1 мл культуральной жидкости (мкг/мл) или в мг в 1 г сухой биомассы (мг/г). Содержание каротиноидов рассчитывали по формуле

$$C = (\text{ОП}_{590}DV) / (EW),$$

где D – разведение; V – объем экстракта каротиноидов, мл; E – коэффициент экстинкции ($2580 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$); W – масса сухой биомассы, мг.

Величину pH определяли потенциометрически.

Определение композиционного состава каротиноидов. Состав комплекса каротиноидов, синтезируемых *R. glutinis* БИМ Y-159, анализировали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). В работе использовали хроматограф Agilent 1200 с диодно-матричным детектором, соединенный с масс-спектрометром Agilent 6410 Triple Quad (США).

Для приготовления экстракта каротиноидов отмытую трижды дистиллированной водой биомассу *R. glutinis* БИМ Y-159 разрушали (800 Па и 28 Гц, 3 цикла) с использованием гомогенизатора высокого давления (Scientz-150A, Китай). Полученный гомогенат клеток центрифугировали (13000 g, 20 мин), осадок ресуспензировали в ацетоне (1 : 2), перемешивали (1500 об/мин, 20 мин) с использованием мульти-вортекса Biosan V-32 (Латвия). Экстракцию повторяли до полного обесцвечивания осадка.

Параметры работы масс-селективного детектора: интерфейс ионизации – APCI в режиме положительных ионов; температура испарителя – +400 °C; температура осушающего газа – +200 °C; скорость потока осушающего газа – 7 л/мин; давление на распылителе – 40 psi; напряжение на капилляре – 4000 В; коронный разряд – 4 мкА; напряжение на фрагменторе – 100 В; диапазон регистрируемых масс – 100–1500 m/z в режиме полного сканирования.

Хроматографическое разделение проводили на колонке Zorbax XDB C18 (Agilent, США) размером 150 × 4,6 мм, заполненной силикагелем октадецилсилильным для хроматографии с размером частиц 5 мкм при температуре +40 °C. Температура в автосэмплере составляла +40 °C,

объем инъекции – 20 мкл. В качестве подвижной фазы использовали смесь ацетонитрил : метанол : этилацетат (73 : 20 : 7). Смесь растворителей подавали со скоростью 0,6 мл/мин. Продолжительность анализа составляла 65 мин. Детекцию осуществляли при $\lambda = 454$ и 402 нм. В качестве референтного образца использовали β -каротин (97 %, Fluka 22040-1 g-F).

Навеску референтного образца β -каротина (7,4 мг) растворяли в 5 мл хлороформа, затем разводили 1 : 3 в подвижной фазе. Полученный раствор (493 мкг/мл) использовали для анализа.

Экстракт каротиноидов (10 мл) *R. glutinis* БИМ Y-159 упаривали досуха в токе азота. Осадок растворяли в смеси, содержащей 500 мкл подвижной фазы и 200 мкл хлороформа, фильтровали через шприц-фильтр PTFE/L диаметром 13 мм с размером пор 0,22 мкм в хроматографическую вials и использовали для анализа.

Представленные данные являются средним арифметическим не менее двух экспериментов, выполненных в трех повторностях. Обработку экспериментальных данных проводили с использованием пакета программ Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. Ранее в качестве потенциального продуцента каротиноидов был отобран штамм дрожжевого гриба *R. glutinis* БИМ Y-159. Согласно данным литературы, эффективность синтеза каротиноидов микроорганизмами определяется составом питательных сред и физико-химическими условиями их культивирования. Как правило, для выращивания представителей рода *Rhodotorula*, продуцирующих каротиноидные пигменты, в качестве источников углеводного питания используют глюкозу, лактозу, галактозу, сахарозу, мальтозу, трегалозу, глицерин, сорбит, а также отходы различных пищевых производств – молочную и подсырную сыворотку, луковую шелуху, картофельный и солодовый экстракты, свекольную мелассу, виноградное сусло, послеспиртовую барду, экстракты соевой и кукурузной муки и другие субстраты [5–12]. При этом в первом случае продуценты каротиноидов нуждаются в добавлении в питательную среду дорогостоящих дрожжевого экстракта и/или пептона и минеральных веществ, тогда как органические азотсодержащие компоненты и минералы уже присутствуют в составе приведенных выше побочных продуктов переработки сельскохозяйственного сырья.

