

КАРОТИНОИДЫ ПСИХРОТОЛЕРАНТНЫХ ДРОЖЖЕЙ ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОСТАВ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПИГМЕНТОВ¹

Грибанова Екатерина Александровна

Аспирант, старший преподаватель, Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь
lika-den98@mail.ru

CAROTENOIDS OF PSYCHROTOLERANT YEAST YEASTS ANTARCTICA. INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE COMPOSITION AND SPECTRAL PROPERTIES OF PIGMENTS

E. Gribanova

Summary. Psychrotolerant yeasts of the genera *Rhodotorula* (3 strains), *Sporobolomyces* (6 strains), *Cystobasidium* (2 strains), isolated from soil samples of East Antarctica, can produce torulene, torularhodin, ζ -carotene, γ -carotene, and δ -carotene. The highest variety of produced pigments was observed during cultivation at 18 °C. Yeasts of the genus *Rhodotorula*, producing carotenoids ζ -carotene and torulene in a ratio of 1:1.8, retained viability for up to 6 minutes of ultraviolet exposure. The presence of torularhodin in the composition ensured higher survival rates of *Rhodotorula* yeasts during irradiation.

Keywords: yeast, spectrophotometry, carotenoids, psychrophiles, torulene, carotene, torularhodin, Antarctica.

Аннотация. Психротолерантные дрожжи родов *Rhodotorula* (3 штамма), *Sporobolomyces* (6 штаммов), *Cystobasidium* (2 штамма), выделенные из почвенных образцов Восточной Антарктиды, способны продуцировать торулен, торулародин, ζ -каротин, γ -каротин и δ -каротин. Наибольшее разнообразие синтезируемых пигментов было определено при культивировании при 18 °C. Дрожжи рода *Rhodotorula*, продуцирующие каротиноиды ζ -каротин и торулен в соотношении 1:1,8, сохраняли жизнеспособность до 6 минут воздействия ультрафиолета. Наличие торулародина в составе обеспечивало более высокие показатели выживаемости дрожжей *Rhodotorula* при облучении.

Ключевые слова: дрожжи, спектрофотометрия, каротиноиды, психрофилы, торулен, каротин, торулародин, Антарктида.

Введение

Каротиноиды представляют собой органические соединения, принадлежащие к 40-углеродным терпеноидам. Они делятся на две группы: каротины, в основном состоящие из углеводов (α -каротин, β -каротин, γ -каротин, торулен и др.), и ксантофиллы, молекулы которых включают углерод, водород и кислород (астаксантин, лютеин, зеаксантин, β -криптоксантин, фукоксантин и кантаксантин). Каротиноидам приписываются разнообразные биологические функции (фотопротекторная, антиоксидантная, провитамин А активность, иммуномодулирующая и другие). Главная роль данных соединений заключается в защите клетки от пагубного воздействия реактивных форм кислорода [1] и различных видов излучения (проникающей радиации, УФ-излучения, лучей видимой и инфракрасной области света) [2].

Значительный интерес для научных исследований вызывают красные дрожжи, которые способны синтези-

ровать каротиноидные соединения. Наиболее детально изученными и часто применяемыми для извлечения пигментов (β -каротин, торулен и торулародин) являются дрожжи рода *Rhodotorula* [2–5].

В 2018 году в исследованиях М. Кот [11] был предложен путь биосинтеза торулена и торулародина в дрожжевых клетках из геранилгеранилпирофосфата (ГГПП). В процессе синтеза молекула γ -каротина является предшественником для биосинтеза β -каротина и торулена. Последний, в ходе реакций гидроксирования и окисления, трансформируется до торулародина [10].

В своей структуре торулен и торулародин содержат одно β -иононовое кольцо (см. рисунок 1), соединённое с полиеновой цепью [1]. Согласно спектрофотометрическому исследованию [3], максимумы поглощения торулена находятся при длинах волн 460, 484 и 518 нм в петролейном эфире, а для торулародина — 465, 492 и 523 нм в том же растворителе.

¹ Данная работа была выполнена при поддержке проекта, финансируемого Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований № 20231 168 («Продукция биологически активных веществ психрофильными дрожжами, выделенными из образцов почв Восточной Антарктиды»).

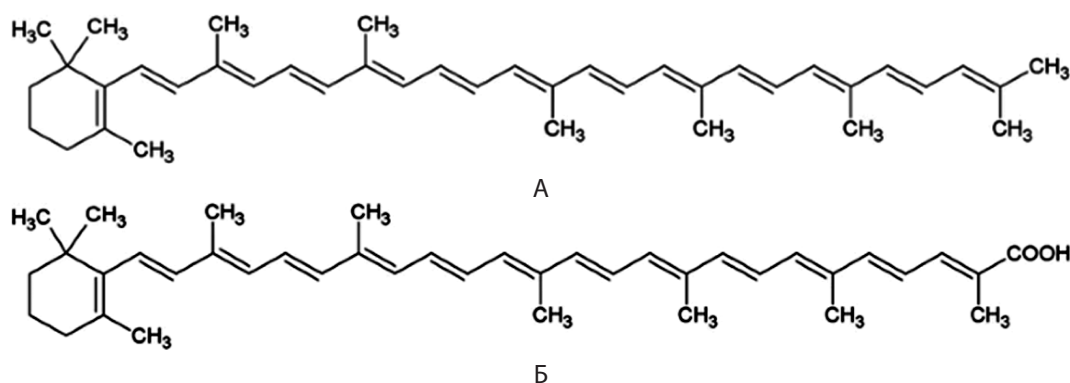


Рис. 1. Структурные формулы торулена (А) и торулародина (Б) [11]

