

Научная статья
УДК 57.083.132
EDN: ASYDTH
DOI: 10.21285/achb.992



Нетрадиционные дрожжи *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 в качестве продуцента белка при глубинной ферментации гидролизата отходов лесопиления

Е.И. Стрекаловская✉, Л.А. Беловежец

Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время суммарная оценка объема отходов древесины в России составляет 75–113 млн м³ в год, а их конверсия в разнообразные целевые продукты (источники биоэнергии, кормовые добавки, органические кислоты и др.) считается приоритетным направлением государственной экологической политики Российской Федерации. В работе представлены результаты получения белкового продукта на основе биомассы нетрадиционных дрожжей *Meyerozyma guilliermondii* Y-780, культивируемой на гидролизате отходов лесопиления. В первые двое суток культивирования отмечалась утилизация основного количества редуцирующих веществ дрожжами наряду с активным накоплением биомассы. При варьировании водородного показателя питательной среды интенсивный рост дрожжей *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 на гидролизате отмечался при pH 4,6. Обогащение минеральной среды на основе гидролизата кукурузным экстрактом увеличивало выход биомассы дрожжей почти в 3 раза по сравнению со средами с неорганическими источниками азота. На основании проведенных исследований была выявлена динамика потребления редуцирующих веществ дрожжами в зависимости от состава питательной среды. Повышение питательной ценности гидролизата за счет введения в среду дополнительного источника азота, витаминов и биогенных элементов позволило увеличить выход сырого протеина до 47%. Полученные данные свидетельствуют о биологической доброкачественности гидролизата древесных опилок, а также о высоком биотехнологическом потенциале *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 для получения кормового белка.

Ключевые слова: дрожжи, *Meyerozyma guilliermondii*, биосинтез белка, отходы лесопиления, гидролизат

Благодарности. Авторы выражают благодарность ведущим инженерам Иркутского института химии им. А.Е. Фаворского СО РАН И.В. Старченко и В.Н. Трофимову за помощь в проведении исследования.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Иркутского института химии им. А.Е. Фаворского СО РАН в рамках государственного задания «Разработка биотехнологических решений экологических проблем промышленных производств» (№ 124022100043-5).

Для цитирования: Стрекаловская Е.И., Беловежец Л.А. Нетрадиционные дрожжи *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 в качестве продуцента белка при глубинной ферментации гидролизата отходов лесопиления // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 3. С. 403–411. DOI: 10.21285/achb.992. EDN: ASYDTH.

Non-conventional yeast *Meyerozyma guilliermondii* strain Y-780 as a protein producer in the submerged fermentation of sawmill waste hydrolysate

Elena I. Strekalovskaya✉, Lyudmila A. Belovezhets

A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The annual generation of wood waste in the Russian Federation is currently estimated at 75–113 million cubic meters. The conversion of these lignocellulosic residues into value-added products, including bioenergy sources, feed additives, and organic acids, constitutes a priority within the nation's environmental policy framework. This study details the production of a protein-rich product from the biomass of the non-conventional yeast *Meyerozyma guilliermondii* strain Y-780 cultivated on a hydrolysate derived from sawmill waste. An analysis of the cultivation process revealed that the yeast metabolized the bulk of reducing substances within the first 48 hours, concomitant with a phase of vigorous biomass accumulation. The investigation of the pH influence revealed that the strain Y-780 of *Meyerozyma guilliermondii* exhibited substantial yeast growth on the hydrolysate at a pH of 4.6. The incorporation of corn extract into the mineral culture medium based on the hydrolysate led to an almost threefold increase in biomass yield compared to media containing only inorganic nitrogen sources. The research established a distinct consumption profile for reducing substances by the yeast, which was highly dependent on the composition of the culture medium. The addition of nitrogen, vitamins, and biogenic elements to the hydrolysate resulted in an enhancement of its nutritional value, leading to an increase in crude protein yield to 47%. These findings suggest the biological suitability of the wood sawdust hydrolysate and underscore the significant biotechnological potential of *Meyerozyma guilliermondii* strain Y-780 for feed protein biosynthesis.

Keywords: yeast, *Meyerozyma guilliermondii*, protein biosynthesis, sawmill waste, hydrolysate

Acknowledgements. The authors express their gratitude to leading engineers I.V. Starchenko and V.N. Trofimov of the A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Funding. This work was financed by the budget of A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry SB RAS within the framework of the state assignment "Development of biotechnological solutions to environmental problems of industrial production" (no. 124022100043-5).

For citation: Strekalovskaya E.I., Belovezhets L.A. Non-conventional yeast *Meyerozyma guilliermondii* strain Y-780 as a protein producer in the submerged fermentation of sawmill waste hydrolysate. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(3):403-411. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.992. EDN: ASYDTH.

ВВЕДЕНИЕ

Дрожжи в качестве продуцентов ценных биологически активных веществ занимают важное место в современной биотехнологии. *Meyerozyma guilliermondii* (семейство Saccharomycetaceae) – аскомицетные мезофильные дрожжи, широко распространенные в природе (почва, вода, воздух) [1, 2]. Как экспериментальный штамм *M. guilliermondii* относится к первому уровню биобезопасности. Он привлекает все большее внимание благодаря своим уникальным биохимическим характеристикам, включая широкий спектр использования различных субстратов, состоящих в том числе из возобновляемого сырья с целью получения различных метаболитов. Поскольку растет интерес к биосинтезу белка в качестве кормовой добавки в животноводстве (в том числе и для аквакультуры) [3], исследование способности к синтезу белка этим малоизученным штаммом является весьма актуальным. *M. guilliermondii*

в отличие от *Saccharomyces cerevisiae* обладают естественной способностью сбраживать как пентозы, так и гексозы [2, 4], которые содержатся в гидролизатах древесного сырья. Это представляет практический интерес, так как в деревообрабатывающей промышленности образуется огромное количество мягких и твердых древесных отходов, суммарный объем которых по прогнозам к 2030 г. составит 100–189 млн м³ в год. До 45% данных отходов остаются невостребованными, в результате происходит загрязнение ими водной, воздушной и наземной среды, что ведет в конечном итоге к экономическим потерям. В свою очередь древесные отходы – это ценное вторичное сырье, эффективное использование которого возможно во многих отраслях хозяйства [5–7].