Известно, что синтез каротиноидов дрожжевыми грибами происходит в поздней стационарной фазе их роста и зависит от условий их выращивания [2]. Для выявления потребности штамма *R. glutinis* БИМ Y-159 в питательных и минеральных веществах, обеспечивающих высокий уровень продукции каротиноидов, использовали среды различного состава (табл. 1).

Штамм *R. glutinis* БИМ Y-159 выращивали в средах 1–4 в течение 5–7 сут. Как видно из представленных на рис. 1 экспериментальных данных, рост дрожжевого гриба в средах 1, 2 и 4 завершился в течение 5 сут и составил 3,87–4,38 ед. оптической плотности ($ОП_{600} = 3,87–4,38$), тогда как продукция им каротиноидов (1,16–1,33 мкг/мл и 3,8–4,1 мг/г) достигла максимума на 7 сут его культивирования. В то же время в среде 3 исследуемый штамм активно рос в течение всего опыта и синтезировал при этом пигменты. В этом случае через 7 сут биомасса дрожжей составила $ОП_{600} = 22,2 \pm 1,0$, более чем в 5 раз превысив показатель роста в средах 1, 2, 4, а продукция каротиноидов достигла 5,16 $\pm$ 0,23 мкг/мл и 5,71 $\pm$ 0,24 мг/г. Возможно, это связано с дефицитом в средах 1, 2 и 4 органических источников углеводного и азотного питания.

Культивирование *R. glutinis* БИМ Y-159 в течение 7 сут в среде 5, содержащей ионы Cu^{2+} , по сравнению с ростом в среде 3 сопровождалось повышенным на 17,5–17,8 % уровнем накопления дрожжами биомассы и каротиноидов. Еще более выраженное (в два раза) положительное влияние указанного микроэлемента на биосинтез каротиноидных пигментов обнаружено у штамма *R. mucilaginosa* RCL-11 [1].

Таким образом, лучшие показатели роста *R. glutinis* БИМ Y-159 и биосинтеза им каротиноидов отмечены в питательной среде 3, обогащенной органическими углевод- и азотсодержащими веществами. Такой состав характерен, например, для свекольной и соевой мелассы, послеспиртовой барды, свекловичного жома и других побочных продуктов пищевых производств. Можно полагать, что указанные и другие отходы переработки сельскохозяйственного сырья являются дешевым источником питательных веществ для культивирования дрожжевого гриба *R. glutinis* БИМ Y-159. Действительно, исследуемый штамм при выращивании в среде 6, содержащей цельную послеспиртовую барду (рН 4,4) в качестве единственного источника питания, продуциро-