Торулен и торулародин способны синтезировать дрожжи родов *Cystofilobasidium* [1], *Dioszegia* [12, 13], *Neurospora* [14], *Rhodotorula* [2, 18], *Rhodospiridium* [15, 19], *Sporidiobolus* [16, 20] и *Sporobolomyces* [17, 21]. Несмотря на то, что эти роды дрожжей охватывают множество видов, лишь немногие из них способны аккумулировать значительные концентрации данных каротиноидов. Учитывая эффективность биосинтеза, основными продуцентами этих двух соединений считаются дрожжи родов *Rhodotorula*, *Sporidiobolus* и *Sporobolomyces*. В зависимости от концентрации пигментов цвет колоний дрожжей варьируется от розового до красного оттенка [22].

Экспериментальные исследования позволили выявить их физиологические и биохимические функции. Исследования Сакаки [7] показали, что по сравнению с β -каротином торулародин, выделенный из *R. glutinis*, демонстрирует более выраженную способность к нейтрализации пероксильных радикалов. Более того, его антиоксидантный эффект превосходит действие α -токоферола [6]. Исследования Молин [2, 8] фотозащитных свойств каротиноидов показали, что накопление торулародина в клетках является ключевым этапом, обеспечивающим устойчивость дрожжей к воздействию УФ-В-излучения. Предполагается, что каротиноиды могут быть вовлечены в модуляцию проницаемости мембран, что способствует усилению клеточной защиты от окислительного стресса и радиационного повреждения [9].

Ранее в исследованиях авторами была определена способность синтезировать каротиноиды у психротолерантных дрожжей родов *Rhodotorula*, *Sporobolomyces* и *Cystobasidium*, что приводило к окрашиванию колоний дрожжей в кораллово-красный, светло-розовый или оранжевый цвета [23, 24].

Целью данного исследования являлось определение влияния температуры на профиль синтезируемых пигментов дрожжами, а также связь между составом пигментов и устойчивостью дрожжей к УФ-излучению.

Материалы и методы

Штаммы дрожжей. *Rhodotorula glutinis* БИМ Y-375, *Rh. glutinis* БИМ Y-376, *Rh. glutinis* БИМ Y-369,

Sporobolomyces phaffii БИМ Y-378, *Sp. phaffii* БИМ Y-367, *Sp. phaffii* БИМ Y-374, *Sp. phaffii* БИМ Y-370, *Sp. phaffii* БИМ Y-371, *Sp. phaffii* БИМ Y-372, *Cystobasidium ritchiei* БИМ Y-366, *C. ritchiei* БИМ Y-368. Дрожжи были выделены [26] из образцов мелкозёма Восточной Антарктиды, собранных на территории Земли Эндерби, станции Молодежная, полевой базе Гора Вечерняя, а также гор Принс-Чарльз [25, 27].

Культивирование дрожжей. Штаммы дрожжей были инокулированы в бульонную среду Сабуро (30 мл) в колбы Эрленмейера при аэрации 140 об/мин до достижения стационарной фазы роста при температуре 18 °С.

Устойчивость к УФ-излучению. Штаммы дрожжей, достигшие стационарной фазы роста, разводили до получения изолированных колоний на агаре Сабуро (КОЕ $\sim 1\text{--}5 \cdot 10^9$ кл/мл) и подвергали облучению ультрафиолетом используя УФ-лампы с длиной волны 253,7 нм на расстоянии 20 см. Облучение проводили с интервалом в 1 минуту.

Экстракция каротиноидов. С целью идентификации продуцируемых пигментов и обеспечения максимального выхода биомассы дрожжевых клеток, всю накопленную биомассу отделяли от культуральной жидкости, промывали и подвергали анализу пигментного состава. Извлечение пигментов проводили кислотным методом [28] с использованием 96 % этилового спирта.

Спектрофотометрический анализ каротиноидов. Измерения поглощения экстрактов проводили в видимом диапазоне длин волн с применением спектрофотометра Solar PV 1251C. Количество пигментов рассчитывали по величине максимума поглощения с использованием уравнения Келли и Хармона [3, 29]. Типичной характеристикой каротиноидов является наличие трех пиков поглощения в видимом спектре [3, 6].