В связи с вышесказанным целью проведенного исследования заключалась в оценке биотехнологического потенциала нетрадиционных дрожжей *M. guilliermondii*

Y-780 для производства кормового белка с использованием в качестве субстрата гидролизата отходов лесопиления (опилки сосны и лиственницы, 1:1).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования являлся штамм дрожжей *M. guilliermondii* Y-780, предоставленный Всероссийской коллекцией промышленных микроорганизмов (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва).

Культуру *M. guilliermondii* Y-780 выращивали на питательной среде для роста дрожжей YPD (от англ.: yeast extract peptone dextrose) с pH 6,0 следующего состава, г/л: глюкоза – 20; дрожжевой экстракт – 5; пептон – 10 [8]. Культивирование проводилось на орбитальном шейкере-инкубаторе ES-20 (130 об/мин) в колбах Эрленмейера объемом 250 мл при температуре 37 °C в течение 7 суток. Для подсчета количества дрожжевых клеток в культуральной жидкости использовали косвенный метод (турбидиметрию). Оптическую плотность культуральной жидкости определяли на спектрофотометре UNICO 2800 при длине волны 585 нм (OD585) в кюветах шириной 10 мм. Количественный учет дрожжей проводили методом глубинного посева десятикратных разведений культуральной жидкости на твердую питательную среду YPD. Уравнение, описывающее взаимосвязь числа колониеобразующих единиц (КОЕ) с оптической плотностью культуральной жидкости, имело следующий вид:

$$y = 107,03x - 26,819.$$

Для получения растворов моносахаридов проводили щадящий гидролиз отходов лесопиления (опилки сосны и лиственницы) серной кислотой¹. Эксперимент проводился в несколько этапов в следующих условиях:

1) гидролиз – обработка сырья (опилки) 72%-й серной кислотой при гидромодуле 1:5,6 без нагревания в течение 3 ч;

2) инверсия при повышенной температуре (кипение) в течение 3 ч с добавлением воды до 6,5%-й концентрации кислоты;

3) нейтрализация гидролизата после инверсии (инверт) до pH 4,5–5,0 с помощью аммиака (NH₃) или негашеной извести (CaO). После этого активированным углем производилось осветление освобожденного от осадка гидролизата (нейтрализата). Содержание редуцирующих веществ (РВ) определяли фенол-сернокислотным методом [9, 10] с калибровкой по глюкозе. Состав гидролизата отходов лесопиления представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав полученного гидролизата опилок сосны и лиственницы

Table 1. Composition of hydrolyzed pine and larch sawdust

Показатель	Значение, % от а.с.с.
Содержание экстрактивных веществ	4,5
Лигнин	31,3
Углеводная часть, в пересчете на редуцирующие вещества	52,5

Посевной материал (инокулят) в количестве 2% с концентрацией (231–239)×10⁶ КОЕ/мл вносили в 4 варианта питательных сред:

– среда № 1: гидролизат отходов лесопиления с концентрацией РВ 15,9 г/л, pH 4,6; дополнительные биогенные вещества в питательную среду не вводили;

– среда № 2: минеральная среда на основе гидролизата следующего состава, г/л: (NH₄)₂SO₄ – 5; KH₂PO₄ – 1,5; K₂HPO₄ – 1; MgSO₄, NaCl – 0,5; CaCl₂ – 0,02; MnSO₄, ZnSO₄, FeSO₄, CuSO₄ – 0,001; pH варьировали в разных экспериментах (1,6; 3,3; 4,6 и 6,0);

– среда № 3: гидролизат с добавлением кукурузного экстракта (2%); pH 4,6;

– среда № 4: минеральная среда на основе гидролизата с добавлением кукурузного экстракта (2%); pH 4,6.

Культивирование проводили при тех же условиях в течение 7 суток. Каждый эксперимент проводился в трех повторностях. В качестве контроля использовали неинокулированный образец каждой из культуральных сред. В культуральной жидкости из опытных колб ежедневно контролировали pH, содержание дрожжей, КОЕ/мл, и РВ. Измерение pH проводили с помощью pH-метра OHAUS ST10. Концентрация РВ в гидролизате определялась до засева штамма дрожжей, а также через 24, 48, 72, 96 и 168 ч культивирования спектрофотометрически при оптической плотности 490 с использованием фенол-сернокислотного метода [9, 10]. Эффективность конверсии РВ рассчитывали на основе методики, описанной в работе [11]. По окончании культивирования рассчитывали прирост и выход биомассы дрожжей (сырой и сухой, г/л). После этого супернатанты содержимого каждой опытной колбы центрифугировали при 3500 об/мин в течение 20 мин. Отцентрифугированную биомассу *M. guilliermondii* Y-780 использовали для определения содержания белка в биомассе клеток после сушки при 60 °C до достижения постоянного веса. Содержание азота, %, в полученных образцах определяли методом Дюма, массовую долю сырого протеина, %, определяли классическим методом Кьельдаля в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57221-2016². Статистическую обработку данных проводили в программе Microsoft Excel.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Биологическая доброкачественность гидролизата опилок сосны и лиственницы оценивалась по накоплению биомассы дрожжей (рис. 1). Начальная фаза (лаг-фаза) роста *M. guilliermondii* Y-780 при культивировании не наблюдалась. Активный рост дрожжей приходился на первые 3 суток культивирования (185×10⁶ КОЕ/мл), что соответствует экспоненциальной (логарифмической) стадии роста. С 4-х суток культивирования регистрировался переход в стационарную фазу роста.