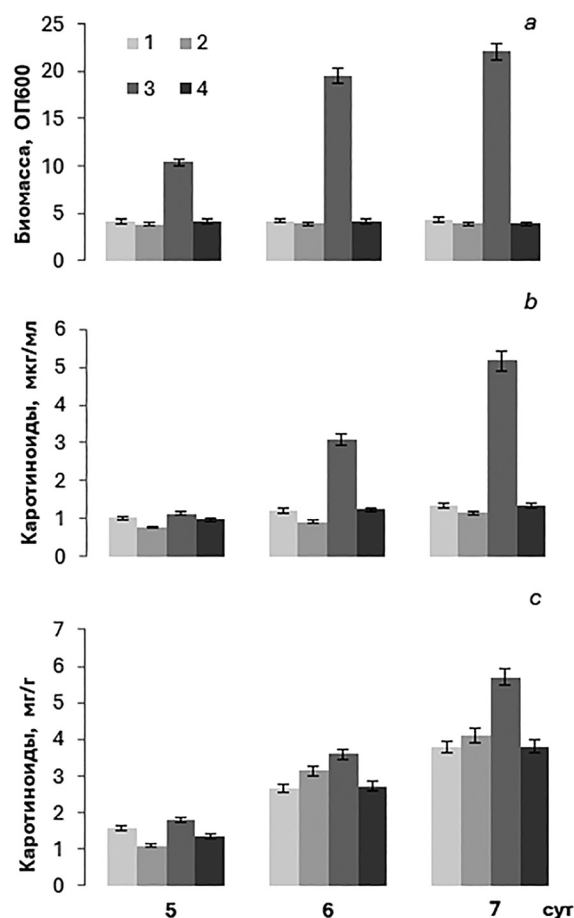


Рис. 1. Рост *R. glutinis* БИМ Y-159 и биосинтез каротиноидов в средах различного состава:
 а – биомасса, ОП₆₀₀; б – каротиноиды, мкг/мл; в – каротиноиды, мг/г.
 1–4 – среды для культивирования микроорганизмов (табл. 1)

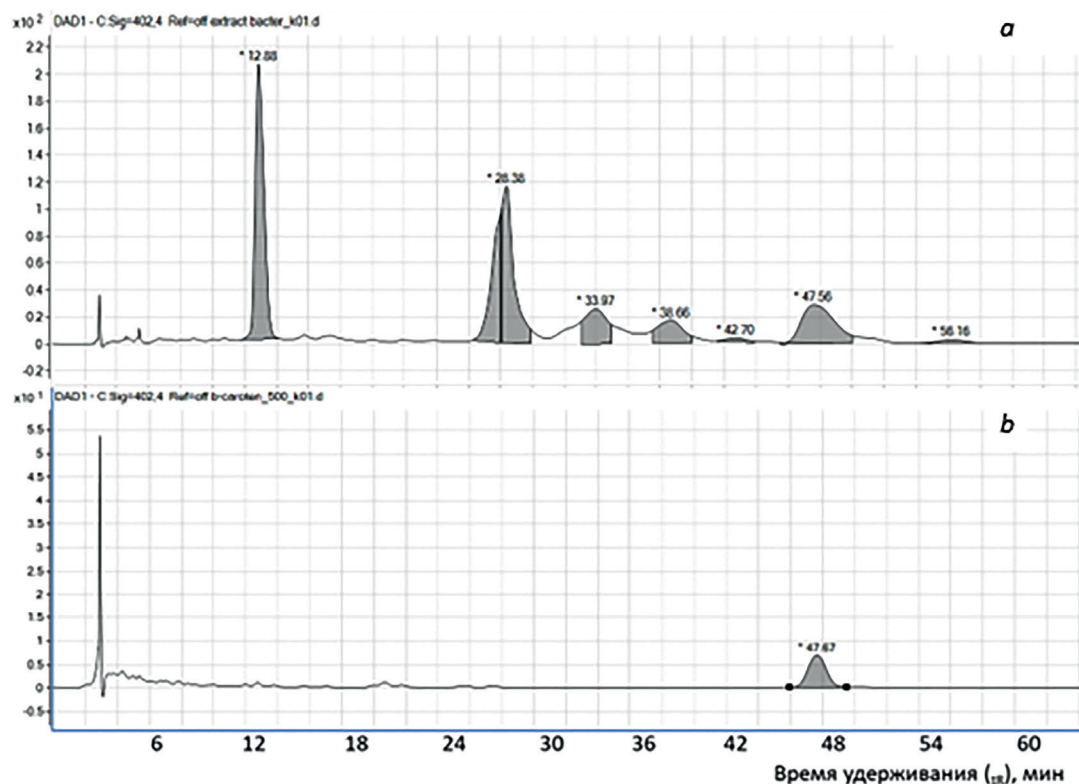
Fig. 1. Growth of *R. glutinis* BIM Y-159 and carotenoids biosynthesis in media of different composition:
 а – biomass, OD₆₀₀; б – carotenoids, µg/ml; в – carotenoids, mg/g.
 1–4 – media for cultivating microorganisms (Table 1)

вал каротиноиды в количестве 2,2–2,6 мкг/мл. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности дальнейших исследований по повышению продукции пигментов посредством оптимизации условий культивирования *R. glutinis* БИМ Y-159 в средах с указанным субстратом.

