

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЙ ГРУППОВОГО СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОЙ МАССЫ ГРИБНЫХ СУБСТРАТОВ ПРИ ФЕРМЕНТАЦИИ

М. А. Шелоник, Г. Г. Янута

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Объемы промышленного производства грибов, в отличие от многих сельскохозяйственных направлений, с каждым годом растут благодаря возможности круглогодично получать готовую продукцию с высоким содержанием полноценного пищевого белка и независимо от погодных условий. Однако главным сдерживающим фактором его развития в Республике Беларусь является нехватка отечественного субстрата. Для выращивания грибов субстрат должен содержать полный набор макро- и микроэлементов, необходимых для их роста и развития. Сбалансированный и правильно подобранный питательный субстрат поможет обеспечить высокий и стабильный урожай на протяжении всего процесса производства. С этой целью был проведен групповой анализ питательных субстратов на стадии ферментации в процессе выращивания грибов. Показано, что в процессе подготовки (созревания) субстрата происходят изменения в его групповом составе, в частности наблюдается увеличение доли гуминовых веществ за счет снижения содержания лигнина, целлюлозы и легкогидролизуемых веществ.

Ключевые слова: грибоводство; ферментация; микроорганизмы; грибной субстрат; групповой состав.

Для цитирования. Шелоник М. А., Янута Г. Г. Динамика изменений группового состава органической массы грибных субстратов при ферментации // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 176–184.

DYNAMICS OF CHANGES IN THE GROUP COMPOSITION OF ORGANIC MASS OF MUSHROOM SUBSTRATES DURING FERMENTATION

M. A. Shelonik, G. G. Yanuta

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The volumes of mushrooms industrial production, unlike many agricultural areas, are growing every year due to the ability to obtain finished products with high content of complete food protein all year round and independence from weather conditions. However, the main limiting factor for its development in the Republic of Belarus is the lack of domestic substrate. To grow mushrooms, the substrate should contain full set of macro- and microelements necessary for their growth and development. Balanced and properly selected nutrient substrate will help ensure high and stable yield throughout the entire production process. For this purpose, a group analysis of nutrient substrates was carried out at the fermentation stage in the mushroom growing process. It has been shown that during the preparation (ripening) of the substrate, changes occur in its group composition, in particular, an increase in the proportion of humic substances is observed due to a decrease in the content of lignin, cellulose and easily hydrolyzed substances.

Keywords: mushroom growing; fermentation; microorganisms; mushroom substrate; group analysis method.

For citation. Shelonik M. A., Yanuta G. G. Dynamics of changes in the group composition of organic mass of mushroom substrates during fermentation. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 176–184.

Введение. Сегодня грибоводство зарекомендовало себя как перспективное направление, благодаря не только получению свежих продуктов, богатых белком, незаменимыми аминокислотами, витаминами, но и невосприимчивости к погодным условиям в сравнении с другими отраслями сельского хозяйства. Рост спроса на выращенные грибы и продукцию на их основе у населения обусловливается повышением осведомленности потребителей о пользе грибов для здоровья и меняющимися пищевыми предпочтениями в сторону веганских продуктов. До 80 % производства грибов сосредоточено в Китае, наибольший объем которых занимают экзотические грибы (шиитакэ, мацутаке, эноки, рейша и др.), а не известные всему миру белые шампиньоны. В Беларуси и России, наоборот, они вместе с вешенками считаются наиболее востребованными продуктами питания. По данным Белстата [1], производство грибов за последние 5 лет увеличилось в 10 раз, и данный показатель продолжит расти с каждым годом на 10–15 %, с чем связывают политику стран в сторону импортозамещения. Эффек-

тивность производства грибной продукции повышается в связи с внедрением высокотехнологичных методов культивирования: поддержания микроклимата на стабильном уровне, автоматизации систем увлажнения, формирования субстрата и покровной почвы и т. д. [2]. Одновременно с этим обманчивая простота технического процесса выращивания не отменяет его сложности в попытках создания оптимальных условий для скорейшего получения плодовых тел. Влияние температуры на скорость роста и качество плодовых тел показано в литературе [2–4]. При этом грибы различных семейств, а часто и различных линий, весьма чувствительны к температурным диапазонам и в ряде случаев реагируют по-разному на данный фактор. Кроме температуры, для каждого вида грибов есть разные условия для роста и развития.