Концентрация РВ в гидролизате в процессе эксперимента снижалась с 15,9 до 1,9 г/л, при этом наиболее активная утилизация сахаров происходила также в течение первых трех суток (72 ч) культивирования, что соответствует периоду, в котором клетки размножаются с максимальной для данной культуры скоростью, генетически заложенной в клетке. Ежедневная утилизация сахаров составляла от 2,3 до 4,6 г/л. Активное потребление

¹Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств: учебник для вузов. М.: Лесная промышленность, 1989. 495 с.

²ГОСТ Р 57221-2016. Дрожжи кормовые. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2016. 57 с.

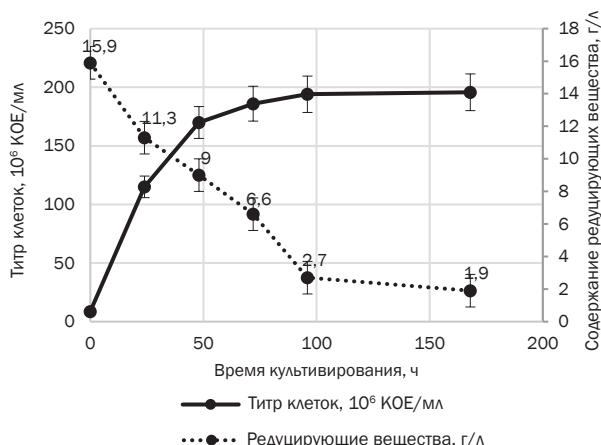


Рис. 1. Динамика роста и потребления редуцирующих веществ дрожжами *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 на гидролизате опилок в процессе культивирования

Fig. 1. Dynamics of growth and consumption of reducing substances by yeast *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 on sawdust hydrolysate during cultivation

сахаров дрожжами (штамм *Saccharomyces cerevisiae* TMB3500) в первые дни культивирования на гидролизате щепы ели подтверждается в работе Дж.Р. Алмейда с соавторами [12]. При переходе в стационарную фазу роста утилизация сахаров снижалась и составляла 0,8 г/л

в сумме за 3 последних дня культивирования. Эффективность конверсии РВ в гидролизате в процессе накопления биомассы дрожжей составляла 87,5% (табл. 2). В конце культивирования количество дрожжей достигло 195×10^6 КОЕ/мл, при этом сырая и сухая биомасса составляла 19 и 4,3 г/л используемого гидролизата соответственно. Массовая доля сырого протеина в сухой дрожжевой биомассе была низкой и составляла 20,6% (табл. 3).

Как видно из графика, представленного на рис. 2, внесение минеральных солей в питательную среду существенно не влияло на кинетику роста дрожжей *M. guilliermondii* Y-780. В данном случае отличимых значений по накоплению биомассы от культивирования в гидролизате без биогенных элементов не наблюдалось. Первоначальное увеличение плотности дрожжевых клеток происходило активнее в среде на основе только одного гидролизата. Так, через 24 ч культивирования титр клеток составлял 114×10^6 КОЕ/мл против 71×10^6 КОЕ/мл в среде гидролизата с минеральными солями. В последующие сутки культивирования рост биомассы выравнивался. Однако потребление РВ *M. guilliermondii* Y-780 при культивировании на среде гидролизата с минеральными солями снижалось уже на 2-е сутки культивирования до 2,6 г/л. Биомасса дрожжей, полученная на гидролизате с минеральными солями, характеризовалась вдвое более высоким содержанием сырого протеина (38,6%), чем при использовании только одного гидролизата (см. табл. 3).

Таблица 2. Эффективность конверсии редуцирующих веществ при культивировании дрожжей *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 на разных питательных средах

Table 2. Efficiency of reducing substances conversion during cultivation of yeast *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 on different nutrient media

Питательная среда	Начальное содержание редуцирующих веществ, г/л	Конечное содержание редуцирующих веществ (после 7 суток культивирования), г/л	Эффективность конверсии редуцирующих веществ, %
Гидролизат	15,9±0,8	1,9±0,4	87,5
Гидролизат + МС (рН 3,3)	14,4±0,4	1,0±0,1	93,1
Гидролизат + МС (рН 4,6)	14,8±0,8	1,9±0,1	87,2
Гидролизат + МС (рН 6,0)	14,3±0,6	1,5±0,2	90,0
Гидролизат + КЭ (2%)	12,7±0,8	1,4±0,0	89,0
Гидролизат + МС + КЭ (2%)	12,1±0,3	1,5±0,1	87,6

Примечание. Здесь и в табл. 3 МС – минеральные соли; КЭ – кукурузный экстракт.

Таблица 3. Содержание сырого протеина и азота в накопленной биомассе *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 в процессе культивирования на разных питательных средах

Table 3. Protein and nitrogen content in the accumulated biomass of *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 during cultivation on different nutrient media

Среда культивирования	Количество дрожжей, КОЕ/мл	Абсолютно сухая биомасса, г/л	Содержание азота, %	Массовая доля сырого протеина, %
Гидролизат	$195 \times 10^6 \pm 0,2$	4,30±0,1	2,32±0,2	20,6±1,0
Гидролизат + МС (рН 3,3)	$210 \times 10^6 \pm 0,8$	3,03±0,0	3,26±0,5	38,4±0,0
Гидролизат + МС (рН 4,6)	$185 \times 10^6 \pm 0,7$	3,11±0,3	4,73±0,2	38,6±0,1
Гидролизат + МС (рН 6,0)	$115 \times 10^6 \pm 0,2$	3,30±0,2	4,51±0,1	34,9±3,6
Гидролизат + КЭ (2%)	$332 \times 10^6 \pm 1,3$	6,02±0,7	4,24±0,7	42,1±0,0
Гидролизат + МС + КЭ (2%)	$633 \times 10^6 \pm 6,4$	5,70±0,1	4,90±0,1	47,0±0,9
Глюкоза (0,5%, контроль)	–	1,77±0,0	6,19±0,1	38,7±0,0

Примечание. Прочерк – данные отсутствуют.

