

Научная статья

УДК 79.8; 579.083.13; 577.117.3; 579.22

<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.1.9>

Исследование видового состава дрожжевых грибов Восточной Антарктиды и возможности их использования для получения меланина

Екатерина Александровна Грибанова^{1*}, Владимир Петрович Курченко²,
Игорь Иосифович Азарко³, Владислав Евгеньевич Мямин⁴, Наталья Владимировна Дудчик⁵,
Игорь Владимирович Ржепаковский⁶, Алексей Дмитриевич Лодыгин⁷

^{1, 2, 3, 4} Белорусский государственный университет (д. 4, пр. Независимости, Минск, 220030, Беларусь)

⁵ Научно-практический центр гигиены (д. 8, ул. Академическая, Минск, 220012, Беларусь)

^{6, 7} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Россия)

¹ lika-den98@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-1562-4218>

² kurchenko@tut.by; <https://orcid.org/0000-0002-4859-2389>

³ azarko@bsu.by

⁴ vladmiamin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6379-2207>

⁵ n_dudchik@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5877-9307>

⁶ irzhepakovskii@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2632-8923>

⁷ allodygin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8460-2954>

*Автор, ответственный за переписку

Аннотация. В статье представлены материалы исследования видовой принадлежности дрожжевых грибов Восточной Антарктиды, проведенные на основе сравнительного анализа генетических последовательностей, кодирующих 18S рРНК и особенностей метаболизма углеводов. Анализ взаимосвязи филогенетических и физиологических параметров метаболизма пентоз, гексоз и дисахаридов позволил идентифицировать из 21 изолята дрожжей 2 штамма из отдела Ascomycota и 19 штаммов из отдела Basidiomycota. Согласно результатам анализа аскомицетные дрожжи эффективно метаболизируют весь исследуемый спектр углеводов. Для различных видов базидиомицетов характерны межродовые и внутривидовые отличия в субстратной специфичности метаболизма углеводов. В качестве вторичного метаболита у аскомицетных дрожжей *Dothiora* sp. БИМ У-383 содержится меланиновый пигмент. Выделенный меланин проявлял антиоксидантную, генопротекторную и антибактериальную активности.

Ключевые слова: идентификация, дрожжи, углеводный обмен, кластерный анализ, меланин.

Для цитирования: Грибанова Е. А., Курченко В. П., Азарко И. И., Мямин В. Е., Дудчик Н. В., Ржепаковский И. В., Лодыгин А. Д. Исследование видового состава дрожжевых грибов Восточной Антарктиды и возможности их использования для получения меланина // Современная наука и инновации. 2026. № 1. С. 112–127. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.1.9>

Финансирование: Работа выполнена при поддержке проекта, финансируемого БРФФИ № 20231168 «Продукция биологически активных веществ психрофильными дрожжами, выделенными из образцов почв Восточной Антарктиды».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025;
одобрена после рецензирования 01.02.2026;
принята к публикации 01.03.2026.

Research article

A study of the species composition of yeast fungi in East Antarctica and the possibility of using them to produce melanin

Ekaterina A. Griбанова^{1*}, Vladimir P. Kurchenko², Igor I. Azarko³, Vladislav E. Myamin⁴, Natal'ya V. Dudchik⁵, Igor V. Rzhepakovsky⁶, Alexey D. Lodygin⁷

^{1, 2, 3, 4} Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., Minsk, 220030, Belarus)

⁵ The Scientific and Practical Center of Hygiene (8, Akademicheskaya st., Minsk, 220012, Belarus)

^{6, 7} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin st., Stavropol, 355017, Russia)

¹ lika-den98@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-1562-4218>

² kurchenko@tut.by; <https://orcid.org/0000-0002-4859-2389>

³ azarko@bsu.by

⁴ vladmiamin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6379-2207>

⁵ n_dudchik@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5877-9307>

⁶ irzhepakovskii@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2632-8923>

⁷ allodygin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8460-2954>

*Corresponding author

Abstract. This article presents data from a study of the species affiliation of yeast fungi in East Antarctica, conducted using a comparative analysis of genetic sequences encoding 18S rRNA and carbohydrate metabolism characteristics. Analysis of the relationships between phylogenetic and physiological parameters of pentose, hexose, and disaccharide metabolism enabled the identification of 21 yeast isolates, including 2 strains from the Ascomycota phylum and 19 strains from the Basidiomycota phylum. According to the analysis, ascomycetous yeasts efficiently metabolize the entire range of carbohydrates studied. Different basidiomycete species exhibit intergeneric and intraspecific differences in the substrate specificity of carbohydrate metabolism. The ascomycetous yeast *Dothiora* sp. BIM Y-383 contains the melanin pigment as a secondary metabolite. The isolated melanin exhibited antioxidant, genoprotective, and antibacterial activity.

Keywords: identification, yeast, carbohydrate metabolism, cluster analysis, melanin.

For citation: Kurchenko VP, Griбанова EA, Azarko II, Myamin VE, Dudchik NV, Rzhepakovsky IV, Lodygin AD. A study of the species composition of yeast fungi in East Antarctica and the possibility of using them to produce melanin. *Modern Science and Innovations*. 2026;(1):112-127. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.1.9>

Funding: The work was supported by the project funded by the BRFFR No. 20231168 “Production of biologically active substances by psychrophilic yeast isolated from soil samples of East Antarctica”.

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 01.12.2025;

approved after reviewing 01.02.2026;

accepted for publication 01.03.2026.

Введение. Антарктида характеризуется экстремальными климатическими условиями, при этом самая низкая зарегистрированная температура составляет минус 90 °С. Примерно 98 % континента покрыто льдом и снегом, а прибрежные летние температуры обычно колеблются от 5 °С до 35 °С [1]. Известно, что большинство форм жизни в Антарктиде обитают в этих свободных ото льда и снега областях. Географическая изоляция и экстремальные факторы окружающей среды обуславливают интерес к изучению эндемичных микроорганизмов Антарктиды [2]. Микобиота Восточной Антарктиды характеризуется разнообразием экологических адаптационных механизмов, включающим такие признаки, как наличие пигментации, мицелиально-дрожжевой диморфизм, меристематический тип роста [3–7]. Наличие эндемичных видов подтверждает уникальность биоты континента, в то же время регистрируются случаи биполярного эндемизма, которые

свидетельствуют о вероятных процессах миграции или конвергентной эволюции между полярными экологическими системами Антарктиды и Арктики [8]. Исследование микобиоты Антарктиды вносит существенный вклад в понимание механизмов выживания микроорганизмов в экстремальных климатических условиях, а также открывает перспективы для поиска уникальных продуцентов биоактивных соединений с широким потенциалом применения.

В последние годы российскими и белорусскими антарктическими экспедициями выявлено большое разнообразие микобиоты в Восточной Антарктиде, которая нуждается в таксономической идентификации [9]. Ранее для видовой идентификации дрожжевых грибов широко использовались морфологические, физиологические и биохимические признаки. В настоящее время интенсивно развивается их филогенетическая систематика, основанная на сходстве нуклеотидных последовательностей участков генов, для которых характерна высокая консервативность [10]. Такие генетические маркеры позволяют выявить филогенетическое сходство на различных таксономических уровнях. В настоящее время предложено использовать наиболее информативные консервативные маркеры с митохондриальной и хромосомной локализацией [11]. Первичную информацию о филогенетических связях дрожжевых грибов можно получить, исследуя генетическую последовательность фрагментов гена 18S рРНК. Использование расшифрованных генетических последовательностей дрожжевых грибов позволяет построить филогенетические деревья, отражающие их родство и эволюционные связи [12]. Вместе с тем молекулярно-генетические методы имеют ряд недостатков при идентификации видов дрожжевых грибов, которые могут быть восполнены при описании физиологических, морфологических, цитологических, биохимических и экологических признаков.

При исследовании изолятов дрожжевых грибов Восточной Антарктиды актуальным является использование комплексного подхода при описании молекулярно-генетических, физиологических и биохимических особенностей дрожжей. Такой многоуровневый подход позволяет осуществлять детальный анализ состава микобиоты и её потенциала для практического использования. В связи с этим проведена филогенетическая классификация изолятов дрожжей, исследована их субстратная специфичность в метаболизме углеводов, а также биосинтез меланина, который является важным фактором в адаптации к экстремальным условиям среды обитания. Исследование видовой специфичности биохимических процессов, обеспечивающих адаптацию к условиям обитания создают предпосылки практического использования дрожжевых грибов.