В качестве наглядного примера следует рассмотреть вешенку и шампиньон. Оба представителя относятся к одному семейству Агариковые, но к разным экологическим группам. Вешенка устричная (*Pleurotus ostreatus*) относится к группе ксилотрофных (или дроворазрушающих) грибов, развивающихся на древесине. Для данной группы грибов в качестве субстратов используются побочные лигносодержащие продукты сельского хозяйства, что снижает затраты на производство для них субстрата [5–6]. Шампиньон двуспоровый (*Agaricus bisporus*) относится к группе гумусовых сапротрофов, грибница которых развивается в почве так же, как и микоризных грибов, но, в отличие от них, не образует симбиоза с корнями высших растений. Несмотря на некоторые сходства с растениями, грибы не способны размножаться в «неподготовленном» субстрате, ввиду того что его подготовку осуществляют обитающие там микроорганизмы. Именно подготовка субстрата, а точнее его ферментация с целью создания оптимальных условий для развития микоризы, и является ключевым моментом при создании эффективных субстратов для выращивания грибов, в частности шампиньонов. Однако процесс выращивания и получения свежих шампиньонов осложняется такими этапами в производстве, как приготовление субстрата и покровной почвы. Для этого первым и самым главным этапом в выращивании грибов является приготовление питательного субстрата. Качественный и сбалансированный субстрат служит залогом высокого урожая. Для достижения этой цели грибной субстрат должен обладать следующими критериями: питательностью, гомогенностью и селективностью. В грибоводстве выделяют три типа субстрата: натуральный, полусинтетический, синтетический [2–6]. В состав первых двух входит конский навоз, который менее распространен в Беларуси [7]. Последний тип (с преобладанием куриного помета) является наиболее предпочтительным вариантом, ввиду сильно развитой у нас птицеводческой отрасли. Несмотря на различные рецептуры приготовления, основными компонентами для получения субстрата являются солома злаковых культур (пшеница, рис, рапс и др.), навоз или птичий помет, вода, растительные либо минеральные добавки. Первым этапом при выращивании грибов является увлажнение соломы. Солома, являясь побочным продуктом сельского хозяйства, также выступает основным источником углерода для микроорганизмов [5–8]. Увлажнение служит двум целям: во-первых, помочь снизить количество патогенных микроорганизмов, способных конкурировать с выращенными грибами за ресурсы и пространство, в случае их неустранения; во-вторых, сделать солому более доступной для биодеструкции ее микроорганизмами [9]. Следующим этапом является перемешивание увлажненной соломы с навозом или куриным пометом, которые служат основными источниками азота. После этого происходит один из главных этапов «подготовки» субстрата – ферментация.

Цель работы – изучить динамику изменения в органической части субстрата в процессе его ферментации при различных температурных режимах и с различными компонентами для обоснования температурных режимов ферментации и конкретного состава исходных материалов.

Материалы и методы исследования. В исследовании был проанализирован состав отдельных компонентов, входящих в состав субстратов для выращивания грибов. Образцы были исследованы классическими, общепринятыми методами для определения основных качественных и количественных характеристик, таких как влажность, зольность, групповой состав, ботанический состав, степень разложения. Качество субстрата и его химический состав оценивали с помощью группового анализа органической части по методике Инсторфа [10]. Суть метода заключается в определении класса веществ, растворимых в определенных растворителях. Все вещества на основании данного метода условно делятся на следующие группы: битумы (Б), легкогидролизуемые и водорастворимые вещества (ЛГВ), редуцирующие вещества (РВ), гуминовые вещества (ГВ), трудногидролизуемые вещества (целлюлоза) (ТГВ), негидролизуемые вещества (лигнин) (НГВ). Приготовление субстратов осуществляли по методу Пешке.