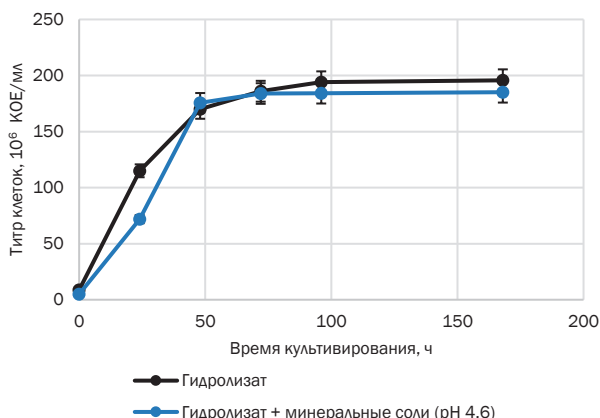


Рис. 2. Сравнение динамики роста дрожжей на гидролизате без добавления и с добавлением минеральных солей

Fig. 2. Comparison of the growth dynamics of yeast on hydrolysate without and with the addition of mineral salts

Следующим этапом исследования было варьирование pH (1,6–6,0) питательной среды на основе гидролизата с добавлением минеральных солей (рис. 3). Подкисление pH среды до 1,6 снижало доброкачественность гидролизата, что выражалось в снижении количества биомассы дрожжей (573×10^3 КОЕ/мл). Максимальный прирост биомассы в 1-е сутки культивирования (до 161×10^6 КОЕ/мл) наблюдался при pH 3,3. При высокой скорости накопления дрожжевой биомассы уже на 3-и сутки наблюдался переход в стационарную фазу роста. К окончанию культивирования содержание дрожжей в культуральной среде достигало 210×10^6 КОЕ/мл. Низкий pH (3,3) способствовал метаболизму дрожжей. Уже с 1-х суток культивирования исследуемые дрожжи активно потребляли РВ в гидролизате с минеральными солями, убыль составила 70,8%. При повышении pH среды наблюдалось снижение накопления биомассы дрожжей. Так, при pH 4,6 к 7-м суткам культивирования популяционная плотность дрожжей составляла 185×10^6 КОЕ/мл, при pH 6,0 – 115×10^6 КОЕ/мл. Потребление основного количества РВ (83–84%) происходило в течение 2 суток культивирования с последующим медленным снижением к 7-м суткам до 1,9 и 1,5 г/л РВ в культуральной среде при pH 4,6 и 6,0 соответственно. Интенсивный рост и размножение дрожжей на гидролизатах растительного и древесного сырья, согласно литературным данным, происходит при pH в пределах 3,8–5,0 [13, 14], что согласуется с нашими данными. Таким образом, наиболее продуктивной по выходу биомассы оказалась питательная среда с pH 3,3, однако более выигрышные результаты по совокупности двух показателей – титру клеток и массовой доле сырого протеина – были получены на среде с pH 4,6. В связи с этим дальнейшие эксперименты по ферментации гидролизата отходов лесопиления исследуемыми дрожжами *M. guilliermondii* Y-780 проводились при pH среды культивирования 4,6.

Несмотря на высокую эффективность конверсии РВ (90,0–93,1%) дрожжами в средах с начальным pH 3,3 и 6,0, рост дрожжей на средах с неорганическими источниками азота (минеральные соли) был ниже по сравнению со средами, в которые вносили органические источники азота (кукурузный экстракт). Добавление в

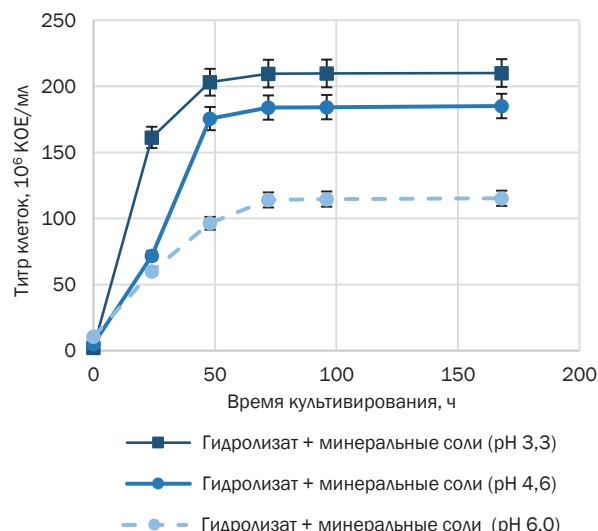


Рис. 3. Накопление биомассы дрожжей *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 при культивировании на среде на основе гидролизата опилок с добавлением минеральных солей при разном значении pH среды

Fig. 3. Accumulation of *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 yeast biomass during cultivation on a medium based on sawdust hydrolysate with the addition of mineral salts at different pH values of the medium

гидролизат кукурузного экстракта не ускорило накопление биомассы дрожжами в первые 2 суток культивирования. Рост дрожжей протекал интенсивнее с 3-х суток культивирования. При этом число клеток дрожжей, КОЕ/мл, по завершении культивирования на питательной среде гидролизат + кукурузный экстракт (2%) в 1,6–2,9 раза больше, чем при культивировании на питательных средах на основе гидролизата с добавлением минеральных солей, и в 1,7 раза больше, чем при культивировании на чистом гидролизате опилок (рис. 4).