Эффективность разделения каротиноидов дрожжевых грибов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии зависит от способа их экстракции из клеток. Наиболее часто выделение пигментов, имеющих у дрожжевых грибов родов *Rhodotorula* и *Sporobolomyces* внутриклеточную локализацию, осуществляют согласно протоколам, предусматривающим использование диметилсульфоксида и ацетона [10; 11]. В настоящем исследовании экстракцию каротиноидов *R. glutinis* БИМ Y-159 ацетоном проводили после разрушения клеток на гомогенизаторе высокого давления. Анализ результатов хроматографического разделения показал, что исследуемый штамм синтезирует смесь каротиноидов (рис. 2). На хроматограмме видно, что в зависимости от времени удерживания (t_R) каротиноиды разделяются на восемь фракций, соответствующих семи пикам, среди которых преобладают фракции 1, (2 + 3), 4, 5, 7.

Известно, что максимумы светопоглощения (абсорбции) торулена и торулородина приходятся на промежуток между 450 и 560 нм и зависят от используемого экстрагента (табл. 2).

Для идентификации синтезируемых *R. glutinis* БИМ Y-159 пигментов, за исключением β-каротина, использовали данные литературы [11; 13] о времени удерживания (t_R), спектрах поглощения и молекулярных массах известных каротиноидов (табл. 3).

Рис. 2. Хроматограмма каротиноидов (a) *R. glutinis* БИМ Y-159 и референтного β-каротина (b)Fig. 2. Chromatogram of carotenoids (a) from the *R. glutinis* BIM Y-159 and a reference β-carotene (b)

Т а б л и ц а 2. Максимумы абсорбции и коэффициенты экстинкции торулена и торулородина

T a b l e 2. Absorption maxima and extinction coefficients of torulene and torularhodin

Пигмент Pigment	Растворитель Solvent	Максимумы абсорбции (нм) Absorption maxima (nm)	Коэффициент экстинкции (E) Extinction coefficient (E)	Источник информации Information source
Торулен	Петролейный эфир	454, 480, 514	3240	[13]
	Этанол	456, 486, 520	—	
	Хлороформ	467, 501, 537	—	
	Ацетон	460, 485, 518	—	[11]
Торулородин	Петролейный эфир	467, 501, 537	2040	[13]
	Этанол	463, 495, 532	—	
	Хлороформ	483, 515, 554	—	
	Ацетон	470, 495, 524	—	[11]

Т а б л и ц а 3. Характеристика каротиноидов *R. glutinis* БИМ Y-159T a b l e 3. Characteristics of carotenoids from *Rhodotorula glutinis* BIM Y-159

Пик Peak	t_R (мин)	λ_{max} (нм)	m/z [M ⁺ H] ⁺	m/z [M ⁻ H] ⁻	Пигмент Pigment	Аналог Analogue
1	12,86–12,88	470, 496, 522	565	563	Торулородин	[11]
2	28,27–28,38	460, 486, 518	539	537	Торулен	[11]
3	28,0	460, 486, 516	535	533	Торулен	[11]
4	33,96–33,97	440, 462, 492	537	535	γ-Каротин	[11; 13]
5	38,65–38,66	378, 398, 422	591	—	ζ-Каротин (7,8,7',8'-tetrahydro-, ψ ψ-caroten	[13]
6	42,70–42,76	412, 430, 456	539	—	Не идентифицирован	—
7	47,55–47,56	430, 454, 478	537	535	β-Каротин	—
8	56,16–56,27	404, 426, 454	—	—	Не идентифицирован	—
Референтный образец	47,67	430, 454, 478	537	535	β-Каротин	—