Результаты и их обсуждение

В предварительных исследованиях было определено, что психротолерантные дрожжи родов *Rhodotorula*,

Sporobolomyces и *Cystobasidium*, выделенные из образцов почв Восточной Антарктиды, способны синтезировать комплексы пигментов, включающие торулен, торулародин, ζ -каротин, γ -каротин и δ -каротин в различных соотношениях. Более того установлено, что источник углевода влияет на количество и спектр синтезируемых пигментов [23, 24].

Исследование влияния температуры культивирования на рост и синтез пигментов дрожжами позволит выявить оптимальные условия синтеза пигментов для каждого исследуемого штамма.

Результаты гравиметрических исследований зависимости роста психротолерантных дрожжей от температуры культивирования показали, что оптимальная температура для накопления влажной биомассы у штаммов *Sporobolomyces phaffii* является 22 °C (см. рисунок 2 А). Максимальный выход биомассы при данной температуре был зафиксирован у штамма *Sp. phaffii* БИМ Y-371 и составил $2,119 \pm 0,015$ г. При снижении температуры культивирования до 18 °C выход биомассы снижался от 9,8 % (у штамма *Sp. phaffii* БИМ Y-367) до 26,5 % (у штамма *Sp. phaffii* БИМ Y-371) и составлял $1,61 \pm 0,02$ г и $1,56 \pm 0,01$ г

соответственно. Повышение температуры культивирования до 28 °C приводило к значительному уменьшению метаболической активности дрожжей вплоть до её полного отсутствия (штамм *Sp. phaffii* БИМ Y-374 не рос при данной температуре).

Гравиметрические исследования особенностей роста дрожжей родов *Rhodotorula* и *Cystobasidium* не имели идентичных закономерностей, что свидетельствовало о наличии отличных метаболических аспектов развития штаммов внутри одного рода/вида (см. рисунок 2 Б и 2 В). При этом максимальный выход биомассы у представителей рода *Rhodotorula* был зафиксирован при 22 °C у *Rh. glutinis* БИМ Y-375 и составлял $2,28 \pm 0,03$ г. В то же время дрожжи рода *Cystobasidium* проявили меньшую метаболическую активность и наибольшее значение влажной биомассы было определено при 18 °C у *C. ritchiei* БИМ Y-368 — $1,23 \pm 0,01$ г.

Спектрофотометрический анализ пигментов

Биомассу исследуемых дрожжей подвергали кислотному гидролизу с последующей экстракцией пигментов с использованием этилового спирта. По данным спек-