Материалы и методы исследования. В качестве объектов исследований использовали 21 штамм дрожжей, выделенных из образцов мелкозема Восточной Антарктиды (станция Молодежная, полевая база Гора-Вечерняя (Земля Эндерби), горы Принс-Чарльз (Земля Мак-Робертсона)). Образцы были отобраны участниками Белорусских антарктических экспедиций в период 2012–2017 гг. По результатам идентификации культуры дрожжей были депонированы в Белорусскую коллекцию непатогенных микроорганизмов Института микробиологии НАН Беларуси. Нуклеотидные последовательности фрагментов генов 18S рРНК депонированы в базу данных Генбанк НЦБИ (GenBank: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>) [9].

Источники выделения дрожжей: гиполиты, Земля Эндерби, холмы Ларсеманн: *M. parantarcticus* БИМ Y-380, *M. parantarcticus* БИМ Y-365, *L. fragarium* БИМ Y-364, *Leucosporidium* sp. БИМ Y-363; эндоциты, Земля Эндерби, холмы Ларсеманн: *Naganishia* sp. БИМ Y-379, *Mycochaetophora* sp. БИМ Y-382; гиполиты, Земля Эндерби, холмы Тала: *Cystobasidium* sp. БИМ Y-368, *Cystobasidium* sp. БИМ Y-366, *Dothiora* sp. БИМ Y-383, *Solicoccozyma* sp. БИМ Y-373, *Rh. glutinis* БИМ Y-369, *Sp. 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; вода небольшого пруда в скальной ванне, Земля Эндерби, холмы Тала, мыс возле бухты Лазурная: *Glaciozyma* sp. БИМ Y-381; гиполиты, Земля Мак-Робертсона, горы Принс-Чарльз: *Rh. glutinis* БИМ Y-376, *Rh. glutinis* БИМ Y-375, *Leucosporidium* sp. БИМ Y-377.

Исследование утилизации углеводов в полужидкой питательной среде. Исследование проводили с использованием полужидкой питательной среды Хью-Лейфсона с модификациями (пептон 2 г, NaCl 5 г, K_2HPO_4 0,3 г, $MgSO_4$ 0,7 г, KH_2PO_4 1 г, $(NH_4)_2SO_4$ 3 г, $CaCl_2$ 0,04 г, углеводов 2 %, агар-агар 0,25 % на 1 литр среды) (далее среда Хью-Лейфсона). В качестве вносимого в среду углевода использовали пентозу (ксилозу), гексозы (глюкозу, галактозу, фруктозу и рамнозу), дисахариды (лактозу, мальтозу и сахарозу). Для контроля скорости их расщепления и синтеза органических кислот в питательную среду вносили кислотно-основной индикатор бромкрезоловый пурпурный в количестве 0,03 г/л (CAS 115-40-2). Этот индикатор позволяет определить границу перехода окраски от жёлтой к пурпурной в диапазоне pH от 5,2 до 6,8. Микробиологическим контролем чистоты среды и отсутствия самопроизвольного закисления среды в ходе длительного культивирования выступала полужидкая питательная среда Хью-Лейфсона без внесения микроорганизмов.

Построение тепловых карт. С использованием программного обеспечения ClustVis 2.0 (<http://biit.cs.ut.ee/clustvis/>) построены тепловые карты при помощи пакета heatmap R (версии 0.7.7) [13]. Тепловая карта визуализирует время достижения кислотности культуральной среды до pH 5,2 при метаболизме различных пента-, гекса- и дисахаридов. В ней использовали фиолетовый цвет, отражающий отсутствие ассимиляции углеводов дрожжами за указанное время и сохранение значения кислотности культуральной среды pH 6,8. Оттенки коричневого и серого цвета отражают время, за которое дрожжи ассимилируют углеводы с образованием кислых продуктов метаболизма до значений pH 5,2. С увеличением времени необходимого для достижения показателей кислотности среды культивирования до pH 5,2 интенсивность коричневого цвета в тепловой карте уменьшается. Строки в тепловой карте представляют различные штаммы дрожжей, а столбцы – исследованные углеводные субстраты.

Для выделения и очистки меланина из сублимированного мицелия проводилась его щелочная экстракция, затем меланин осаждали 0,1М HCl, доводя раствор до pH 2. Образовавшийся хлопьевидный осадок коричневого цвета отделяли центрифугированием в течение 10 минут при 10 тыс об/мин и промывали водой до pH 7,0. Полученный меланин сублимировали и использовали для определения его парамагнитных свойств, а также для снятия электронных спектров [14].

Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) меланинов проводилась на стационарном спектрометре «RadioPan» SE/X-2543 (RadioPAN, Польша) в X-диапазоне с частотой модуляции поляризующего магнитного поля 100 кГц и амплитудой модуляции от 0,05 до 0,5 мТл при комнатной температуре. Для контроля добротности резонатора и настройки фазы использовался кристалл рубина, закрепленный в резонаторе. Индукция постоянного магнитного поля измерялась датчиком ядерного магнитного резонанса (ЯМР), а частота сверхвысокочастотного электромагнитного излучения — частотомером. Максимальная мощность СВЧ в резонаторе 200 мВт. Считывание кинетики насыщения сигнала ЭПР проводилось в диапазоне изменения мощности СВЧ-излучения от 0,5 до 30 дБ. По результатам ЭПР рассчитывалось количество парамагнитных центров в сублимированных образцах мицелия дрожжей, осадках, полученных после экстракции меланина, синтетического меланина (Sigma M8631) (Sigma-Aldrich, Великобритания) и выделенного меланина из мицелия *Dothiora* sp. БИМ Y-383 в N спин/г [15].

Спектрофотометрический анализ меланинов. С использованием спектрофотометра UV-VIS PB 2201 (Solar, Беларусь) регистрировали спектры поглощения полученных экстрактов из сублимированного мицелия и щелочных растворов синтетического меланина [14].

Антиоксидантная активность меланинов анализировалась ABTS методом, описанным ранее [16]. Путем растворения катиона радикала $ABTS^+$ в 20 мл Трис-HCl буфера (20 mM, pH 8,0) осуществляли приготовление рабочего раствора, к 1,98 мл которого добавляли 0,02 мл раствора меланина в концентрации 10 мг/мл в 0,1 М NaOH. После 3-минутного инкубационного периода измеряли оптическую плотность при 734 нм с помощью

УФ-спектрофотометра SF-102 (Interfotofizika, Москва, Россия). В качестве стандартного эталона использовали раствор тролокса, а в качестве отрицательного контроля — дистиллированную воду. Активность поглощения ABTS выражали в mM эквивалентов тролокса (mM TE).

Антимутагенную активность определяли в модифицированном тесте Эймса [17,18]. В качестве тест-моделей использовали индикаторные штаммы *Salmonella typhimurium* TA 98 и *S. typhimurium* TA 100, ауксотрофные по гистидину и биотину. В качестве прямых мутагенов использовали этидиум бромид в концентрации 10 мкг/чашку для *S. typhimurium* TA 98, азид натрия – 10 мкг/чашку для *S. typhimurium* TA 100. Антимутагенную активность оценивали в ряду концентраций гидролизатов в 3 повторностях. Для проверки статистической значимости результатов проводили расчет по методу множественных сравнений Даннетта. Уровень снижения мутирования (I_m , %) рассчитывали по формуле:

$$I_m = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \cdot 100 \%,$$

где N_1 – число ревертантов в позитивном контроле,
 N_2 – число ревертантов в опыте.

Изучение антимикробной активности образцов меланина диффузионным методом. Исследование антибактериальной активности меланина (0,1 мг/мл в 0,1 М NaOH) проводили в отношении штаммов санитарно-значимых бактерий и грибов: *Escherichia coli* ATCC 11229, *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 и *Candida albicans* ATCC 10231. Положительным контролем для оценки антибактериальной активности служил раствор ампициллина (Amp) 40 мг/мл, а для оценки антифунгальной активности – раствор нистатина (Nys) 40 мг/мл [16].

Статистическая обработка полученных результатов была выполнена в программном обеспечении Microsoft Office Excel 2016. Полученные данные были представлены в виде средних арифметических значений трех повторов экспериментов.