Установлено, что у *R. glutinis* БИМ Y-159 компонент каротиноидного комплекса, представленный пиком 1, по своим характеристикам наиболее соответствует торулородину ($t_R = 13,0–13,5$ мин; $\lambda_{\max} = 470, 495, 524$ нм; $m/z [M^+H]^+ = 565,3$; $m/z [M^-H]^- = 564,3$ [11]). Пики 2, 3 идентифицированы как торулен ($t_R = 15,5–15,7$ мин; $\lambda_{\max} = 460, 485, 518$ нм; $m/z [M^-H]^- = 534,4$ [11]). Характеристики пика 4 указывают на его принадлежность γ -каротину ($\lambda_{\max} = 439, 461, 491$ нм [13]; $t_R = 15,7–16,0$ мин; $\lambda_{\max} = 430, 460, 489$ нм; $m/z [M^+H]^+ = 537,4$; $m/z [M^-H]^- = 536,4$ [11]), а пика 5 – ζ -каротину ($\lambda_{\max} = 378, 400, 425$ нм [13]). Пики 6, 8 идентифицировать не удалось, а пик 7 соответствует β -каротину.

Анализ количественного соотношения отдельных пигментов показал, что на долю β -каротина, торулина и торулородина приходится соответственно 16, 40 и 32 % от суммарного количества каротиноидов, синтезируемых *R. glutinis* БИМ Y-159 при температуре 25 °С. В табл. 4 представлены данные литературы, свидетельствующие о зависимости соотношения отдельных составляющих каротиноидных комплексов у представителей рода *Rhodotorula* от температурных режимов их роста. Например, с повышением температуры культивирования дрожжевых грибов продукция ими β -каротина уменьшается, а торулородина – растет [7; 14–16].

Т а б л и ц а 4. Влияние температуры на синтез β -каротина, торулина и торулородина дрожжевыми грибами рода *Rhodotorula*

Table 4. Effect of temperature on β -caroten, torulene, torulorodine synthesis in yeast of the genus *Rhodotorula*

Штамм Strain	Температура культивирования, °С Cultivation temperature, °C	β -Каротин, % β -Carotene, %	Торулин, % Torulin, %	Торулородин, % Torulorodine, %	Источник информации Source of information
<i>R. glutinis</i> БИМ Y-159	25	16,0	40,0	32,0	Настоящее исследование
<i>R. glutinis</i> DBVPG 3853	30	16,0	18,0	60,1	[5]
<i>R. glutinis</i>	20	62,7	33,6	0,4	[14]
	28	38,4	48,9	7,8	
<i>R. mucilaginosa</i>	20	45,4	53,1	0,5	
	28	18,2	74,8	3,8	
<i>R. gracilis</i>	20	68,2	30,7	–	
	28	59,5	38,8	–	
<i>R. glutinis</i> no. 21	–	8,3	63,6	28,0	[15]
<i>R. glutinis</i>	5	64	4,4	4,8	[16]
	25	25,2	27,8	24,3	
<i>R. glutinis</i> 22P	20	19,0	22,8	56,0	[17]
	35	9,6	9,0	78,3	
<i>R. mucilaginosa</i> F-1	22	29,0	50,5	20,5	[7]
	25	28,7	48,0	23,2	
	28	25,9	43,2	30,9	
	31	23,9	32,6	43,5	
<i>R. mucilaginosa</i> RCL-11	30	20,21	21,35	58,33	[1]