Результаты и их обсуждение. Ферментация – это экзотермический процесс, в ходе которого происходит биодegradация исходных компонентов в процессе жизнедеятельности различных групп микроорганизмов. Основные цели ферментации: во-первых, подвергнуть материалы разложению, чтобы изменить состав содержащихся в них органических веществ и создать необходимые условия для роста и развития грибов; во-вторых, обогатить субстрат недостающими питательными веществами и устранить патогенные и конкурирующие организмы [11]. Температурный режим устанавливается в результате саморазогрева за счет деятельности микроорганизмов и является индикатором разви-

тия процесса ферментации. Условно ферментацию можно разделить на четыре температурные стадии: мезофильную (до 40 °С), термофильную (до 60 °С), остывания (до 40 °С) и созревания (до разницы не более 10 °С между средней температурой массы и температурой окружающей среды) [11–12]. В первую очередь температура играет роль ускорителя процесса ферментации субстрата, поскольку считается, что при повышении температуры в пределах от 10 до 50 °С на каждые 10 °С микробные процессы ускоряются в 2–3 раза [13]. Регулирование температуры также помогает селективно регулировать микробиоценоз в субстрате путем создания условий для развития микроорганизмов, индуцирующих соединения, необходимые для развития грибницы (например, бактерий и актиномицет). Для каждой из групп микроорганизмов характерен определенный диапазон температуры, который обеспечивает их оптимальный рост и развитие. Согласно литературным данным, в ферментации в зависимости температурного режима выделяют две группы организмов: термофилы (оптимум развития выше 45 °С) и мезофилы (оптимум развития 25–40 °С) [13–14]. Мониторинг изменения температуры на каждой стадии ферментации важно строго соблюдать. В тех случаях, когда происходит резкое повышение температуры (до 65–85 °С) на начальной стадии ферментации, как правило, будет наблюдаться снижение скорости биodeградации органического субстрата, поскольку такие температуры оказываются выше оптимальных для деятельности мезофильных микроорганизмов [14].

На производстве при приготовлении субстрата традиционно используют технологию с буртами. После смешивания соломы с навозом или куриным пометом формируются бурты. В сформированных буртах ферментация интенсивно происходит только в центре, поскольку на поверхности из-за подсыхания она идет слабее, а в самом низу бурта почти не идет, так как там создаются анаэробные условия для жизнедеятельности микроорганизмов [2–7]. Решением данной проблемы являются перебивки. Технология осуществляется следующим образом: материал из различных зон бурта разрыхляют, аэрируют, увлажняют, а затем снова формируют бурт таким образом, чтобы верхние и нижние слои бурта были в центре, а компост из наиболее благоприятной для ферментации средней зоны находился наверху. Новый бурт формируют на 10–20 см уже старого с целью улучшения режима аэрации [7].

Микроорганизмы в грибном субстрате используют углеродсодержащие компоненты как источники энергии для усвоения азотистых и других веществ, необходимых для создания собственной биомассы. Первую мезофильную стадию ферментации осуществляют мезофильные микроорганизмы, которые с повышением температуры будут замещаться термофилами. Большая часть мезофилов представлена представителями семейства Enterobacteriales (Proteobacteria), которые являются факультативными анаэробами, обитают в почве, желудочно-кишечном тракте людей и животных и активны на ранних стадиях ферментации [12]. Основная функция мезофилов – запуск процесса ферментации и начальное повышение температуры ферментативной смеси. Мезофильные микроорганизмы используют простые и доступные вещества (сахара, пектины), в то время как целлюлоза и гемицеллюлоза для них не доступны. С повышением температуры и истощением субстрата происходит высвобождение аммиака до тех пор, пока его концентрация не достигает токсического уровня для обитающей там микробиоты [13–14].

По мере постепенного повышения температуры в ферментируемом материале создаются благоприятные условия для развития термофильной микробиоты, которая на данном этапе становится доминирующей. В термофильной стадии ферментации более 80 % от общего числа бактерий составляют различные бациллы семейства Bacillus (Firmicutes) и наиболее часто обнаруживаются *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus circulans*, остальные 20 % представители рода *Thermus*, способные расти при температуре 65–82 °С и участвовать в разложении различных макромолекул [14]. Они используют образовавшийся аммиак, органические добавки и отмершие клетки мезофильных бактерий для синтеза микробиологического белка. Под воздействием целлюлолитических ферментов происходит разложение клетчатки до более простых соединений (гемицеллюлоз, декстринов, дисахаридов и т. д.). Образовавшиеся вещества после этого подвергаются окислению и распадаются до углекислого газа и воды с выделением тепла. Одновременно с этим азотсодержащие вещества подвергаются действию аммонифицирующих бактерий с образованием аммиака. Процесс аммонификации белка начинается с гидролиза протеолитических ферментов бактерий и актиномицетов. В результате образуются пептоны, аминокислоты, полипептиды и т. д. Затем в результате дезаминирования часть аминокислот разрушается с образованием аммиака и других органических соединений (спиртов, кетонов, кислот). В аэробных условиях органические кислоты полностью окисляются до углекислого газа и воды с выделением теплоты. В анаэробных условиях окисление жирных кислот не происходит, ввиду их накопления в окружающей среде, что может привести к ингибированию протекающих в необходимом направлении микробиологических процессов. Продукты промежуточного распада, такие как аминокислоты и дипептиды, ассимилируются в процессе микроорганизмами для создания своих клеточных структур [11–12].