Результаты исследований и их обсуждение. Проведенная видовая идентификация микроорганизмов, выделенных из различных экосистем Восточной Антарктиды, показала достаточно высокое разнообразие обнаруживаемых дрожжей. Всего из 10 исследуемых образцов выделен 21 изолят культивируемых психрофильных и психротолерантных дрожжей [19].

Первичную молекулярно-генетическую идентификацию исследуемых изолятов дрожжевых грибов Восточной Антарктиды проводили, используя секвенирования высоконсервативных участков фрагментов генов 18S рРНК. Согласно результатам молекулярно-генетической идентификации, исследованные штаммы относятся к царству Fungi и принадлежат к двум отделам: *Ascomycota* (2 штамма дрожжей) и *Basidiomycota* (19 штаммов дрожжей). К первому отделу относятся представители родов *Dothiora* (1 штамм) и *Mycochaetophora* (1 штамм). Ко второму отделу — представители родов *Moesziomyces* (2 штамма), *Leucosporidium* (3 штамма), *Naganishia* (1 штамм), *Rhodotorula* (3 штамма), *Sporobolomyces* (6 штаммов), *Cystobasidium* (2 штамма), *Solicoccozyma* (1 штамм), *Glaciozyma* (1 штамм). На основании сходства нуклеотидных последовательностей их 18S рРНК построена дендрограмма, отражающая их филогенетическое родство (рис. 1) [9]. Различия между консервативными участками 18S рРНК генов прямо соответствуют степени эволюционного расстояния между исследуемыми дрожжами.

Анализ дендрограммы, построенной на основе выравнивания фрагментов гена 18S рРНК показывает разделение исследуемой группы дрожжей на два кластера. Первый кластер состоит из двух подкластеров. В первый подкластер входят базидиомицетовые дрожжи трех родов (*Moesziomyces*, *Naganishia*, *Cystobasidium*), а также род *Mycochaetophora*, который относится к отделу аскомицетов. Второй подкластер, имеющий значительное удаление от первого, представлен родами *Solicoccozyma* sp. БИМ Y-373 и *Glaciozyma* sp. БИМ Y-381, которые относятся к базидиомицетам, и представителем аскомицетовых дрожжевых грибов

Dothiora sp. БИМ Y-383. Во второй кластер вошли базидиальные дрожжи трех родов: *Rhodotorula*, *Leucosporidium*, *Sporobolomyces*.

Проведенный филогенетический анализ показывает, что существуют определенные генетические различия между исследуемыми штаммами дрожжей. Современные подходы в систематике дрожжевых грибов подразумевают использование комплекса молекулярно-генетических, физиологических и биохимических методов для описания их видовой характеристики. Важное место в систематике дрожжей занимают физиологические признаки, такие как способность к сбраживанию и аэробной ассимиляции различных углеводов [20]. Изучение способности дрожжей к ассимиляции различных углеводов в аэробных условиях культивирования позволяет определить перспективные штаммы для практического использования.

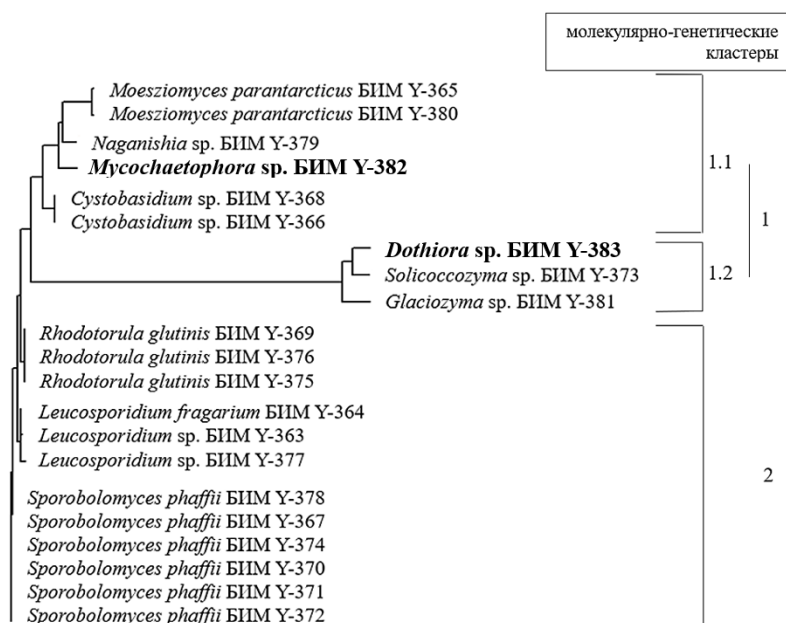


Рисунок 1. Дендрограмма, построенная на основе выравнивания фрагментов гена 18S рРНК антарктических штаммов дрожжей /

Figure 1. Dendrogram constructed based on the alignment of 18S rRNA gene fragments of Antarctic yeast strains

Физиологические особенности метаболизма углеводов дрожжами. Для исследования особенностей метаболизма углеводов различными штаммами антарктических дрожжей использовались субстраты, представленные в таблице 1. Определена субстратная специфичность в метаболизме углеводов штаммами дрожжей в полужидких питательных средах Хью-Лейфсона с добавлением различных гексоз, пентоз и дисахаридов, и кислотно-основного индикатора бромкрезолового пурпурного (CAS 115-40-2). При увеличении содержания в культуральной жидкости органических кислот окраска индикатора меняется с фиолетовой на желтую при достижении pH 5,2. Измерялось также время накопления органических кислот для достижения этого показателя кислотности.

Анализ результатов показывает, что штаммы дрожжей, входящие в различные молекулярно-генетические кластеры, представленные на рисунке 1, с различной скоростью метаболизируют различные пентозы, гексозы и дисахариды.

Брожение *ксилозы* имеет свои особенности, связанные с тем, что оно начинается с восстановления ее до ксилита с помощью фермента ксилоредуктазы (К.Ф. 1.1.1.307). Затем ксилит окисляется ксилитдегидрогеназой (К.Ф. 1.1.1.10) до ксилулозы, которая фосфорилируется ксилулокиназой (КФ 2.7.1.17) с образованием ксилулозо-5-фосфата. Последний вступает в реакции пентозофосфатного пути метаболизма углеводов. При аэробном окислении ксилозы 5 из 7 родов исследуемых штаммов дрожжей, входящих в первый молекулярно-генетический кластер, с высокой скоростью снижали кислотность культуральной среды до pH 5,2. Штаммы дрожжей этого кластера имеют значительные межродовые отличия.

Таблица 1. Изменение кислотности среды Хью-Лейфсона при метаболизме углеводов дрожжами, входящими в разные молекулярно-генетические кластеры, в аэробных условиях культивирования в течение 504 часов /

Table 1. Changes in the acidity of the Hugh-Leifson medium during carbohydrate metabolism by yeasts belonging to different molecular genetic clusters under aerobic cultivation conditions for 504 hours

Углеводы (2 %)		Молекулярно-генетические кластеры штаммов дрожжей (рисунок 1)																			
		1 кластер									2 кластер										
		1 подкластер						2 подкластер													
		<i>M. parantarcticus</i> БИМ У-380	<i>M. parantarcticus</i> БИМ У-365	<i>Naganishia</i> sp. БИМ У-379	<i>Mycochaetophora</i> sp. БИМ У-382	<i>Cystobasidium</i> sp. БИМ У-368	<i>Cystobasidium</i> sp. БИМ У-366	<i>Dothiora</i> sp. БИМ У-383	<i>Solicoccozyma</i> sp. БИМ У-373	<i>Glaciozyma</i> sp. БИМ У-381	<i>Rh. glutinis</i> БИМ У-369	<i>Rh. glutinis</i> БИМ У-376	<i>Rh. glutinis</i> БИМ У-375	<i>L. fragarium</i> БИМ У-364	<i>Leucosporidium</i> sp. БИМ У-363	<i>Leucosporidium</i> sp. БИМ У-377	<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-378	<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-367	<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-374	<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-370	<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-371
пентозы	ксилоза	96	144	144	144	504	504	96	264	1004	504	312	264	504	504	480	504	504	504	504	504
гексозы	глюкоза	144	144	12	144	24	12	48	12	12	48	24	24	24	144	24	48	24	48	24	24
	галактоза	168	168	504	72	216	480	384	168	1004	504	480	480	504	504	504	504	504	504	504	384
	фруктоза	168	120	288	120	504	504	120	288	1004	504	120	120	288	168	504	504	504	504	504	504
	рамноза	504	504	504	168	504	504	168	504	1004	504	48	144	504	504	504	504	504	504	504	504
дисаха- риды	лактоза	144	144	504	240	504	504	288	504	1004	504	504	504	384	504	504	504	504	504	504	168
	мальтоза	120	120	168	120	504	504	96	168	1004	120	72	72	120	120	168	120	168	120	120	504
	сахароза	120	120	72	120	504	504	72	120	1004	120	72	72	120	120	120	120	96	120	120	168
среда без углеводов		504	504	504	504	216	504	48	144	144	504	504	504	504	504	504	504	504	504	504	144

Примечание: желтым цветом обозначено снижение показателей кислотности среды ниже значений 5,2 в процессе культивирования; фиолетовым цветом – отсутствие изменений pH среды при культивировании дрожжей; цифрами обозначены часы культивирования; штамм *Glaciozyma* sp. БИМ У-381 является строгим психрофилом с очень медленными темпами роста, поэтому его культивировали в течение 1004 часов.