Закключение. Дрожжевой гриб *R. glutinis* БИМ Y-159 характеризуется максимальной продукцией каротиноидов (5,7 мг/г) при выращивании в питательной среде с легкоутилизируемыми органическими источниками углеводного и азотного питания – глюкозой (11,0 %), дрожжевым экстрактом (0,2 %), пептоном (0,13 %). Добавление в среду культивирования ионов Cu^{2+} в концентрации 0,5 мМ (0,008 %) стимулирует продукцию каротиноидов на 17,5–17,8 %. Установлено, что комплекс синтезируемых *R. glutinis* БИМ Y-159 каротиноидов представлен торуленом, торулородином, ζ - и β -каротинами, а также двумя неидентифицированными компонентами. На долю β -каротина, торулина и торулородина приходится соответственно 16, 40 и 32 % от суммарного количества синтезируемых дрожжевым грибом пигментов. Планируются исследования биологической активности как отдельных компонентов, так и всего комплекса каротиноидов *R. glutinis* БИМ Y-159, а также оптимизация условий культивирования штамма в средах с отходами переработки растительного сырья для повышения продукции пигментов и разработки ресурсосберегающей технологии получения витаминно-белковой кормовой добавки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Current advances in carotenoid production by *Rhodotorula* sp. / N. Ochoa-Viñals, D. Alonso-Estrada, S. Pacios-Michelena [et al.] // *Fermentation*. – 2024. – Vol. 10, N 4. – Art. 190. <https://doi.org/10.3390/fermentation10040190>
2. Torularhodin and torulene: bioproduction, properties and prospective applications in food and cosmetics – a review / L. Zoz, J. C. Carvalho, V. Thomaz Soccol [et al.] // *Brazilian Archives of Biology and Technology*. – 2015. – Vol. 58, N 2. – P. 278–288. <https://doi.org/10.1590/S1516-8913201400152>
3. Torulene and torularhodin: “new” fungal carotenoids for industry? / A. M. Kot, S. Błażej, I. Gientka [et al.] // *Microbial Cell Factories*. – 2018. – Vol. 17. – Art. 49. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0893-z>
4. *Rhodotorula glutinis* – potential source of lipids, carotenoids, and enzymes for use in industries / A. M. Kot, S. Błażej, A. Kurcz [et al.] // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2016. – Vol. 100. – P. 6103–6117. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7611-8>
5. Buzzini, P. Production of carotenoids by strains of *Rhodotorula glutinis* cultured in raw materials of agro-industrial origin / P. Buzzini, A. Martini // *Bioresource Technology*. – 2000. – Vol. 71, N 1. – P. 41–44. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00056-5)
6. Use of several waste substrates for carotenoid-rich yeast biomass production / I. Marova, M. Carnecka, A. Halienova [et al.] // *Journal of Environmental Management*. – 2012. – Vol. 95. – P. S338–S342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.018>
7. Cheng, Y. T. Using strain *Rhodotorula mucilaginosa* to produce carotenoids using food wastes / Y. T. Cheng, C. F. Yang // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. – 2016. – Vol. 61. – P. 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.12.027>
8. Sharma, R. Optimization of carotenoids production by *Rhodotorula mucilaginosa* (MTCC-1403) using agro-industrial waste in bioreactor: A statistical approach / R. Sharma, G. Ghoshal // *Biotechnology Reports*. – 2020. – Vol. 25. – Art. e00407. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00407>
9. Remediation of sugarcane vinasse using *Rhodotorula glutinis* or *Rhodotorula mucilaginosa*: Biomass morphology and its potential technological applications / J. M. Alfaro, S. I. Reyes, H. A. Cristobal [et al.] // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. – 2024. – Vol. 58. – Art. 103193. <https://doi.org/10.1016/j.cbab.2024.103193>
10. Diversity of red yeasts in various regions and environments of Poland and biotechnological potential of the isolated strains / A. M. Kot, W. Sek, M. Kieliszek [et al.] // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 2024. – Vol. 196. – P. 3274–3316. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04705-5>
11. Weber, R. W. S. Simple method for the extraction and reversed-phase high-performance liquid chromatographic analysis of carotenoid pigments from red yeasts (*Basidiomycota*, *Fungi*) / R. W. S. Weber, H. Anke, P. Davoli // *Journal of Chromatography A*. – 2007. – Vol. 1145, N 1–2. – P. 118–122. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.01.052>
12. Production kinetics and characterization of natural food color (torularhodin) with antimicrobial potential / S. Sebastian, A. D. Tripathi, V. Paul [et al.] // *Bioresource Technology Reports*. – 2023. – Vol. 24. – Art. 101652. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101652>
13. Britton, G. General carotenoid methods / G. Britton // *Methods in Enzymology*. – 1985. – Vol. 111. – P. 113–149. [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(85\)11007-4](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(85)11007-4)
14. Effect of exogenous stress factors on the biosynthesis of carotenoids and lipids by *Rhodotorula* yeast strains in media containing agro-industrial waste / A. M. Kot, S. Błażej, M. Kieliszek [et al.] // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2019. – Vol. 35. – Art. 157. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2732-8>
15. Activation of torularhodin production by *Rhodotorula glutinis* using weak white light irradiation / H. Sakaki, T. Nakanishi, A. Tada [et al.] // *Journal of Bioscience and Bioengineering*. – 2001. – Vol. 92, N 3. – P. 294–297. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(01\)80265-6](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(01)80265-6)
16. Simpson, K. L. Biosynthesis of yeast carotenoids / K. L. Simpson, T. O. Nakayama, C. O. Chichester // *Journal of Bacteriology*. – 1964. – Vol. 88, N 6. – P. 1688–1694. <https://doi.org/10.1128/jb.88.6.1688-1694.1964>
17. Formation of carotenoids by *Rhodotorula glutinis* in whey ultrafiltrate / G. Frengova, E. Simova, K. Pavlova [et al.] // *Biotechnology and Bioengineering*. – 1994. – Vol. 44, N 8. – P. 888–894. <https://doi.org/10.1002/bit.260440804>