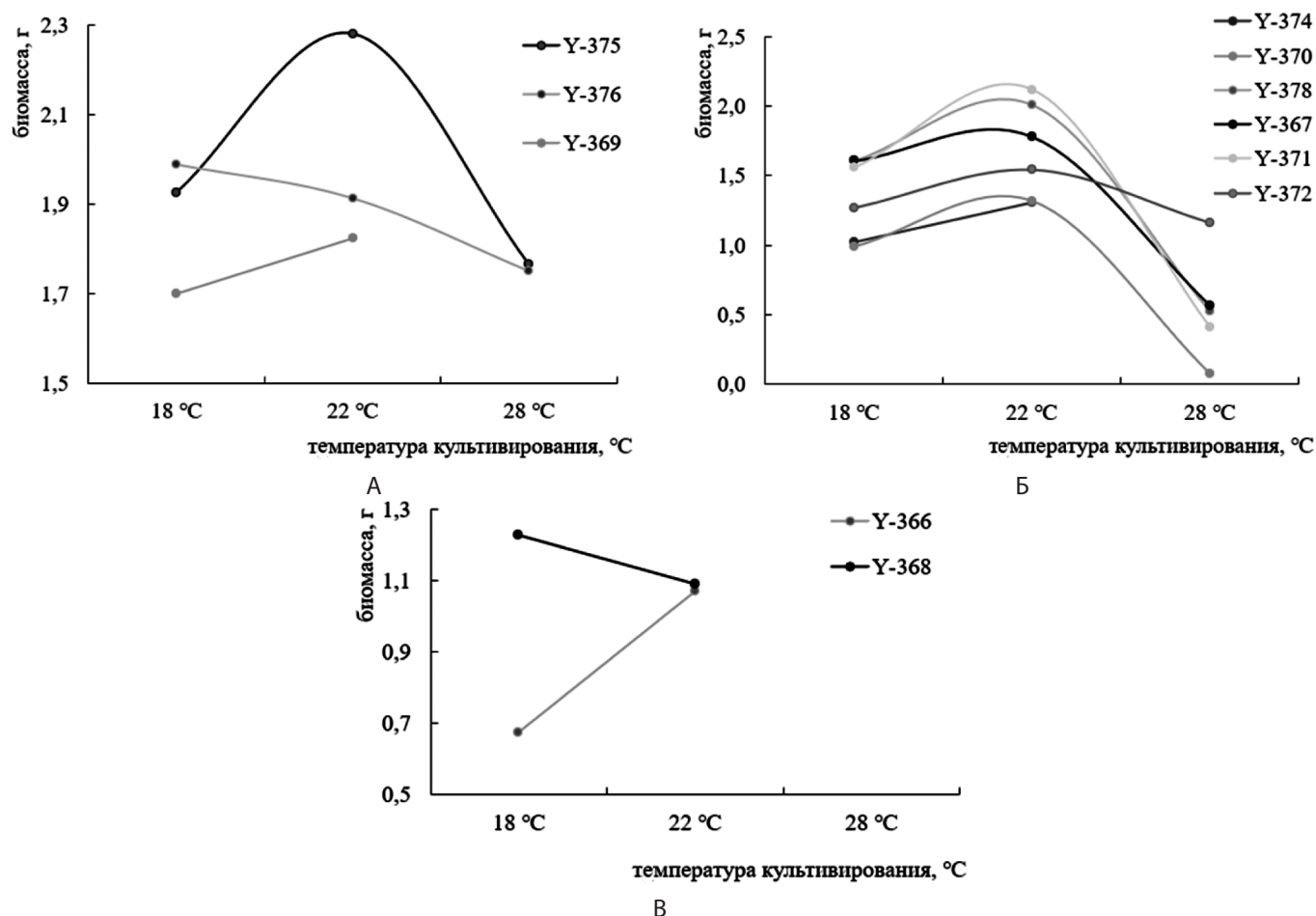
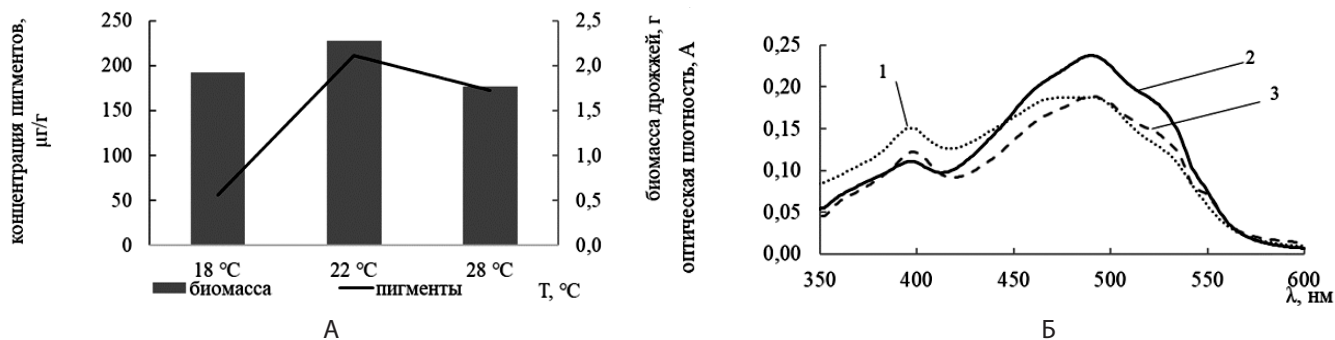


Рис. 2. Гравиметрические исследования роста дрожжей родов *Sporobolomyces* (А), *Rhodotorula* (Б) и *Cystobasidium* (В) при различных температурах культивирования



А — гравиметрические исследования синтеза биомассы и суммарного выхода каротиноидных пигментов от температуры культивирования; Б — спектрофотометрические исследования состава каротиноидов: 1 (18 °C), 2 (22 °C), 3 (28 °C)

Рис. 3. Результаты исследований роста и пигмент образования каротиноидов на примере штамма *Rh. glutinis* БИМ Y-375

трофотометрической идентификации пигментов, представители рода *Rhodotorula* способны синтезировать преимущественно либо комплекс ζ-каротин и торулародин, либо комплекс ζ-каротин и торулен (см. таблицу 1).

Штаммы *Rh. glutinis* БИМ Y-375 и *Rh. glutinis* БИМ Y-376, синтезирующие комплекс ζ-каротин и торулародин, способны расти во всем исследуемом диапазоне температур, при этом наибольший суммарный выход пигментов наблюдался при 22 °C и составлял 211,6 и 236,5 мкг/г соответственно (см. рисунок 3 Б). Необходимо подчеркнуть, что данные гравиметрических исследований показали прямую зависимость между объемом извлекаемых пигментов и количеством дрожжевой биомассы (см. рисунок 3 А). Рост и синтез пигментов штамма *Rh. glutinis* БИМ Y-369 отличались более узким температурным диапазоном. Оптимум для синтеза пигментов был смещен в сторону 18 °C.