На стадии охлаждения и созревания происходят восстановление полезной микробиоты и полное удаление аммиака, чем завершается процесс ферментации и достигается селективность суб-

страта. К концу процесса аммиака не должно быть, поскольку даже в малых концентрациях он является ядом для самих грибов [12–14].

Кроме температуры, влажности, структуры субстрата чрезвычайно важным для эффективной ферментации является показатель отношения углерода к азоту (С : N). Оптимальное для развития микроорганизмов соотношение С : N должно находиться в интервале от 26 до 35. Наличие избытка углерода (сахаров) в исходном материале приводит к тому, что из-за отсутствия достаточной концентрации аммиака не достигается щелочная реакция, которая должна быть неблагоприятной для конкурирующей микробиоты. В случае дефицита углерода нарушаются процессы ассимиляции (т. е. усвоение микроорганизмами аминокислот и белковых веществ) [2, 12, 13].

В качестве объектов исследований были изучены грибные субстраты, приготовленные по классической рецептуре (метод Пешке) и по модифицированной рецептуре с добавлением жома. Выбор свекловичного жома в качестве одного из компонентов субстрата основывается на его физико-химических и экономических составляющих. Свекловичный жом является отходом, который образуется в процессе производства свекловичного сахара. Использование его в отличие от товарного сырья позволяет снизить себестоимость производства субстрата, а наличие питательных веществ – стимулировать развитие мицелия. В состав жома входят (% к общей массе): пектиновые вещества – 48–50, целлюлоза – 22–25, гемицеллюлозы – 21–23, азотистые вещества – 1,8–2,5, зола – 0,8–1,3, сахара – 0,15–0,20, витамины (ВВ В₂, В₆, С и др.), ферменты, небольшие количества жира и фитостеринов, микроэлементов [15–16]. Кроме того, жом обладает высокой водопоглощающей способностью, которая позволяет, если он в сухом виде, увеличивать ему свой объем в 3 раза [17].

Проведение группового анализа начиналось с выделения битумов (Б) – твердых или смолоподобных материалов, представляющих собой смесь углеводов и их производных, которые иногда могут появляться в следовых количествах в грибном субстрате [18]. На рис. 1 представлены данные по битуминозности субстратов. В обоих случаях наблюдается повышение, а затем снижение средних показателей. В среднем выход Б варьировался от 1,5–2 до 8–11 %. Наибольший выход Б отмечался для классического субстрата. Наличие Б может указывать на присутствие в субстрате лигнин- и целлюлолитических микроорганизмов (относятся к группе термофилов), ответственных за гидролиз лигнина и целлюлозы, поскольку их присутствие коррелирует с образованием Б. Лигнин и целлюлоза являются источником питания и энергии для данной группы микроорганизмов, которые участвуют в их расщеплении с выделением сахаров и других соединений, в то время как Б образуются в качестве вторичного продукта [14, 18].