Так, для *M. parantarcticus* БИМ У-380, *M. parantarcticus* БИМ У-365, *Naganishia* sp. БИМ У-379, *Mycochaetophora* sp. БИМ У-382, входящих в первый подкластер, характерно эффективное использование ксилозы в метаболизме. Вместе с тем дрожжи *Cystobasidium* sp. БИМ У-368 и *Cystobasidium* sp. БИМ У-366 не ассимилировали ксилозу.

Представители дрожжей второго подкластера первого молекулярно-генетического кластера значительно различаются по способности метаболизировать ксилозу. Так, штамм *Glaciozyma* sp. БИМ У-381 не снижает кислотность среды культивирования. В то же время значение pH 5,2 культуральной жидкости при выращивании штаммов *Dothiora* sp. БИМ У-383 и *Solicoccozyma* sp. БИМ У-373 достигается после 96 и 264 часов культивирования соответственно. У 3 штаммов дрожжей *Rh. glutinis* БИМ У-376, *Rh. glutinis* БИМ У-375, *Leucosporidium* sp. БИМ У-377, входящих во второй молекулярно-генетический кластер, процесс ассимиляции ксилозы был малоэффективен. Об этом свидетельствует более длительное время культивирования для синтеза органических кислот. У 9 оставшихся штаммов этого кластера изменение кислотности среды после 504 часов культивирования не превышало значения pH 6,8. Таким образом, исследованные штаммы дрожжей различаются по наличию и активности ферментов, участвующих в метаболизме ксилозы, что может быть обусловлено генетическими факторами.

В отличие от ксилозы, требующей ряда биохимических трансформаций для образования фруктозо-6-фосфата, гексозы напрямую включаются в гликолиз через формирование этого интермедиата. Вне зависимости от филогенетического кластера, в который входят исследуемые виды дрожжей, наиболее эффективно метаболизм углеводов происходит при внесении глюкозы в среду. При этом время, необходимое для снижения кислотности среды до pH 5,2, для различных видов дрожжей составляло от 12 до 144 часов.

Галактоза в качестве субстрата в процессе углеводного обмена использовалась 7 видами дрожжей, входящих в первый молекулярно-генетический кластер, и только 3 видами дрожжей из второго кластера. Её метаболизм проходил наиболее медленно, о чем свидетельствует время, необходимое для существенного снижения кислотности среды культивирования. Исключение составил аскомицетный штамм *Mycochaetophora* sp. БИМ Y-382, для которого понадобилось 72 часа для синтеза кислых продуктов метаболизма галактозы.

Метаболизм *фруктозы* осуществлялся не всеми исследуемыми штаммами, но с высокой скоростью. Из 21 исследуемого штамма дрожжей только 11 использовали её в процессе углеводного обмена.

Из всех исследованных гексоз *рамноза* оказалась наименее доступной для метаболизма углеводом. Только 2 вида дрожжей из отдела *Ascomycota* (*Mycochaetophora* sp. БИМ Y-382 и *Dothiora* sp. БИМ Y-383), входящих в первый кластер, и 1 род из отдела *Basidiomycota* второго кластера (*Rh. glutinis* БИМ Y-376 и *Rh. glutinis* БИМ Y-375) использовали рамнозу в процессе метаболизма.

Таким образом, в отличие от глюкозы метаболизм галактозы, фруктозы и рамнозы исследованными родами дрожжей имеет значительные межвидовые различия и может быть связан с молекулярно-генетическим кластером, в который они входят. Стоит отметить, что все исследованные образцы почвы были отобраны с территории белорусской антарктической станции, и у обитающих в них микроорганизмов был разный доступ к органическому субстрату и талой воде для осуществления метаболических реакций. Так, например, штаммы *Rh. glutinis* БИМ Y-375 и *Rh. glutinis* БИМ Y-376, выделены из образца гиполитного происхождения Земли Мак-Робертсона, а штамм *Rh. glutinis* БИМ Y-369 из образца почвы гиполитного происхождения Земли Эндерби. Данные штаммы имеют одинаковую видовую принадлежность, что в начальных этапах исследования предполагало наличие у них схожих физиолого-биохимических свойств и особенностей углеводного обмена. Однако, как показано в таблице 1, по спектру углеводов, которые данные виды могут использовать с образованием кислых продуктов метаболизма, наблюдаются внутривидовые различия. На данном этапе исследования можно предположить, что эти внутривидовые отличия обусловлены особенностями метаболизма, которые сформировались под влиянием природных условий и связаны с разной доступностью органических субстратов в различных почвенных экосистемах.

Эффективность использования дисахаридов в метаболизме определяется выделением дрожжами в среду культивирования гликозилгидролаз (К.Ф.3.2.1), которые расщепляют множество ди-, три- и более сложных олигосахаридов. В настоящее время описано 165 гликозил-гидролаз, различающихся субстратной специфичностью ферментов при расщеплении множества олигосахаридов [22]. Ряд этих ферментов расщепляет дисахариды до гексоза, которые используются дрожжами в процессе углеводного обмена.

Использование для роста дрожжей *сахарозы* определяется биосинтезом ими β -фруктозидазы (К.Ф.3.2.1.26), которая осуществляет гидролиз данного углевода до фруктозы и глюкозы. Анализ результатов, представленных в таблице 1, показал, что из 7 родов дрожжей, входящих в первый молекулярно-генетический кластер, у 3 видов не наблюдается снижение кислотности среды культивирования в присутствии сахарозы. Это может свидетельствовать об различии данных штаммов в метаболизме этого дисахариды, который связан с её гидролизом. Исследование 12 штаммов дрожжей 3 родов, вошедших во второй молекулярно-генетический кластер, показало, что все они эффективно метаболизировали сахарозу в аэробных условиях культивирования.

Родственной по субстратной специфичности β -фруктозидазе является изомальтаза (К.Ф.3.2.1.10), которая гидролизует *мальтозу* [23]. Было определено, что виды дрожжей, которые метаболизировали сахарозу, были способны и к ассимиляции мальтозы, снижая кислотность среды культивирования до pH 5,2. Необходимо отметить, что виды дрожжей,

которые не использовали мальтозу в процессе метаболизма в аэробных условиях культивирования, не сбраживали и сахарозу, как видно из таблицы 1. Исключение составил только штамм *Sp. phaffii* БИМ Y-372, неспособный включать мальтозу в углеводный обмен с образованием кислых продуктов метаболизма.