Представители рода *Sporobolomyces* способны синтезировать преимущественно торулен и ζ-каротин при 22 °C. В свою очередь при 18 °C спектр синтезируемых пигментов становился шире: преимущественно торулен и ζ-каротин, реже ζ-каротин и β-каротин, и только у штаммов *Sp. phaffii* БИМ Y-370 и *Sp. phaffii* БИМ Y-372 выявлен комплекс ζ-каротин и γ-каротин. У штаммов *Sp. phaffii* БИМ Y-378, *Sp. phaffii* БИМ Y-367, *Sp. phaffii* БИМ Y-371 с температурным диапазоном роста 18–28 °C наибольший выход пигментов был определен при 28 °C. В то же время результаты гравиметрических исследований прироста биомассы показали, что рост при 28 °C приводит к формированию наименьшего количества биомассы в исследуемом диапазоне температур. У штаммов *Sp. phaffii* БИМ Y-374 и *Sp. phaffii* БИМ Y-370, с возможностью роста в диапазоне температур 18–22 °C, оптимальная температура для синтеза пигментов была смещена в сторону 18 °C, в то время как выход биомассы был выше при 22 °C на 21,8 % и 24,7 % соответственно.

Среди представителей рода *Sporobolomyces* следует выделить штамм *Sp. phaffii* БИМ Y-372, который в ходе

роста синтезировал только каротины, в то время как синтез торулена или торулародина не наблюдалось. Оптимальная температура для прироста биомассы и синтеза пигментов была смещена в сторону 22 °C, что также отличалось от остальных исследуемых представителей данного рода. Состав синтезированных пигментов окрашивал колонии в оттенки светло-розового цвета. В то время как у остальных исследуемых представителей рода *Sporobolomyces* наблюдалось изменение пигмента колоний в различные оттенки кораллового и кораллового-оранжевого цвета.

Представители рода *Cystobasidium* способны синтезировать комплекс δ-каротин и ζ-каротин при 18 °C культивирования, и при повышении температуры до 22 °C наблюдали формирование торулена и ζ-каротина. Синтез каротинов в близких по значениям концентрациях приводило к формированию оранжевого пигмента, в то время как наличие торулена обеспечивало окрашивание края колонии в розовом оттенке. Наибольший выход пигментов, и биомассы клеток наблюдался при 22 °C.

В ходе исследования **наибольший выход** ζ-каротина и торулена был выявлен у *Sp. phaffii* БИМ Y-374 и составил $119,3 \pm 0,95$ мкг/г и $198,7 \pm 1,59$ мкг/г соответственно. Наибольший выход торулародина определен у *Rh. glutinis* БИМ Y-376 и составил $175,9 \pm 1,23$ мкг/г, β-каротина — $133,1 \pm 1,10$ мкг/г у *Sp. phaffii* БИМ Y-371, δ-каротина — $63,9 \pm 0,45$ мкг/г у *C. ritchiei* БИМ Y-368, γ-каротина — $122,6 \pm 0,86$ мкг/г у *Sp. phaffii* БИМ Y-370. Что позволяет рассматривать их как перспективных продуцентов данных соединений.

Устойчивость к УФ-излучению

Согласно результатам идентификации каротиноидов в диапазоне температур от 18 °C до 28 °C, наибольшее разнообразие синтезируемых комплексов пигментов было определено при 18 °C. Дальнейшие исследования влияния состава пигментов на устойчивость к УФ-излучению велись при указанной температуре культивирования.

Таблица 1.

Влияние температуры культивирования на синтез каротиноидов

штаммы	18 °C		22 °C		28 °C	
	пигмент	C, мкг/г	пигмент	C, мкг/г	пигмент	C, мкг/г
<i>Rh. glutinis</i> БИМ Y-375	ζ-каротин	21,4±0,24	ζ-каротин	56,2±0,51	ζ-каротин	56,9±0,45
	торулародин	34,4±0,41	торулародин	155,4±1,39	торулародин	115,5±1,04
<i>Rh. glutinis</i> БИМ Y-376	ζ-каротин	29,4,4±0,69	ζ-каротин	60,6±0,58	ζ-каротин	50,6±0,35
	торулародин	83,3±2,12	торулародин	175,9±1,23	торулародин	113,0±0,90
<i>Rh. glutinis</i> БИМ Y-369	ζ-каротин	77,6±0,85	ζ-каротин	68,7±0,55	—	—
	торулен	139,5±1,26	торулен	135,0±1,08	—	—
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-374	ζ-каротин	119,3±0,95	ζ-каротин	116,6±1,05	—	—
	торулен	198,7±1,59	торулен	147,7±1,34	—	—
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-370	ζ-каротин	108,3±0,76	ζ-каротин	72,5±0,07	—	—
	γ-каротин	122,6±0,86	торулен	85,3±0,59	—	—
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-378	ζ-каротин	64,3±0,58	ζ-каротин	70,0±0,56	ζ-каротин	107,0±0,85
	торулен	92,2±0,74	торулен	113,7±0,79	торулен	154,0±1,38
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-367	ζ-каротин	71,0±0,64	ζ-каротин	67,1±0,54	ζ-каротин	97,6±0,78
	торулен	113,9±1,03	торулен	122,6±0,98	торулен	137,8±0,96
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-371	ζ-каротин	84,8±0,68	ζ-каротин	60,5±0,42	ζ-каротин	99,5±0,89
	β-каротин	131,4±1,05	торулен	103,7±0,83	β-каротин	133,1±1,10
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-372	ζ-каротин	44,2±0,35	ζ-каротин	51,8±0,46	ζ-каротин	48,0±0,33
	β-каротин	34,1±0,27	γ-каротин	62,5±0,56	β-каротин	26,6±0,19
<i>C. ritchiei</i> БИМ Y-366	ζ-каротин	35,3±0,25	ζ-каротин	89,1±0,80	—	—
	δ-каротин	45,2±0,36	торулен	113,4±0,91	—	—
<i>C. ritchiei</i> БИМ Y-368	ζ-каротин	74,6±0,59	ζ-каротин	88,6±0,54	—	—
	δ-каротин	63,9±0,45	торулен	110,8±0,99	—	—