Как видно из графика, представленного на рис. 4, источники азота, витаминов, стимуляторов роста (кукурузный экстракт) и минеральных солей существенно влияют на кинетику роста дрожжей *M. guilliermondii* Y-780 только с 4-х суток культивирования. Наблюдался резкий скачок в накоплении биомассы дрожжей с 171×10^6 КОЕ/мл (4-е сутки культивирования) до 633×10^6 КОЕ/мл (7-е сутки культивирования). При этом активное потребление основного количества РВ осуществлялось дрожжами в 1-е сутки культивирования.

Экспериментальные питательные среды имели преимущество перед контрольной средой (глюкоза 0,5%) как по накоплению абсолютно сухой биомассы дрожжей, так и по содержанию в ней белка (см. табл. 3).

Еще одним важным биотехнологическим параметром является pH питательной среды. Дрожжи в процессе культивирования способны снижать pH культуральной жидкости за счет активной работы протонных помп. Это имеет фундаментальное значение для их активности и защиты от стресса [15, 16]. Исследования, проведенные при различных значениях pH, выявили интересные закономерности (рис. 5). Так, использование в виде источника азота минеральных солей приводило к значительному (на 1,0–1,6) снижению pH с 3-х суток культивирования. Исключение составляет вариант с

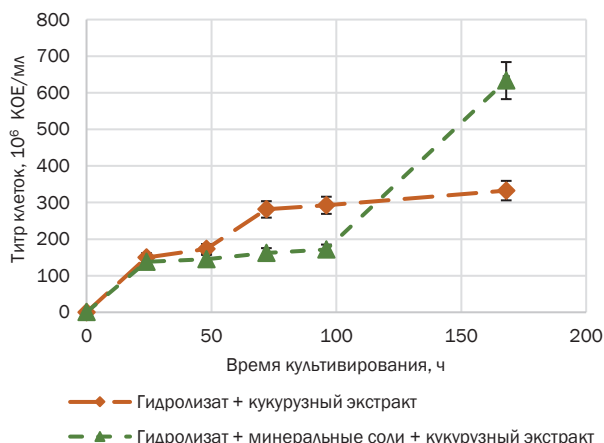


Рис. 4. Влияние кукурузного экстракта на динамику роста дрожжей *Meyerozyma guilliermondii* Y-780

Fig. 4. Effect of corn steep liquor on the growth dynamics of *Meyerozyma guilliermondii* Y-780 yeast

начальным уровнем pH 4,6. В данном случае pH был стабилен в течение всего срока культивирования. Скорее всего, это связано тем, что при культивировании дрожжей на минеральных средах, содержащих в качестве единственного источника азота аммоний, а также фосфаты, начинался активный процесс обмена веществ, сопровождающийся ростом дрожжевой массы с одновременным образованием некоторых органических кислот через дезаминирование с последующим их выделением, что в итоге приводило к снижению pH окружающей среды.

При добавлении в питательную среду кукурузного экстракта (источника органического азота и витаминов) мы наблюдаем обратную картину. pH, пройдя минимум на 2-е сутки культивирования, растет и стабилизируется на уровне 5,7. В этом случае мы не отмечаем влияния минеральных солей. Вероятно, это связано с более сбалансированным составом среды [17].

На основании проведенных исследований было установлено, что степень накопления белка биомассой дрожжей коррелирует с увеличением питательной ценности субстрата. При этом наиболее значимую роль играет добавка кукурузного экстракта. Массовая доля белка в этом варианте на 7-е сутки культивирования составила 47% (см. табл. 2). В схожем исследовании при использовании в качестве продуцента *M. guilliermondii* ATCC 6260 при ферментации гидролизата жома сахарной свеклы (РВ 60 г/л) получена биомасса с содержанием сырого протеина 49,2% [18]. В работе Д. Лапеня с соавторами [19] при использовании гидролизата (РВ 90 г/л) древесины ели (*Picea abies*) и куриных субпродуктов (сердце, печень и пищеварительный тракт) в качестве субстрата для культивирования нескольких видов дрожжей (*Candida utilis*, *Wickerhamomyces anomalus*, *Blastobotrys adenivorans*) получено от 50,5 до 54,4% белка в дрожжевой биомассе. По совокупности представленных данных гидролизат отходов лесопиления, содержащий меньшее количество РВ (12,1–15,9 г/л), может выступать в качестве выгодной основы при разработке питательной среды для накопления дрожжевой биомассы и биосинтеза белка при производстве кормовых добавок.

По содержанию сырого протеина, %, исследуемая дрожжевая биомасса *M. guilliermondii* Y-780 может быть использована в качестве основы корма для рыб. Так, согласно ГОСТ 10385-2014³, массовая доля сырого протеина в кормах для рыб должна составлять: для сомовых рыб – не менее 45%, для лососевых и осетровых рыб – не менее 50% [20, 21]. На содержание сырого протеина влияют видовая специфичность дрожжей, питательная среда и условия культивирования. Полученные здесь значения находятся в пределах уровня белка, считающегося приемлемым в контексте производства кормовых дрожжей, содержание сырого протеина в которых обычно варьирует от 45 до 55% [22–24].