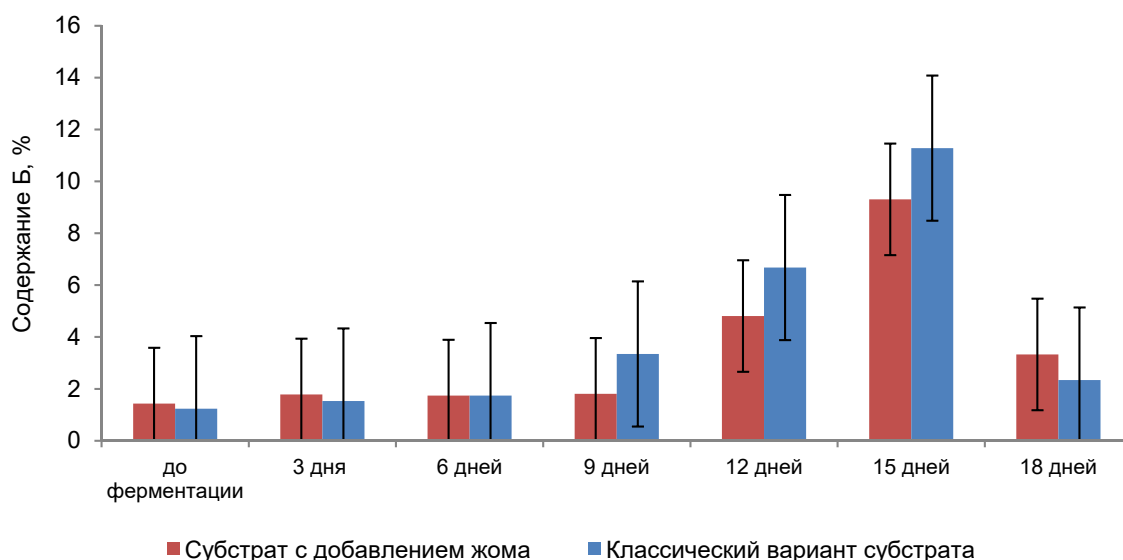


Рис. 1. Динамика изменения общего содержания битумов (Б) на стадии ферментации

Fig. 1. Dynamics of change in the total content bitumens (B) at the fermentation stage

Из всех выделенных соединений наибольшее содержание в субстрате составляют легкогидролизуемые и водорастворимые вещества (ЛГВ), которые включают в свой состав сахара, такие как ксилоза, глюкоза, манноза, галактоза; некоторые полисахариды, минеральные соли и т. д. На рис. 2 представлены результаты содержания ЛГВ от начала и до конца ферментации.

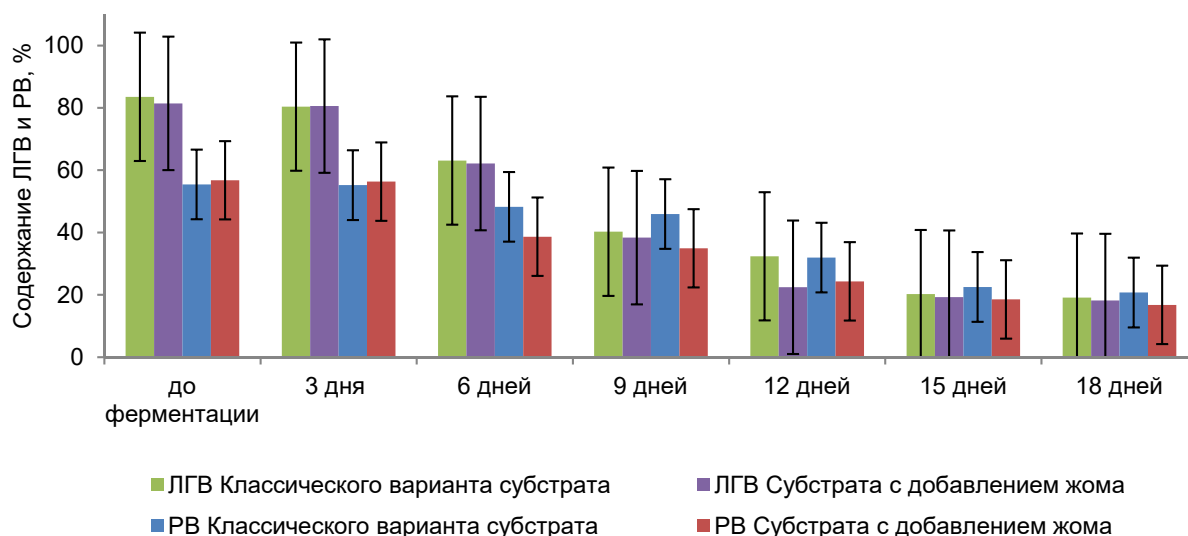


Рис. 2. Динамика изменения общего содержания легкогидролизуемых и водорастворимых веществ (ЛГВ) и редуцирующих веществ (РВ) на стадии ферментации