Особенности метаболизма лактозы исследованными дрожжами связаны с выделением ими в среду культивирования лактазы (К.Ф.3.2.1.108). Этот фермент из семейства β -галактозидаз расщепляет лактозу до галактозы и глюкозы. В зависимости от видовой принадлежности дрожжей β -галактозидаза может быть представлена различными изоферментами, которые различаются субстратной специфичностью по отношению к дисахаридам. Из семи родов дрожжей, входящих в первый молекулярно-генетический кластер, только 3 вида метаболизировали лактозу, снижая кислотность pH среды до 5,2. Наблюдались внутривидовые различия в росте на среде с лактозой двух штаммов, *L. fragarium* БИМ Y-364 и *Sp. phaffii* БИМ Y-372, входящих во второй молекулярно-генетический кластер. Необходимо отметить, что 5 видов дрожжей, к которым относятся *Cystobasidium* sp. БИМ Y-368, *Dothiora* sp. БИМ Y-383, *Solicoccozyma* sp. БИМ Y-373, *Glaciozyma* sp. БИМ Y-381, *Sp. phaffii* БИМ Y-372, снижали кислотность среды культивирования Хью-Лейфсона без добавления углеводов. Это может быть связано с тем, что в состав использованной среды входят панкреатический гидролизат рыбной муки и дрожжевой экстракт, которые содержат пептиды, аминокислоты и другие биологически активные вещества, в том числе и витамины. Метаболизм аминокислот и других азотсодержащих веществ у указанных видов дрожжей приводит к образованию различных ароматических соединений, таких как сложные эфиры, высшие спирты и жирные кислоты, которые могут снижать активную кислотность среды культивирования. При этом дрожжи способны эффективно метаболизировать глюкозу, включенную в состав среды Хью-Лейфсона, и за счет этого снижать кислотность среды до pH 5,2. Это явление, возможно, связано с механизмом, при котором дрожжи в присутствии глюкозы используют её в качестве более предпочтительного источника энергии. При этом происходит катаболитная репрессия метаболизма компонентов, входящих в среду культивирования.

Для интерпретации биохимических особенностей метаболизма дрожжами различных углеводов в аэробных условиях культивирования, представленных в таблице 1, была построена тепловая карта (рис. 2).

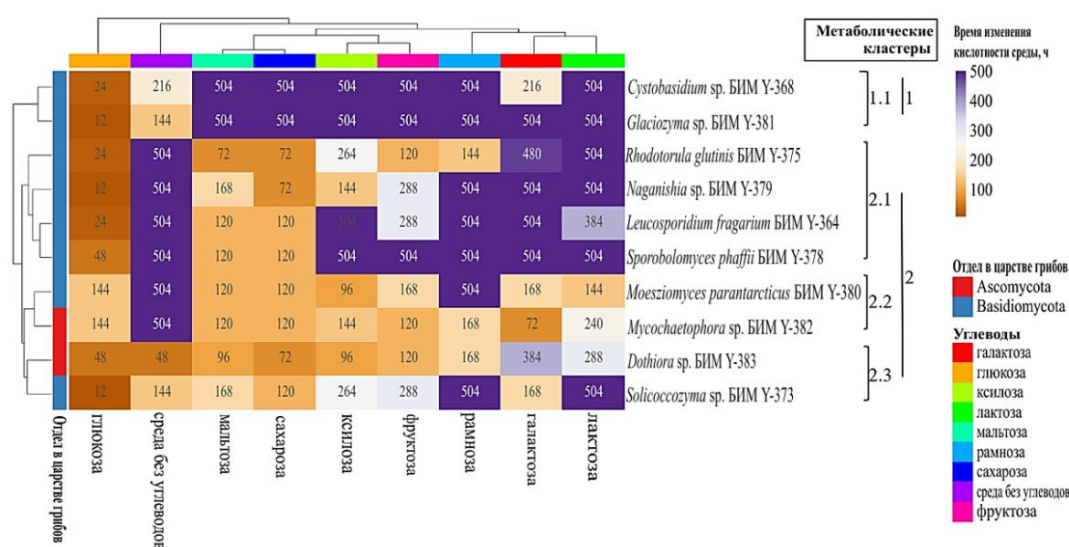


Рисунок 2. Тепловая карта физиологических особенностей метаболизма дрожжами различных углеводов в аэробных условиях культивирования /
Figure 2. Heat map of physiological features of yeast metabolism of various carbohydrates under aerobic cultivation conditions

В неё были включены виды дрожжей 10 исследованных родов, различающиеся по молекулярно-генетическим и метаболическим признакам. Она отражает метаболическую активность дрожжей при углеводном обмене различных сахаров. В зависимости от времени достижения pH 5,2 и усвояемого субстрата проведена метаболическая кластеризация 10 исследованных штаммов дрожжей. Кластеризация помогает выявить группы дрожжей со схожими физиологическими признаками, а также распределение углеводов по кластерам в зависимости от способности дрожжей включать их в свой углеводный обмен.

Как видно на рисунке 2, спектр углеводов, которые антарктические дрожжи способны включать в углеводный обмен в аэробных условиях культивирования, позволил разделить их на 2 метаболических кластера. В первый метаболический кластер вошли дрожжи родов *Cystobasidium* sp. БИМ Y-368, *Glaciozyma* sp. БИМ Y-381, которые в свою очередь входят и в первый молекулярно-генетический кластер. Эти виды дрожжей при метаболизме фруктозы, ксилозы, сахарозы, мальтозы, рамнозы и лактозы не синтезировали кислые продукты метаболизма. Второй метаболический кластер дрожжей состоит из 3 подкластеров. В первый подкластер вошли дрожжи *Rh. glutinis* БИМ Y-375, *Naganishia* sp. БИМ Y-379, *L. fragarium* БИМ Y-364 и *Sp. phaffii* БИМ Y-378, для которых характерно отсутствие ассимиляции рамнозы, галактозы и лактозы со снижением значений pH среды культивирования. Во второй подкластер вошли дрожжи *M. parantarcticus* БИМ Y-380, *Mycochaetophora* sp. БИМ Y-382, которые входят в первый молекулярно-генетический подкластер (рис. 1). В последний подкластер вошли аскомицетные дрожжи *Dothiora* sp. БИМ Y-383, способные ассимилировать все исследуемые углеводы с образованием органических кислот, и базидиальный штамм *Solicoccozyma* sp. БИМ Y-373, для которого метаболически недоступными оказались рамноза и лактоза. Таким образом деление исследованных видов дрожжей на метаболические кластеры частично совпало с их филогенетической кластеризацией на основе последовательностей 18S рРНК. Проведенное исследование позволило выявить межвидовые особенности углеводного обмена различных видов дрожжей в аэробных условиях культивирования.

Было отмечено, что при внесении ряда углеводов в среду культивирования дрожжей не приводило к изменению показателя pH. Для этих штаммов наблюдались морфофизиологические признаки роста культуры, которые проявлялись в образовании биомассы клеток в месте укола, что свидетельствует о росте дрожжей за счет компонентов среды без синтеза органических кислот.

Таким образом, анализ дендрограммы, построенной на основе выравнивания фрагментов гена 18S рРНК антарктических штаммов дрожжей выявил возможную филогенетическую близость исследуемых представителей аско- и базидиомицетов. По способности дрожжей к утилизации углеводов в аэробных условиях различных источников углеводов выявлены межвидовые различия среди представленных видов базидиомицетов, которые частично подтверждают результаты их молекулярно-генетической идентификации. В отличие от базидиомицелярных дрожжей исследованные виды аскомицетов *Mycochaetophora* sp. БИМ Y-382 и *Dothiora* sp. БИМ Y-383 эффективно метаболизировали все исследуемые углеводы.

Важным идентификационным признаком видовой принадлежности дрожжевых грибов являются их вторичные метаболиты [15]. Различные виды дрожжей способны продуцировать специфические вторичные метаболиты, встречающиеся у определённых филогенетических групп. В процессе роста некоторые виды грибов синтезируют меланиновые пигменты, благодаря чему их называют «черными дрожжами». Наличие меланиногенеза у этих видов является их идентификационным признаком [15]. В связи с этим проведено биохимическое исследование черного пигмента у психротолерантного штамма *Dothiora* sp. БИМ Y-383.

Отличительной особенностью культивирования дрожжей *Dothiora* sp. БИМ Y-383 на плотной питательной среде является образование на начальной стадии роста кремовых колоний, а по мере их роста они формируют мицелий темно-коричневого, черного цвета. Для идентификации данного пигмента он был выделен из сублимированного мицелия дрожжей, выросших в течение 16 суток при 28°C, и исследованы его спектральные свойства. Следует отметить, что среди природных биополимеров только меланины проявляют парамагнитные свойства вне зависимости от их происхождения и структурных характеристик [15]. При этом, отличительной характеристикой является интенсивный сигнал с формой линии средней между лоренцевой и гауссовой [15]. Эти наблюдения подтверждаются исследованием электронного парамагнитного резонанса пигмента, выделенного из мицелия *Dothiora* sp. БИМ Y-383. Для сравнения, на рисунке 3 представлены спектры ЭПР синтетического меланина (1) и пигмента, выделенного из мицелия дрожжей (2), которые подтверждают их меланиновый характер.