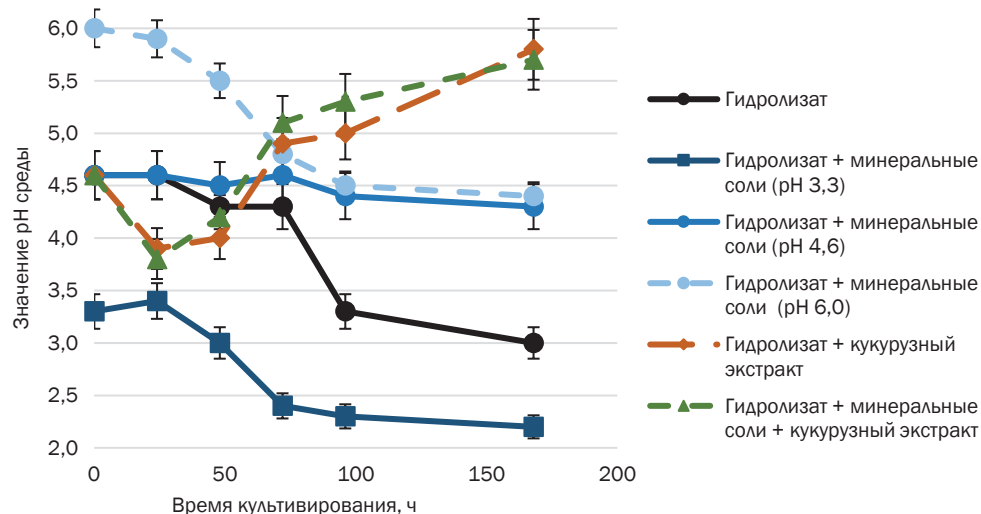


Рис. 5. Динамика кислотности среды в процессе культивирования дрожжей *Meyerozyma guilliermondii* Y-780

Fig. 5. Dynamics of medium acidity during the cultivation of yeast *Meyerozyma guilliermondii* Y-780

³ГОСТ 10385-2014 «Комбикорма для рыб. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в ходе работы, наглядно демонстрируют, что гидролизат опилок (сосны и лиственницы) обладает потенциалом в качестве дешевого углеводного сырья и является биологически доброкачественной средой для культивирования нетрадиционных дрожжей *M. guilliermondii* Y-780 с целью получения белкового продукта. Активный процесс утилизации моносахаридов дрожжами в гидролизате отходов лесопиления приходился на первые 2 дня культивирования дрожжей, что соответствовало экспоненциальной (логарифмической) стадии роста. Выявлено, что оптимальный уровень кислотности питательной среды на основе гидролизата для культивирования *M. guilliermondii* Y-780, обеспечивающий наибольшую его доброкачественность и наименьшую агрессивность, варьирует в пределах 3,3–4,6. Метаболическая оптимизация гидролизата с использованием минеральных и органических добавок в качестве стратегии по повы-

шению питательной ценности среды позволила увеличить выход биомассы дрожжей и повысить эффективность биоконверсии отходов лесопиления в целевые биопродукты. Таким образом, состав среды, используемый для культивирования дрожжей, напрямую отражается на их физиологическом фенотипе, эффективности ферментации субстрата и поддержании pH, что, в свою очередь, влияет на выход целевых продуктов.

В заключение отметим, что это экспериментальное исследование демонстрирует возможный способ переработки малоценных лигноцеллюлозных отходов в дрожжевую биомассу, которую можно использовать в качестве высококачественного кормового ингредиента. Это позволит решить проблемы в области экологии, вызванные загрязнением окружающей среды отходами деревообработки, а также за счет снижения производственных затрат при выработке кормовой продукции решить экономические проблемы, в том числе для аквакультуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Knob A., Izidoro S.C., Lacerda L.T., Rodrigues A., de Lima V.A. A novel lipolytic yeast *Meyerozyma guilliermondii*: efficient and low-cost production of acid and promising feed lipase using cheese whey // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2020. Vol. 24. P. 101565. DOI: 10.1016/j.bcab.2020.101565.
2. Yan W., Gao H., Qian X., Jiang Y., Zhou J., Dong W., et al. Biotechnological applications of the non-conventional yeast *Meyerozyma guilliermondii* // *Biotechnology Advances*. 2021. Vol. 46. P. 107674. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2020.107674.
3. Hamidoghli A., Yun H., Won S., Kim S., Farris N.W., Bai S.C. Evaluation of a single-cell protein as a dietary fish meal substitute for whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* // *Fisheries Science*. 2019. Vol. 85. P. 147–155. DOI: 10.1007/s12562-018-1275-5.
4. Sidana A., Kaur S., Yadav S.K. Assessment of the ability of *Meyerozyma guilliermondii* P14 to produce second-generation bioethanol from giant reed (*Arundo donax*) biomass // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. Vol. 13. P. 16723–16735. DOI: 10.1007/s13399-021-02211-4.
5. Беловежец Л.А., Волчатова И.В., Медведева С.А. Перспективные способы переработки вторичного лигноцеллюлозного сырья // *Химия растительного сырья*. 2010. N 2. С. 5–16. EDN: LLZVJV.
6. Костылева С.В. Экономические и экологические аспекты комплексного использования отходов лесопереработки (на примере Иркутской области) // *Вестник Омского университета. Серия «Экономика»*. 2016. N 3. С. 184–193. EDN: WXTGGN.
7. Марченко О.В., Соломин С.В., Козлов А.Н. Возможности использования древесных отходов в энергетике России // *Экология и промышленность России*. 2019. T. 23. N 6. С. 17–21. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-06-17-21. EDN: TVOTJB.
8. Jayamma P., Shirnalli G.G., Goudar D.G., Olekar S.N. Isolation and identification of thermotolerant yeast isolates from different fruit wastes // *The Pharma Innovation Journal*. 2022. Vol. 11, no. 1. P. 855–859.
9. Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J., Robers P.A., Smith F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances // *Analytical Chemistry*. 1956. Vol. 28, no. 3. P. 350–356. DOI: 10.1021/ac60111a017.
10. Yue F., Zhang J., Xu J., Niu T., Lü X., Liu M. Effects of monosaccharide composition on quantitative analysis of total sugar content by phenol-sulfuric acid method // *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. P. 963318. DOI: 10.3389/fnut.2022.963318.
11. Скиба Е.А. Биосинтез кормовых дрожжей на средах, полученных из плодовых оболочек овса // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2016. T. 6. N 3. С. 140–142. DOI: 10.21285/2227-2925-2016-6-3-140-142. EDN: WZQKFV.
12. Almeida J.R., Wiman M., Heer D., Brink D.P., Sauer U., Hahn-Hägerdal B., et al. Physiological and molecular characterization of yeast cultures pre-adapted for fermentation of lignocellulosic hydrolysate // *Fermentation*. 2023. Vol. 9, no. 1. P. 72. DOI: 10.3390/fermentation9010072.
13. Джанаев К.И., Цугкиев Б.Г. Культивирование дрожжей на питательной среде из биомассы топи-намбура // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2012. T. 49. N 1–2. С. 398–400. EDN: OYRLJ.
14. Raita S., Kusnere Z., Spalvins K., Blumberga D. Optimization of yeast cultivation factors for improved SCP production // *Environmental and Climate Technologies*. 2022. Vol. 26, no. 1. P. 848–861. DOI: 10.2478/rtruect-2022-0064.
15. Жуковская С.В. Изучение влияния физико-химических факторов на образование биомассы хлебопекарных дрожжей // *Научный журнал «Евразийский Союз Ученых»*. 2015. N 4–5. С. 85–88. EDN: XDDZNH.
16. Шавел Я. Факторы стресса для дрожжевых клеток // *Пиво и напитки*. 2001. N 1. С. 24–27.
17. Hahn-Hägerdal B., Karhumäa K., Larsson C.U., Gorwa-Grauslund M., Görgens J., van Zyl W.H. Role of cultivation media in the development of yeast strains for large scale industrial use // *Microbial Cell Factories*. 2005. Vol. 4. P. 31. DOI: 10.1186/1475-2859-4-31.
18. Patelski P., Berłowska J., Dziugański P., Pielech-Przybylska K., Balcerek M., Dziekonska U., et al. Utilisation of sugar beet bagasse for the biosynthesis of yeast SCP // *Journal of Food Engineering*. 2015. Vol. 167. P. 32–37. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.03.031.