Fig. 2. Dynamics of changes in total easily hydrolyzable and water-soluble substances (EHWSS) and reducing substances (RS) content at the fermentation stage

Содержание ЛГВ до ферментации составляет 80–83 %, ближе к концу наблюдается снижение показателей до 14–15 %. ЛГВ являются «доступным» источником для мезофильной микробиоты, поэтому начинают первый этап ферментации. В процессе ферментации, в ходе которого субстрат истощается, вначале отмечаются высокие показатели ЛГВ, которые после 3-го дня постепенно уменьшаются как для классического субстрата, так и для субстрата с жомом, что объясняется преобладанием там термофильной микробиоты, способной разлагать ТГВ и НГВ, и выделением высоких концентраций аммиака, ингибирующего развитие мезофилов.

Одновременно с выделением легкогидролизуемых веществ выделялись и редуцирующие вещества (РВ) по методу Макаэна и Шоорля [10]. РВ – это химические соединения, снижающие степень окисления другого вещества, в данном случае грибного субстрата. В субстрате, кроме влияния на кислотность среды, они являются источником питания для мезофильных микроорганизмов на первых стадиях ферментации. К РВ в первую очередь относятся моносахариды (глюкоза, фруктоза), некоторые аминокислоты (глутаминовая, аспарагиновая), органические кислоты (уксусная, лимонная, молочная и т. д.) [13-14]. Анализ эксперимента показывает, что содержание РВ до ферментации находится в пределах 53–56 %, с течением времени данный показатель к концу процесса снижается до 16–20 % (см. рис. 2). Это согласуется с данными, полученными при выделении ЛГВ.

Гуминовые вещества (ГВ) представляют собой сложные смеси высокомолекулярных соединений природного происхождения, образующихся при разложении растительных и животных остатков под действием микроорганизмов и абиотических факторов окружающей среды. ГВ [10,19] подразделяют на две составляющие: гуминовые кислоты (ГК) – фракция ГВ, растворимая в щелочах и нерастворимая в кислотах (при $pH < 2,0$); фульвокислоты (ФК) – фракция ГВ, растворимая и в щелочах, и в кислотах. В исследованиях содержание ГВ достигало 13–15 % (рис. 3), из них большую часть составляли ФК, меньшую часть – ГК.

В процессе расщепления лигнина и целлюлозы происходит образование лигнино-гумусового комплекса, которое схоже с гумусообразованием в почвах. Визуально оно проявляется в виде темных пятен и ломкости самой соломы. Представленный комплекс состоит из «остатков» лигнина и целлюлозы, связанных с ГВ, и является источником питания для грибов, но не для конкурирующей плесени. Тем самым достигается селективность субстрата [14, 20].