Примечание: «C» — концентрация пигмента, «-» — отсутствие роста и синтеза пигментов.

В ходе исследования облучению подвергались штаммы дрожжей достигшие стационарной фазы роста. Разведение культуры до оптимальных значений КОЕ ($\sim 1-5 \cdot 10^9$ кл/мл) позволяло избежать наслоения клеток друг на друга и получения недостоверных результатов устойчивости к излучению.

Исследование показало, что увеличение времени облучения исследуемых штаммов психротолерантных дрожжей родов *Rhodotorula*, *Sporobolomyces*, *Cystobasidium* приводило к уменьшению их выживаемости (см. таблицу 2).

Следует отметить, что наибольшая устойчивость к УФ-излучению была выявлена у штаммов рода *Rhodotorula*,

синтезирующих комплекс каротиноидов ζ-каротин и торулен в соотношении 1:1,8 (*Rh. glutinis* БИМ Y-369), что обеспечивало сохранение жизнеспособности штаммов вплоть до 6 минут облучения. Представители этого рода также синтезировали комплекс ζ-каротин и торулародин в соотношении 1:1,6 (*Rh. glutinis* БИМ Y-375) и 1:2,8 (*Rh. glutinis* БИМ Y-376), при этом увеличение синтеза торулародина обеспечивало сохранение жизнеспособности дрожжей на более высоких показателях выживаемости вплоть до 4 минут облучения УФ.

Штамм *Sp. phaffii* БИМ Y-372 синтезировал комплекс ζ-каротин и β-каротин в соотношении 1,3:1, что обеспечивало выживаемость 62,7 % популяции при 1 минуте

Таблица 2.

Изменение выживаемости дрожжей при увеличении времени облучения УФ-излучением

штаммы	18 °C		Соотношение пигментов	время облучения, мин						
	пигмент	C, мкг/г		1	2	3	4	5	6	7
<i>Rh. glutinis</i> БИМ Y-369	ζ-каротин	77,6±0,85	1	130,0	9,4	4,2	2,8	2,3	1,2	0,2
	торулен	139,5±1,26	1,8							
<i>Rh. glutinis</i> БИМ Y-375	ζ-каротин	21,4±0,24	1	90,6	54,6	15,3	1,1	0,6	0,0	0,0
	торулародин	34,4±0,41	1,6							
<i>Rh. glutinis</i> БИМ Y-376	ζ-каротин	29,4,4±0,69	1	66,7	20,9	2,3	1,2	0,9	0,9	0,06
	торулародин	83,3±2,12	2,8							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-372	ζ-каротин	44,2±0,35	1,3	62,7	13,8	7,6	5,4	1,9	0,1	0,1
	β-каротин	34,1±0,27	1							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-367	ζ-каротин	71,0±0,64	1	61,8	1,4	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	торулен	113,9±1,03	1,6							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-370	ζ-каротин	108,3±0,76	1	42,9	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	γ-каротин	122,6±0,86	1,1							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-371	ζ-каротин	84,8±0,68	1	24,4	1,5	0,9	0,8	0,7	0,1	0,0
	β-каротин	131,4±1,05	1,6							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-378	ζ-каротин	64,3±0,58	1	9,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1
	торулен	92,2±0,74	1,4							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ Y-374	ζ-каротин	119,3±0,95	1	5,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	торулен	198,7±1,59	1,7							
<i>C. ritchiei</i> БИМ Y-368	ζ-каротин	74,6±0,59	1,2	10,8	6,1	3,3	1,4	0,2	0,0	0,0
	δ-каротин	63,9±0,45	1							
<i>C. ritchiei</i> БИМ Y-366	ζ-каротин	35,3±0,25	1	6,7	5,3	2,2	1,6	0,1	0,0	0,0
	δ-каротин	45,2±0,36	1,3							

Примечание: значения выживаемости дрожжей выражены в процентах в расчете от контрольного значения КОЕ (кл/мл)

облучения и постепенного снижения численности популяции до 1,9 % при 5 минутах облучения.

Штаммы рода *Cystobasidium*, синтезирующие комплекс каротинов, проявили среднюю устойчивость к воздействию УФ-излучения, с сохранением только 10,8 % и 6,7 % популяции при 1 минуте облучения, но сохраняли минимальные показатели выживаемости вплоть до 4 минут экспозиции УФ.