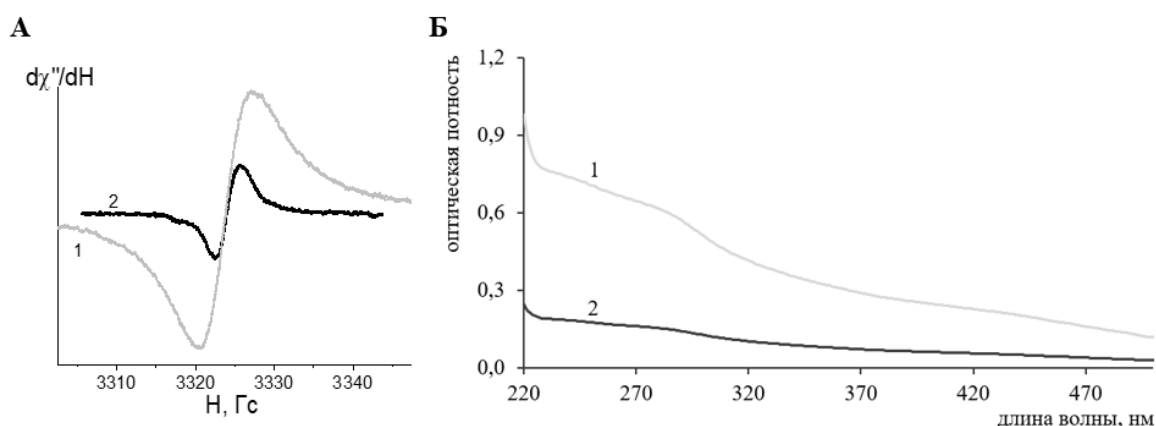


Рисунок 3. Спектральные свойства меланинов: А – спектры ЭПР образцов синтетического меланина (1) и пигмента из мицелия *Dothiora* sp. БИМ Y-383 (2); Б – Спектры поглощения синтетического меланина в концентрации 0,03 мг/мл (1) и выделенного из *Dothiora* sp. БИМ Y-383 в концентрации 0,03 мг/мл (2) /

Figure 3. Spectral properties of melanins: A – EPR spectra of synthetic melanin samples (1) and pigment from the mycelium of *Dothiora* sp. БИМ Y-383 (2); B – absorption spectra of synthetic melanin at concentration of 0.03 mg/ml (1) and БИМ Y-383 isolated from *Dothiora* sp. at concentration of 0.03 mg/ml (2)

Необходимо отметить, что по количеству парамагнитных центров (ПЦ) меланин, выделенный из исследуемых дрожжей, и синтетический меланин различаются на порядок: $1,2 \cdot 10^{18}$ спин/г и $1,2 \cdot 10^{19}$ спин/г, соответственно, что свидетельствует о различиях в их строении.

Спектральные свойства меланинов также проявляются в поглощении света в видимой и ультрафиолетовой областях, с характерными наклонами спектральных кривых в диапазоне 400–600 нм. Спектральные свойства меланинов обусловлены их сложной ароматической структурой, которая позволяет эффективно поглощать ультрафиолетовое излучение [15].

При одинаковом содержании в растворе синтетического меланина и выделенного из сублимированного мицелия *Dothiora* sp. БИМ Y-383 их спектры различаются интенсивностью поглощения при длине волны 460 нм, характерной для меланиновых пигментов. Величина ОП при 460 нм для синтетического меланина составила 0,187, а для выделенного из дрожжевого мицелия 0,044, что свидетельствует об их структурных отличиях.

Таким образом, показано, что пигмент, синтезируемый дрожжами *Dothiora* sp. БИМ Y-383, является меланином. Проведенное спектральное исследование позволило установить, что меланиногенез у *Dothiora* sp. БИМ Y-383 и является его идентификационным признаком.

Биологические активности меланина дрожжей Dothiora sp. БИМ Y-383. Меланины обладают широким спектром биологических активностей. Они могут проявлять радиопротекторные, генопротекторные, адаптогенные, антивирусные, антибактериальные и антиоксидантные свойства [15]. В связи с этим дрожжи *Dothiora sp.* БИМ Y-383 могут служить в качестве продуцентов пригодного меланина для его практического применения в биотехнологии. У представленного грибного меланина исследованы антиоксидантные, генопротекторные и антибактериальные свойства.

При исследовании *антимутагенной активности* синтетического и грибного меланинов, показано, что они эффективно ингибируют химически индуцированный мутагенез у санитарно-показательных микроорганизмов (табл. 2).

Таблица 2. Антимутагенная активность меланина *Dothiora sp.* БИМ Y-383 и синтетического меланина против химически индуцированных мутаций в штаммах *S. typhimurium* /
Table 2. Antimutagenic activity of *Dothiora sp.* БИМ Y-383 melanin and synthetic melanin against chemically induced mutations in *S. typhimurium* strains

Тестируемый штамм / Обработка	Концентрация меланина, мг/мл	Количество ревертантов на чашке Петри	Ингибирование мутагенеза, %
<i>S. typhimurium</i> TA 98 (сдвиг рамки считывания)			
Спонтанный мутагенез	—	20±2	—
Этидиум бромид (10 мкг/чашку)	—	224±12	100.0
+ Синтетический меланин (Sigma)	0.1	178±9	21.2
	0.05	217±11	16.4
	0.025	207±9	7.6
+ Меланин <i>Dothiora sp.</i> БИМ Y-383	0.1	169±13	24.4
	0.05	185±10	17.3
	0.025	205±6	8.6
<i>S. typhimurium</i> TA 100 (замена пар оснований)			
Спонтанный мутагенез	—	72±7	—
Азид натрия (10 мкг/чашку)	—	617±38	100.0
+ Синтетический меланин (Sigma)	0.1	537±25	12.9
	0.05	553±8	10.3
	0.025	562±15	8.8
+ Меланин <i>Dothiora sp.</i> БИМ Y-383	0.1	525±19	14.9
	0.05	547±11	11.3
	0.025	559±14	9.3

Результаты исследования показали, что как природный меланин *Dothiora sp.* БИМ Y-383, так и синтетический аналог проявляют дозозависимый антимутагенный эффект. Установлено, что грибной пигмент превосходит синтетический препарат по эффективности ингибирования мутагенеза. Наиболее выраженное защитное действие отмечено на штамме *S. typhimurium* TA 98: в концентрации 0,1 мг/мл меланин *Dothiora sp.* снижал частоту мутаций сдвига рамки считывания, вызванного этидиум бромидом, на 24,4 %, в то время как синтетический меланин — на 21,2 %. При анализе мутаций типа замены пар оснований у штамма *S. typhimurium* TA 100 также зафиксировано преимущество природного биополимера. В максимальной концентрации (0,1 мг/мл) грибной меланин подавлял индуцированный азидом натрия мутагенез на 14,9 %, тогда как синтетический образец — на 12,9 %. Для обеих исследуемых субстанций характерно закономерное снижение антимутагенного потенциала при уменьшении концентрации до 0,025 мг/мл.

Сравнительный анализ антиоксидантной активности (АОА) показал, что меланин, экстрагированный из мицелия *Dothiora sp.* БИМ Y-383, характеризуется более высокими показателями (1,31±0,08 mM TE) по сравнению с синтетическим аналогом (1,0±0,03 mM TE). Повышенный антиоксидантный потенциал природного биополимера обусловлен

особенностями его химической структуры: развитой системой сопряженных двойных связей, а также высоким содержанием функционально активных гидроксильных и карбоксильных групп, способствующих эффективной инактивации свободных радикалов. Более высокая АОА грибного меланина может быть связана с его нативной конформацией. В отличие от синтетического меланина, получаемого путем химического окисления тирозина, меланин *Dothiora* sp. БИМ Y-383 синтезируется ферментативно, что обеспечивает более плотное расположение антиоксидантных центров в структуре биополимера.