References

1. Ochoa-Viñals N., Alonso-Estrada D., Pacios-Michelena S., García-Cruz A., Ramos-González R., Faife-Pérez E., Michelena-Álvarez L. G., Martínez-Hernández J. L., Iliná A. Current advances in carotenoid production by *Rhodotorula* sp. *Fermentation*, 2024, vol. 10, no. 4, art. 190. <https://doi.org/10.3390/fermentation10040190>
2. Zoz L., Carvalho J. C., Soccol V. T., Casagrande T. C., Cardoso L. Torularhodin and torulene: bioproduction, properties and prospective applications in food and cosmetics – a review. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 278–288. <https://doi.org/10.1590/S1516-8913201400152>
3. Kot A. M., Błażej S., Gientka I., Kieliszek M., Bryś J. Torulene and torularhodin: “new” fungal carotenoids for industry? *Microbial Cell Factories*, 2018, vol. 17, art. 49. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0893-z>
4. Kot A. M., Błażej S., Kurcz A., Gientka I., Kieliszek M. *Rhodotorula glutinis* – potential source of lipids, carotenoids, and enzymes for use in industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, vol. 100, pp. 6103–6117. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7611-8>
5. Buzzini P., Martini A. Production of carotenoids by strains of *Rhodotorula glutinis* cultured in raw materials of agro-industrial origin. *Bioresource Technology*, 2000, vol. 71, no. 1, pp. 41–44. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00056-5)