Следует также отметить, что прямой зависимости между количеством синтезируемых пигментов и устойчивости от УФ-излучению выявлено не было, что может свидетельствовать о том, что не только каротиноидные

пигменты обеспечивают защиту клеток от пагубного воздействия стрессового фактора. В ходе последующих исследований планируется выявление дополнительных структур и комплексов, способствующих выживанию психротолерантных штаммов дрожжей в условиях ультрафиолетового излучения.

Заключения

Таким образом, селективное поглощение света в видимом спектре остается важным диагностическим средством для определения каротиноидных соединений посредством спектрофотометрии в ультрафиолетовом и видимом диапазонах. В свою очередь, психротолер-

рантные дрожжи Восточной Антарктиды, способны продуцировать разнообразные каротиноидные пигменты: торулен, торулародин и различные формы каротинов.

Экспериментально установлено, что дрожжи рода *Rhodotorula* синтезируют преимущественно комплексы ζ -каротина с торулародином или торуленом. Дрожжи родов *Sporobolomyces* и *Cystobasidium* формируют различные сочетания каротинов или каротинов в комплексе с торуленом при разных температурах культивирования.

Максимальная стойкость к ультрафиолетовому излучению была определена у штаммов рода *Rhodotorula*,

которые продуцировали ζ -каротин и торулен в соотношении 1:1,8, что придаёт этим микроорганизмам возможность сохранять жизнеспособность при экспозиции УФ до 6 минут. Синтез торулародина обеспечивал стабильность на несколько меньших временных интервалах облучения, но с сохранением более высоких показателей выживаемости.

Эти данные подчёркивают важность состава каротиноидных комплексов в адаптации микробных культур к экстремальным условиям окружающей среды и служат существенным критерием для дальнейших исследований в области микробной биохимии и биотехнологии.

ЛИТЕРАТУРА

- Herz S. Intermediates in the oxidative pathway from torulene to torularhodin in the red yeasts *Cystofilobasidium infirmominium* and *C. capitatum* (Heterobasidiomycetes, Fungi) / S. Herz [et al] // *Phytochemistry*. — 2007. — V. 68, №. 20. — P. 2503–2511.
- Moliné M. Photoprotection by carotenoid pigments in the yeast *Rhodotorula mucilaginosa*: the role of torularhodin / M. Moliné M. [et al] // *Photochemical & Photobiological Sciences*. — 2010. — V. 9, №. 8. — P. 1145–1151.
- Maldonado I.R. Carotenoids of yeasts isolated from the Brazilian ecosystem / I.R. Maldonado, D.B. Rodriguez-Amaya, A.R.P. Scamparini // *Food Chemistry*. — 2008. — V. 107, №. 1. — P. 145–150.
- Peterson W.J. A procedure for demonstrating the presence of carotenoid pigments in yeasts / W.J. Peterson [et al] // *Journal of Bacteriology*. — 1954. — V. 67, №. 6. — P. 708–713.
- Bonner J. Changes in polyene synthesis induced by mutation in a red yeast (*Rhodotorula rubra*). / J. Bonner, A. Sandoval, Y. W. Tang [et al] // *Arch Biochem.* — 1946. — V. 10. — P. 113–23.
- Sakaki H. Torularhodin as a potent scavenger against peroxy radicals isolated from a soil yeast, *Rhodotorula glutinis*. / H. Sakaki, T. Nakanishi, S. Komemushi [et al] // *Journal of clinical biochemistry and nutrition*. — 2001. — V. 30. — P. 1–10.
- Sakaki H. Effect of active oxygen species on the productivity of torularhodin by *Rhodotorula glutinis* No. 21. / H. Sakaki, H. Nochi, S. Komemushi [et al] // *Journal of bioscience and bioengineering*. — 2002. — V. 93, №. 3. — P. 338–340.
- Moliné M. Photoprotective role of carotenoids in yeasts: response to UV-B of pigmented and naturally occurring albino strains. / M. Moliné, D. Libkind, M.C. Diéguez [et al] // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. — 2009. — V. 95, №. 3. — P. 156–161.
- Moliné M. Production of pigments and photo-protective compounds by cold-adapted yeasts. In: Buzzini P, Margesin R, editors. / M. Moliné, D. Libkind, V. Garcia [et al] // *Cold-adapted yeasts: biodiversity, adaptation strategies and biotechnological significance*. — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. — 2013. — P. 193–224.
- Kot A.M. *Rhodotorula glutinis*—potential source of lipids, carotenoids, and enzymes for use in industries / A.M. Kot, S. Błazejak, A. Kurcz [et al] // *Applied microbiology and biotechnology*. — 2016. — V. 100. — P. 6103–6117.
- Kot A.M. Torulene and torularhodin: “new” fungal carotenoids for industry? / A.M. Kot [et al] // *Microbial Cell Factories*. — 2018. — V. 17. — P. 1–14.
- Madhour A. Biosynthesis of the xanthophyll plectanixanthin as a stress response in the red yeast *Dioszegia* (Tremellales, Heterobasidiomycetes, Fungi) / A. Madhour, H. Anke, A. Mucci [et al] // *Phytochemistry*. — 2005. — V. 66, №. 22. — P. 2617–2626.
- Villarreal P. Tolerance to ultraviolet radiation of psychrotolerant yeasts and analysis of their carotenoid, mycosporine, and ergosterol content / P. Villarreal, M. Carrasco, S. Barahona [et al] // *Current Microbiology*. — 2016. — V. 72. — P. 94–101.
- Hausmann A. A single five-step desaturase is involved in the carotenoid biosynthesis pathway to β -carotene and torulene in *Neurospora crassa* / A. Hausmann, G. Sandmann // *Fungal Genetics and Biology*. — 2000. — V. 30, №. 2. — P. 147–153.
- Lee J.J. Engineering *Rhodospiridium toruloides* with a membrane transporter facilitates production and separation of carotenoids and lipids in a bi-phasic culture / J.J. Lee, L. Chen, B. Cao [et al] // *Applied Microbiology and Biotechnology*. — 2016. — V. 100. — P. 869–877.
- Li C. Increased torulene accumulation in red yeast *Sporidiobolus pararoseus* NGR as stress response to high salt conditions / C. Li, N. Zhang, B. Li [et al] // *Food Chemistry*. — 2017. — V. 237. — P. 1041–1047.
- Dimitrova S. Production of metabolites with antioxidant and emulsifying properties by Antarctic strain *Sporobolomyces salmonicolor* AL1 / S. Dimitrova, K. Pavlova, L. Lukanov [et al] // *Applied biochemistry and biotechnology*. — 2013. — V. 169. — P. 301–311.
- Sakaki H. 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. — V. 92, №. 3. — P. 294–297.
- Sperstad S. Torularhodin and torulene are the major contributors to the carotenoid pool of marine *Rhodospiridium babjevae* (Golubev) / S. Sperstad, B.F. Lutnaes, S.K. Stormo [et al] // *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. — 2006. — T. 33, №. 4. — P. 269–273.
- Du C. Torularhodin, isolated from *Sporidiobolus pararoseus*, inhibits human prostate cancer LNCaP and PC-3 cell growth through Bcl-2/Bax mediated apoptosis and AR down regulation / C. Du, Y. Li, Y. Guo [et al] // *RSC Advances*. — 2015. — V. 5, №. 129. — P. 106387–106395.