Высокая антиоксидантная активность меланина *Dothiora* sp. БИМ Y-383 (1,31 mM TE) коррелирует с его способностью снижать индуцированный мутагенез. Вероятно, антимутагенный эффект реализуется через механизм «перехвата» активных форм кислорода и свободных радикалов еще до их взаимодействия с ДНК микроорганизмов.

Антимикробный потенциал исследуемых меланинов оценивали по величине зон ингибирования роста тест-штаммов (табл. 3). Полученные данные свидетельствуют о том, что грибной меланин *Dothiora* sp. БИМ Y-383 обладает широким спектром действия, сопоставимым по эффективности с синтетическим аналогом.

Таблица 3. Антимикробная активность меланина *Dothiora* sp. БИМ Y-383 и синтетического меланина в отношении условно-патогенных микроорганизмов /

Table 3. Antimicrobial activity of melanin *Dothiora* sp. БИМ Y-383 and synthetic melanin against opportunistic microorganisms

Тест-микроорганизм	Меланин <i>Dothiora</i> sp. БИМ Y-383	Синтетический меланин (Sigma)	Положительный контроль (антибиотик)
	Зона ингибирования, мм		
<i>E. coli</i> ATCC 11229	54±0.1	53±0.1	67±0.1 ^a
<i>St. aureus</i> ATCC 6538	48±0.1	48±0.1	50±0.1 ^a
<i>C. albicans</i> ATCC 10231	37±0.1	38±0.1	43±0.1 ^b

Примечание: ^a Ампициллин (40 мкг/мл); ^b Нистатин (40 мкг/мл). Все значения представлены как среднее значение ± стандартное отклонение ($M \pm SD$).

Наибольшая чувствительность к воздействию пигментов отмечена у штамма *E. coli* ATCC 11229: зона ингибирования для грибного меланина составила 54±0.1 мм, что незначительно превышает показатель синтетического образца (53±0.1 мм). В отношении грамположительной бактерии *St. aureus* ATCC 6538 оба образца проявили идентичную активность (48±0.1 мм). Дрожжеподобный гриб *C. albicans* ATCC 10231 оказался наиболее устойчивым к действию полимеров (зоны ингибирования 37–38 мм). Несмотря на то, что антимикробный эффект меланинов уступал действию антибиотиков сравнения (ампициллина и нистатина), результаты подтверждают выраженную биологическую активность природного пигмента. При сравнении с антибиотиками важно отметить, что меланины — это высокомолекулярные биополимеры, и их диффузия в агаре может быть медленнее, чем у низкомолекулярных антибиотиков.

Заключение. При идентификации видового состава дрожжевых грибов Восточной Антарктиды использовали комплексный подход с использованием молекулярно-генетического сходства и физиолого-биохимического профиля метаболизма углеводов. Генетическая кластеризация штаммов дрожжей частично согласуется с их метаболической активностью в отношении различных пентоз, гексоз и дисахаридов, что подтверждает необходимость использования молекулярно-генетических и физиолого-биохимических признаков для их идентификации. Исследуемые дрожжи из отдела Ascomycota способны включать в свой углеводный обмен все исследованные пентозы, гексозы и дисахариды, в аэробных условиях культивирования. В дополнение к синтезу органических кислот штамм *Dothiora* sp. БИМ Y-383 способен синтезировать меланин, содержащий порядка $1,2 \cdot 10^{18}$ спин/г парамагнитных центров в своем составе. Выделенный из этого штамма дрожжей меланин проявляет антиоксидантную, генопротекторную и антибактериальные активности. На основании представленных

данных о структуре, антиоксидантной, антимикробной и антимутагенной активности можно подчеркнуть преимущество природного меланина как многофункционального биополимера. Совокупность полученных данных позволяет рассматривать меланин гриба *Dothiora* sp. БИМ Y-383 как перспективный биоагент для создания новых фармакологических и санитарных препаратов с выраженными антиоксидантными и генопротекторными свойствами.

Список источников

1. Ravindra R., Chaturvedi A. Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Berlin: Springer, 2011. 53 p.
2. Amato P., Doyle S., Christner B. C. Macromolecular synthesis by yeasts under frozen conditions // Environmental Microbiology. 2009. Vol. 11. No. 3. P. 589–596.
3. Coleine C., Pombubpa N., Zucconi L. Endolithic fungal species markers for harshest conditions in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica // Life. 2020. Vol. 10. No. 2. Art. 13.
4. Coleine C., Zucconi L., Onofri S. Sun exposure shapes functional grouping of fungi in cryptoendolithic Antarctic communities // Life. 2018. Vol. 8. No. 2. Art. 19.
5. Vaz A. B. M., Rosa L. H., Vieira M. L. A., Garcia V., Brandão L. R., Teixeira L. C. R. S., Moline M., Libkind D., Broock M. V., Rosa C. A. The diversity, extracellular enzymatic activities and photoprotective compounds of yeasts isolated in Antarctica // Brazilian Journal of Microbiology. 2011. Vol. 42. No. 3. P. 937–947. <https://doi.org/10.1590/s1517-838220110003000012>
6. Selbmann L., Grube M., Onofri S. Antarctic epilithic lichens as niches for black meristematic fungi // Biology. 2013. Vol. 2. No. 2. P. 784–797.
7. Singh J., Dubey A. K., Singh R. P. Antarctic terrestrial ecosystem and role of pigments in enhanced UV-B radiations // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 2011. Vol. 10. No. 1. P. 63–77.
8. Adams R. I., Miletto M., Taylor J. W. Dispersal in microbes: fungi in indoor air are dominated by outdoor air and show dispersal limitation at short distances // The ISME Journal. 2013. Vol. 7. No. 7. P. 1262–1273.
9. Gribanova E. A., Akhremchuk K. U., Semenchukova E. A., Dolgikh A. V., Shchur V. V., Yantsevich A. V., Andreev M. P., Hihiniak Y. H., Valentovich L. N., Miamin V. Y. Isolation and primary characterisation of yeasts isolated from different ecosystems in East Antarctica // Polar Science. 2025. Vol. 46. Art. 101262. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2025.101262>
10. Xu J. Fungal species concepts in the genomics era // Genome. 2020. Vol. 63. No. 9. P. 459–468.
11. Kachalkin A. V., Glushakova A. M., Tomashevskaya M. A. Leucosporidium egoroviorum f.a., sp. nov., a New Yeast Species Isolated from Zucchini // Microbiology. 2023. Vol. 92. No. 1. P. 24–30.
12. Stengel A., Stanke K. M., Quattrone A. C., Herr J. R. Improving taxonomic delimitation of fungal species in the age of genomics and phenomics // Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 13. Art. 847067. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.847067>
13. Metsalu T., Vilo J. ClustVis: a web tool for visualizing clustering of multivariate data using Principal Component Analysis and heatmap // Nucleic Acids Research. 2015. Vol. 43. No. W1. P. W566–W570.
14. Pralea I.-E., Moldovan R.-C., Petrache A.-M., Ilieș M., Hegheș S.-C., Ielciu I., Nicoară R., Moldovan M., Ene M., Radu M., Uifălean A., Iuga C.-A. From Extraction to Advanced Analytical Methods: The Challenges of Melanin Analysis // International Journal of Molecular Sciences. 2019. Vol. 20. No. 16. Art. 3943. <https://doi.org/10.3390/ijms20163943>
15. Suthar M., Dufossé L., Singh S. K. The enigmatic world of fungal melanin: a comprehensive review // Journal of Fungi. 2023. Vol. 9. No. 9. Art. 891.
16. Abd-El-Aziz A. S., Abed N. N., Mahfouz A. Y., Fathy R. M. Production and characterization of melanin pigment from black fungus *Curvularia soli* AS21 ON076460 assisted gamma rays for promising medical uses // Microbial Cell Factories. 2024. Vol. 23. No. 1. P. 68–87. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02335-y>
17. Dudchik N. V., Sychik S. I., Shevlyakov V. V. Procaryotic test models for environmental ecotoxicological research: prospects and classification (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2018. Vol. 4. No. 4. P. 5–12.
18. Golovach T. N., Dudchik N. V., Veremeenko E. G. Evaluation of antimutagenic and antifungal properties, parameters of acute toxicity and sensitizing activity of enzymatic whey protein hydrolysate // Foods and Raw Materials. 2016. Vol. 4. No. 2. P. 38–47.