6. Marova I., Carnecka M., Halienova A., Certik M., Dvorakova T., Haronikova A. Use of several waste substrates for carotenoid-rich yeast biomass production. *Journal of Environmental Management*, 2012, vol. 95, pp. S338–S342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.018>
7. Cheng Y. T., Yang C. F. Using strain *Rhodotorula mucilaginosa* to produce carotenoids using food wastes. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, vol. 61, pp. 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.12.027>
8. Sharma R., Ghoshal G. Optimization of carotenoids production by *Rhodotorula mucilaginosa* (MTCC-1403) using agro-industrial waste in bioreactor: A statistical approach. *Biotechnology Reports*, 2020, vol. 25, art. e00407. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00407>
9. Alfaro J. M., Reyes S. I., Cristobal H. A., Martearena M. R., Baigori M. D., Pera L. M. Remediation of sugarcane vinasse using *Rhodotorula glutinis* or *Rhodotorula mucilaginosa*: Biomass morphology and its potential technological applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2024, vol. 58, art. 103193. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103193>
10. Kot A. M., Sęk W., Kieliszek M., Błażej S., Pobiega K., Brzezińska R. Diversity of red yeasts in various regions and environments of Poland and biotechnological potential of the isolated strains. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2024, vol. 196, pp. 3274–3316. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04705-5>
11. Weber R. W. S., Anke H., Davoli P. Simple method for the extraction and reversed-phase high-performance liquid chromatographic analysis of carotenoid pigments from red yeasts (*Basidiomycota*, *Fungi*). *Journal of Chromatography A*, 2007, vol. 1145, no. 1–2, pp. 118–122. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.01.052>
12. Sebastian S., Tripathi A. D., Paul V., Darani K. K., Agarwal A. Production kinetics and characterization of natural food color (torularhodin) with antimicrobial potential. *Bioresource Technology Reports*, 2023, vol. 24, art. 101652. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101652>
13. Britton G. General carotenoid methods. *Methods in Enzymology*, 1985, vol. 111, pp. 113–149. [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(85\)11007-4](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(85)11007-4)
14. Kot A. M., Błażej S., Kieliszek M., Gientka I., Bryś J., Reczek L., Pobiega K. Effect of exogenous stress factors on the biosynthesis of carotenoids and lipids by *Rhodotorula* yeast strains in media containing agro-industrial waste. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2019, vol. 35, art. 157. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2732-8>
15. Sakaki H., Nakanishi T., Tada A., Miki W., Komemushi S. Activation of torularhodin production by *Rhodotorula glutinis* using weak white light irradiation. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2001, vol. 92, pp. 294–297. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(01\)80265-6](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(01)80265-6)
16. Simpson K. L., Nakayama T. O., Chichester C. O. Biosynthesis of yeast carotenoids. *Journal of Bacteriology*, 1964, vol. 88, no. 6, pp. 1688–1694. <https://doi.org/10.1128/jb.88.6.1688-1694.1964>
17. Frengova G., Simova E., Pavlova K., Beshkova D., Grigorova D. Formation of carotenoids by *Rhodotorula glutinis* in whey ultrafiltrate. *Biotechnology and Bioengineering*, 1994, vol. 44, no. 8, pp. 888–894. <https://doi.org/10.1002/bit.260440804>

Информация об авторах

Шляхотко Екатерина Александровна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. E-mail: ekaterina_shl@mail.ru. ORCID: 0000-0002-8400-3182.

Сапунова Леонида Ивановна – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. E-mail: leonida@mbio.bas-net.by. ORCID: 0009-0005-4498-3912.

Лобанок Анатолий Георгиевич – академик, д-р биол. наук, гл. науч. сотрудник. E-mail: aglobanok@gmail.com.

Шабуня Полина Станиславовна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. E-mail: pshabunya@rambler.ru. ORCID: 0000-0002-5650-8538.

Information about the authors

Shlachotko Ekaterina A. – Ph. D. (Biology), Senior Researcher. E-mail: ekaterina_shl@mail.ru. ORCID: 0000-0002-8400-3182.

Sapunova Leonida I. – Ph. D. (Biology), Associate Professor, Head of the Laboratory. E-mail: leonida@mbio.bas-net.by. ORCID: 0009-0005-4498-3912.

Lobanok Anatoli G. – Academician, D. Sc. (Biology), Chief Researcher. E-mail: aglobanok@gmail.com.

Shabunya Polina S. – Ph. D. (Biology), Senior Researcher. E-mail: pshabunya@rambler.ru. ORCID: 0000-0002-5650-8538.