21. Razavi S.H. Effect of temperature and pH on the growth kinetics and carotenoid production by *Sporobolomyces ruberrimus* H110 using technical glycerol as carbon source / S.H. Razavi, I. Marc // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE). — 2006. — V. 25, №. 3. — P. 59–64.
22. Zoz L. Torularhodin and torulene: bioproduction, properties and prospective applications in food and cosmetics—a review / L. Zoz, J.C. Carvalho, V.T. Soccol [et al] // Brazilian Archives of Biology and Technology. — 2014. — V. 58, №. 2. — P. 278–288.
23. Gribanova E.A. Effect of carbohydrate source on the synthesis of carotenoid pigments by psychrotolerant yeasts *Rhodotorula*, *Sporobolomyces* and *Cystobasidium* / E.A. Gribanova // «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration». Scientific publishing house Infinity, 2025. — P. 134–142.
24. Грибанова Е.А. Спектрофотометрическое определение каротиноидных пигментов в клетках психротолерантных дрожжей / Е.А. Грибанова, Косило А.Ю. // New trends in science, society and technology: Collection of articles II International Scientific and Practical Conference. — Melbourne: ICSRD «Scientific View». — 2025. — P. 5–18.
25. Gribanova E. Diversity and biotechnological potential of yeasts isolated from different ecosystems of East Antarctica / E. Gribanova, V. Miamin // Modern mycology in Russia. — 2024. — №. 10. — P. 55–58.
26. Gribanova E. Physiological and biochemical traits of yeasts from soils of various ecosystems of East Antarctica / E. Gribanova, V. Miamin // Ukrainian Antarctic Journal. — 2021. — №. 2. — P. 106–116.
27. Gribanova E. Spectrophotometric determination of carotenoid pigments in psychrotolerant yeast cells / E. Gribanova, A. Kosilo // New trends in science, society, and technology: collection of articles II International Scientific and Practical Conference. — Melbourne: ICSRD «Scientific View». — 2025. — P. 5–18.
28. Holzapfel N. The Potential role of lycopene for the prevention and therapy of prostate cancer: from molecular mechanisms to clinical evidence // International Journal of Molecular Sciences. — 2013. — №. 7. — P. 14620–14646.
29. Schmidt I. Biotechnological production of astaxanthin with *Phaffia rhodozyma* / *Xanthophyllomyces dendrorhous* // Applied Microbiology and Biotechnology. — 2011. — №. 3. — P. 555–571.

© Грибанова Екатерина Александровна (lika-den98@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»