19. Gribanova E., Miamin V. Physiological and biochemical traits of yeasts from soils of various ecosystems of East Antarctica // *Ukrainian Antarctic Journal*. 2021. No. 2. P. 106–116.
20. Menna M. E. D. Some Physiological Characters of Yeasts from Soils and Allied Habitats // *Journal of General Microbiology*. 1959. Vol. 20. No. 1. P. 13–23.
21. Sinnott M. L. Catalytic mechanism of enzymic glycosyl transfer // *Chemical Reviews*. 1990. Vol. 90. No. 7. P. 1171–1202.
22. Sugisawa H., Edo H. The thermal degradation of sugars I. Thermal polymerization of glucose // *Journal of Food Science*. 1966. Vol. 31. No. 4. P. 561–565.

References

1. Ravindra R, Chaturvedi A. Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Berlin: Springer, 2011. 53 p.
2. Amato P, Doyle S, Christner BC. Macromolecular synthesis by yeasts under frozen conditions. *Environmental Microbiology*. 2009;11(3):589-596.
3. Coleine C, Pombubpa N, Zucconi L. Endolithic fungal species markers for harshest conditions in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Life*. 2020;10(2):13.
4. Coleine C, Zucconi L, Onofri S. Sun exposure shapes functional grouping of fungi in cryptoendolithic Antarctic communities. *Life*. 2018;8(2):19.
5. Vaz ABM, Rosa LH, Vieira MLA, Garcia V, Brandao LR, Teixeira LCRS, Moline M, Libkind D, Broock MV, Rosa CA. The diversity, extracellular enzymatic activities and photoprotective compounds of yeasts isolated in Antarctica. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2011;42(3):937-947. <https://doi.org/10.1590/s1517-838220110003000012>
6. Selbmann L, Grube M, Onofri S. Antarctic epilithic lichens as niches for black meristematic fungi. *Biology*. 2013;2(2):784-797.
7. Singh J, Dubey AK, Singh RP. Antarctic terrestrial ecosystem and role of pigments in enhanced UV-B radiations. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2011;10(1):63-77.
8. Adams RI, Miletto M, Taylor JW. Dispersal in microbes: fungi in indoor air are dominated by outdoor air and show dispersal limitation at short distances. *The ISME Journal*. 2013;7(7):1262-1273.
9. Gribanova EA, Akhremchuk KU, Semenchukova EA, Dolgikh AV, Shchur VV, Yantsevich AV, Andreev MP, Hihiniak YH, Valentovich LN, Miamin VY. Isolation and primary characterisation of yeasts isolated from different ecosystems in East Antarctica. *Polar Science*. 2025;46:101262. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2025.101262>
10. Xu J. Fungal species concepts in the genomics era. *Genome*. 2020;63(9):459-468.
11. Kachalkin AV, Glushakova AM, Tomashevskaya MA. *Leucosporidium egoroviorum* f.a., sp. nov., a New Yeast Species Isolated from Zucchini. *Microbiology*. 2023;92(1):24-30.
12. Stengel A, Stanke KM, Quattrone AC, Herr JR. Improving taxonomic delimitation of fungal species in the age of genomics and phenomics. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:847067. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.847067>
13. Metsalu T, Vilo J. ClustVis: a web tool for visualizing clustering of multivariate data using Principal Component Analysis and heatmap. *Nucleic Acids Research*. 2015;43(W1):W566-W570.
14. Pralea I-E, Moldovan R-C, Petrache A-M, Ilieș M, Hegheș S-C, Ielciu I, Nicoară R, Moldovan M, Ene M, Radu M, Uifălean A, Iuga C-A. From Extraction to Advanced Analytical Methods: The Challenges of Melanin Analysis. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(16):3943. <https://doi.org/10.3390/ijms20163943>
15. Suthar M, Dufossé L, Singh SK. The enigmatic world of fungal melanin: a comprehensive review. *Journal of Fungi*. 2023;9(9):891.
16. Abd-El-Aziz AS, Abed NN, Mahfouz AY, Fathy RM. Production and characterization of melanin pigment from black fungus *Curvularia soli* AS21 ON076460 assisted gamma rays for promising medical uses. *Microbial Cell Factories*. 2024;23(1):68-87. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02335-y>
17. Dudchik NV, Sychik SI, Shevlyakov VV. Prokaryotic test models for environmental ecotoxicological research: prospects and classification (review). *Theoretical and Applied Ecology*. 2018;4(4):5-12.
18. Golovach TN, Dudchik NV, Veremeenko EG. Evaluation of antimutagenic and antifungal properties, parameters of acute toxicity and sensitizing activity of enzymatic whey protein hydrolysate. *Foods and Raw Materials*. 2016;4(2):38-47.
19. Gribanova E, Miamin V. Physiological and biochemical traits of yeasts from soils of various ecosystems of East Antarctica. *Ukrainian Antarctic Journal*. 2021;(2):106-116.

20. Menna MED. Some Physiological Characters of Yeasts from Soils and Allied Habitats. Journal of General Microbiology. 1959;20(1):13-23.
21. Sinnott ML. Catalytic mechanism of enzymic glycosyl transfer. Chemical Reviews. 1990;90(7):1171-1202.
22. Sugisawa H, Edo H. The thermal degradation of sugars I. Thermal polymerization of glucose. Journal of Food Science. 1966;31(4):561-565.

Информация об авторах

Екатерина Александровна Грибанова – старший преподаватель кафедры микробиологии Белорусского государственного университета, Scopus ID: 5756382910.

Владимир Петрович Курченко – кандидат биологических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией прикладных проблем биологии кафедры общей экологии и методики преподавания биологии биологического факультета Белорусского государственного университета, Scopus ID: 6603704011.

Игорь Иосифович Азарко – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией (НИЛ) физики и техники полупроводников физического факультета Белорусского государственного университета, Scopus ID: 56960299100.

Владислав Евгеньевич Мямин – кандидат биологических наук, доцент кафедры микробиологии биологического факультета Белорусского государственного университета, Scopus ID: 8433736300.

Наталья Владимировна Дудчик – доктор биологических наук, доцент, заведующая лабораторией микробиологии Республиканского унитарного предприятия «Научно-практический центр гигиены», +375 (17) 284-13-85, n_dudchik@mail.ru.

Игорь Владимирович Ржепаковский – кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник МНОЛ экспериментальной иммуноморфологии, иммунопатологии и иммунобиотехнологии, медико-биологический факультет, Северо-Кавказский федеральный университет, +79054164981, irzhepakovskii@ncfu.ru.

Алексей Дмитриевич Лодыгин – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной биотехнологии, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории пищевой и промышленной биотехнологии, факультет пищевой инженерии и биотехнологий имени академика А.Г. Храмцова, Северо-Кавказский федеральный университет, +79288263918, allodygin@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Information about the authors

Ekaterina A. Griбанova – senior lecturer in the Department of Microbiology at the Belarusian State University. Scopus ID: 5756382910.

Vladimir P. Kurchenko – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Head of Research Laboratory of Applied Biology, Department of General Ecology and Methods of Biology Teaching, Faculty of Biology. Scopus ID: 6603704011.

Igor I. Azarko – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory (SRL) of Physics and Engineering of Semiconductors, Faculty of Physics, Belarusian State University. Scopus ID: 56960299100.

Vladislav E. Myamin – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Department of Microbiology, Faculty of Biology, Belarusian State University. Scopus ID: 8433736300.

Natal'ya V. Dudchik – Dr. Sci. (Biol.), Associate Professor, Head of Microbiology Laboratory Republican Unitary Enterprise "Scientific and Practical Center of Hygiene", +375 (17) 284-13-85, n_dudchik@mail.ru.

Igor V. Rzhepakovsky – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Leading Researcher of the Interdepartmental Scientific and Educational Laboratory of Experimental Immunomorphology, Immunopathology and Immunobiotechnology, Faculty of Medicine and Biology, North-Caucasus Federal University, +79054164981, irzhepakovskii@ncfu.ru.

Aleksey D. Lodygin – Dr. Sci. (Techn.), Associate Professor, Head of the Department of Applied Biotechnology, Chief Researcher of the Research Laboratory of Food and Industrial Biotechnology, Faculty of Food Engineering and Biotechnology named after Academician A.G. Khramtsov North-Caucasus Federal University, +79288263918, allodygin@yandex.ru.

Author contributions: the authors contributed equally to this article.