19. Lapeña D., Kosa G., Hansen L.D., Mydland L.T., Passoth V., Horn S.J., et al. Production and characterization of yeasts grown on media composed of spruce-derived sugars and protein hydrolysates from chicken by-products // *Microbial Cell Factories*. 2020. Vol. 19. P. 19. DOI: 10.1186/s12934-020-1287-6.

20. Фаткудинова Ю.В., Либерман А.А., Любимова В.Н., Шленкина Т.М. Биологическая ценность белка в составе кормов для рыб // Профессиональное обучение: теория и практика: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (г. Ульяновск, 25 июня 2020 г.). Ульяновск: Изд-во УлГПУ им. И. Н. Ульянова, 2020. С. 663–667. EDN: NDAKCL.

21. Волошин Г.А., Акимов Е.Б., Артемов Р.В., Гершунская В.В. Состояние и перспективы развития рынка комбикормов для индустриальной аквакультуры в Российской Федерации // *Труды ВНИРО*. 2022. Т. 190.

C. 163–169. DOI: 10.36038/2307-3497-2022-190-163-169. EDN: ZDVXMI.

22. Ritala A., Häkkinen S.T., Toivari M., Wiebe M.G. Single cell protein – state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016 // *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8. P. 2009. DOI: 10.3389/fmicb.2017.02009.

23. Øverland M., Skrede A. Yeast derived from lignocellulosic biomass as a sustainable feed resource for use in aquaculture // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2017. Vol. 97, no. 3. P. 733–742. DOI: 10.1002/jsfa.8007.

24. Agboola J.O., Øverland M., Skrede A., Hansen J.Ø. Yeast as major protein-rich ingredient in aquafeeds: a review of the implications for aquaculture production // *Reviews in Aquaculture*. 2021. Vol. 13, no. 2. P. 949–970. DOI: 10.1111/raq.12507.

REFERENCES

1. Knob A., Izidoro S.C., Lacerda L.T., Rodrigues A., de Lima V.A. A novel lipolytic yeast *Meyerozyma guilliermondii*: efficient and low-cost production of acid and promising feed lipase using cheese whey. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2020;24:101565. DOI: 10.1016/j.bcab.2020.101565.

2. Yan W., Gao H., Qian X., Jiang Y., Zhou J., Dong W., et al. Biotechnological applications of the non-conventional yeast *Meyerozyma guilliermondii*. *Biotechnology Advances*. 2021;46:107674. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2020.107674.

3. Hamidoghli A., Yun H., Won S., Kim S., Farris N.W., Bai S.C. Evaluation of a single-cell protein as a dietary fish meal substitute for whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Fisheries Science*. 2019;85:147-155. DOI: 10.1007/s12562-018-1275-5.

4. Sidana A., Kaur S., Yadav S.K. Assessment of the ability of *Meyerozyma guilliermondii* P14 to produce second-generation bioethanol from giant reed (*Arundo donax*) biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023;13:16723-16735. DOI: 10.1007/s13399-021-02211-4.

5. Belovezhets L.A., Volchatova I.V., Medvedeva S.A. Promising methods for processing secondary lignocellulosic raw materials. *Chemistry of plant raw material*. 2010;2:5-16. (In Russian). EDN: LLZVJV.

6. Kostyleva S.V. Economic and environmental aspects of integrated use of forest products waste (on the example of the Irkutsk region). *Herald of Omsk University. Series "Economics"*. 2016;3:184-193. (In Russian). EDN: WXTGGN.

7. Marchenko O.V., Solomin S.V., Kozlov A.N. Possibilities of use of wood wastes in the power industry of Russia. *Ecology & Industry of Russia*. 2019;23(6):17-21. (In Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2019-06-17-21. EDN: TVOTJB.

8. Jayamma P., Shirnalli G.G., Goudar D.G., Olekar S.N. Isolation and identification of thermotolerant yeast isolates from different fruit wastes. *The Pharma Innovation Journal*. 2022;11(1):855-859.

9. Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J., Robers P.A., Smith F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*. 1956;28(3):350-356. DOI: 10.1021/ac60111a017.

10. Yue F., Zhang J., Xu J., Niu T., Lü X., Liu M. Effects of monosaccharide composition on quantitative analysis of total sugar content by phenol-sulfuric acid method. *Frontiers in Nutrition*. 2022;9:963318. DOI: 10.3389/fnut.2022.963318.

11. Skiba E.A. Biosynthesis of fodder yeasts in broths derived from oat hulls. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2016;6(3):140-142. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2016-6-3-140-142. EDN: WZQKVF.

12. Almeida J.R., Wiman M., Heer D., Brink D.P., Sauer U., Hahn-Hägerdal B., et al. Physiological and molecular characterization of yeast cultures pre-adapted for fermentation of lignocellulosic hydrolysate. *Fermentation*. 2023;9(1):72. DOI: 10.3390/fermentation9010072.

13. Djanaev K.I., Tsugkiev B.G. Yeast cultivation in a nutrient medium from jerusalem artichoke biomass. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2012;49(1-2): 398-400. (In Russian). EDN: OYYRLJ.

14. Raita S., Kusnere Z., Spalvins K., Blumberga D. Optimization of yeast cultivation factors for improved SCP production. *Environmental and Climate Technologies*. 2022;26(1):848-861. DOI: 10.2478/rtuect-2022-0064.

15. Zhukovskaya S.V. Study of the influence of physicochemical factors on the formation of baker's yeast biomass. *Scientific journal "Eurasian Union of Scientists"*. 2015;4-5:85-88. (In Russian). EDN: XDDZNH.

16. Shavel Ya. Stress factors for yeast cells. *Beer and beverages*. 2001;1:24-27. (In Russian).

17. Hahn-Hägerdal B., Karhumaa K., Larsson C.U., Gorwa-Grauslund M., Görgens J., van Zyl W.H. Role of cultivation media in the development of yeast strains for large scale industrial use. *Microbial Cell Factories*. 2005;4:31. DOI: 10.1186/1475-2859-4-31.

18. Patelski P., Berłowska J., Dziugan P., Pielech-Przybylska K., Balcerek M., Dziekonska U., et al. Utilisation of sugar beet bagasse for the biosynthesis of yeast SCP. *Journal of Food Engineering*. 2015;167:32-37. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.03.031.

19. Lapeña D., Kosa G., Hansen L.D., Mydland L.T., Passoth V., Horn S.J., et al. Production and characterization of yeasts grown on media composed of spruce-derived sugars and protein hydrolysates from chicken by-products. *Microbial Cell Factories*. 2020;19:19. DOI: 10.1186/s12934-020-1287-6.

20. Fatkudinova Yu.V., Lyubomirova V.N., Shlenkina T.M. Biological value of protein in fish feed. In: *Professional'noe obuchenie: teoriya i praktika: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Vocational training: theory and practice: proceedings of the 2nd Int. Sci. Pract. Conf.* 25 June 2020, Ulyanovsk. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Pedagogical University; 2020, p. 663-667. (In Russian). EDN: NDAKCL.

21. Voloshin G.A., Akimov E.B., Artemov R.V., Gershunskaya V.V. The state and prospects of development of the feed market for industrial aquaculture in the Russian Federation. *Trudy VNIRO*. 2022;190:163-169. (In Russian). DOI: 10.36038/2307-3497-2022-190-163-169. EDN: ZDVXMI.

22. Ritala A., Häkkinen S.T., Toivari M., Wiebe M.G. Single cell protein – state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. *Frontiers in Microbiology*. 2017;8:2009. DOI: 10.3389/fmicb.2017.02009.

23. Øverland M., Skrede A. Yeast derived from lignocellulosic biomass as a sustainable feed resource for use in aquaculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2017;97(3):733-742. DOI: 10.1002/jsfa.8007.

24. Agboola J.O., Øverland M., Skrede A., Hansen J.Ø. Yeast as major protein-rich ingredient in aquafeeds: a review of the implications for aquaculture production. *Reviews in Aquaculture*. 2021;13(2):949-970. DOI: 10.1111/raq.12507.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стрекаловская Елена Иннокентьевна,

к.б.н., ведущий научный сотрудник,
Иркутский институт химии
им. А.Е. Фаворского СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1,
Российская Федерация,
✉ ivanova.iem@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4216-8859>

Беловежец Людмила Александровна,

д.б.н., ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией,
Иркутский институт химии
им. А.Е. Фаворского СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1,
Российская Федерация,
belovezhets@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5922-3397>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena I. Strekalovskaya,

Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher,
A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry,
Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences,
1, Favorsky St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
✉ ivanova.iem@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4216-8859>

Lyudmila A. Belovezhets,

Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher,
Head of the Laboratory,
A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry,
Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences,
1, Favorsky St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
belovezhets@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5922-3397>

Вклад авторов

Е.И. Стрекаловская – разработка концепции,
разработка методологии, проведение
исследования, визуализация, написание
черновика рукописи, редактирование рукописи.
Л.А. Беловежец – разработка концепции,
разработка методологии, получение
финансирования, административное
руководство исследовательским проектом,
редактирование рукописи.

Contribution of the authors

Elena I. Strekalovskaya – conceptualization,
methodology, investigation, visualization,
writing – original draft, editing.
Lyudmila A. Belovezhets – conceptualization,
methodology, funding acquisition,
project administration, editing.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Информация о статье

Поступила в редакцию 23.04.2025.
Одобрена после рецензирования 30.05.2025.
Принята к публикации 17.09.2025.

Information about the article

The article was submitted 23.04.2025.
Approved after reviewing 30.05.2025.
Accepted for publication 17.09.2025.