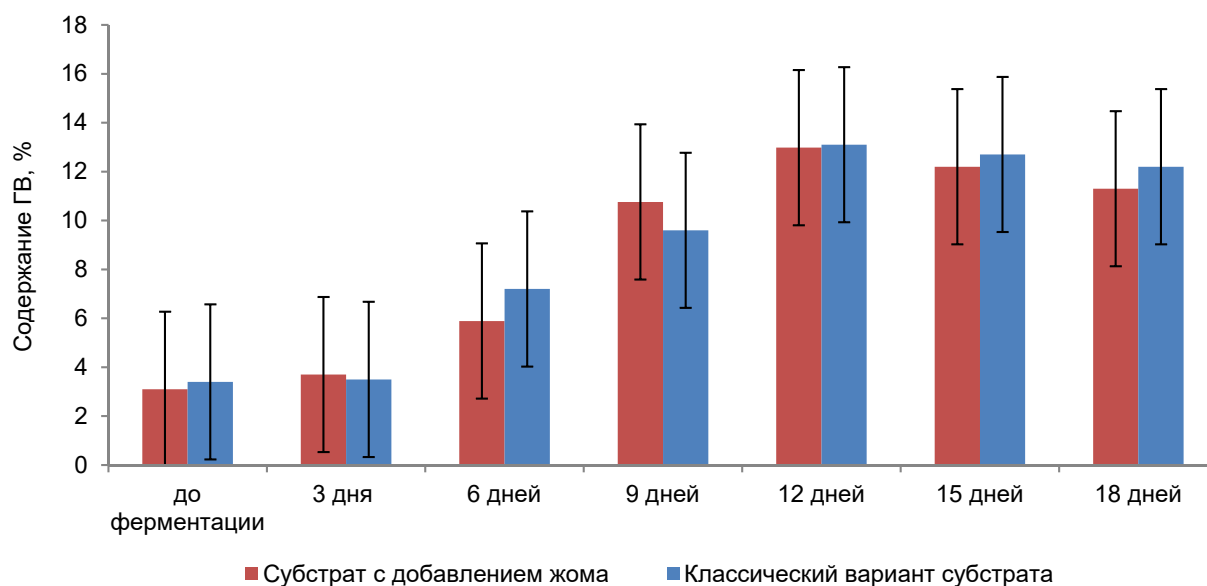


Рис. 3. Динамика изменения общего содержания гуминовых веществ (ГВ) на стадии ферментации

Fig. 3. Dynamics of change in total content humic substances (HC) at the fermentation stage

Ввиду устойчивости ГВ к микробной биодеградации, небольшая часть ГВ может оставаться в субстрате после завершения ферментации и использоваться микроорганизмами в качестве источника питания и энергии. К деструкторам ГВ относятся бактерии родов *Bacillus* и *Lactobacillus*, грибы родов *Chaetomium* и др. [11, 13]. Наблюдается взаимосвязь содержания ГВ и лигнина вместе с целлюлозой: с увеличением показателей ГВ снижается содержание целлюлозы и лигнина. Считается, что формирование ГВ происходит за счет активности бактериальных ферментов (например: феноксидаз, лакказ, пероксидаз), которые выделяются в основном термофильной микробиотой. Как правило, наиболее богаты гумусовыми веществами субстраты на основе отходов ферм, птицефабрик и пищевых производств [13].

Лигнин представляет собой природный биополимер, содержащийся в растительных клетках. В клеточной стенке он связан с другими биополимерами – целлюлозой и гемицеллюлозой, и представляет своеобразный барьер для проникновения ферментов или растворов в лигноцеллюлозную структуру древесины, обеспечивая тем самым защиту и прочность. Наиболее интенсивно разлагают лигнин базидиомицеты, из них класс *Dacrymycetales* и ряд представителей агариковых грибов (*Agaricales*); аскомицеты (*Ascomycetes*); дрожжи (*Saccharomycotina*). Р. Гартиг, впервые описавший процесс биодеградацию древесины грибами, разделил базидиомицеты на две большие группы: грибы белой гнили и грибы бурой гнили [21]. Основное различие между ними заключается в том, что представители первой группы способны разрушать лигнин в клеточной стенке растений и не затрагивать целлюлозу. Представители второй группы, наоборот, предпочитают целлюлозу лигнину. В основном за деградацию лигноцеллюлозной биомассы ответственны бактерии с низким содержанием пар гуанина и цитозина, в частности, относящиеся к *Bacillales*, *Clostridiales*, *Actinomycetales* и *Thermoanaerobacterales* [11–13]. В термофильной стадии было установлено присутствие следующих видов термофильных бактерий, способных разлагать лигниноцеллюлозный комплекс: *Thermoactinomyces vulgaris*, *Actinobifida chromogena*, *Micromonospora carbonacea*, *Streptomyces thermovulgaris*, *Streptomyces lincolnensis*, *Streptomyces variegatus*, *Streptomyces lusitanus* и др. [13]. Общее содержание лигнина для классического субстрата ставило от 2,1–3,0 %, для субстрата с добавлением жома – от 2,2–3,1 % (рис. 4). С целлюлозой ситуация аналогична лигнину. Она также является природным полимером, входящим в состав высших растений и придающим им прочность. Общее содержание для классического субстрата составило от 5,2 до 8,76 %, для субстрата с добавлением жома – от 5,2 до 8,2 % (см. рис. 4). Более высокое содержание целлюлозы может быть связано с возможностью базидиальных грибов как единственных представителей группы грибов белой гнили разлагать преимущественно лигнин. В отличие от грибов большинство актиномицетов-лигнолитиков, обитающих в различных приготовленных компостах, способны лишь сольубилизовать и модифицировать структуру молекулы лигнина, однако их возможности к минерализации лигнина ограничены [11–14].

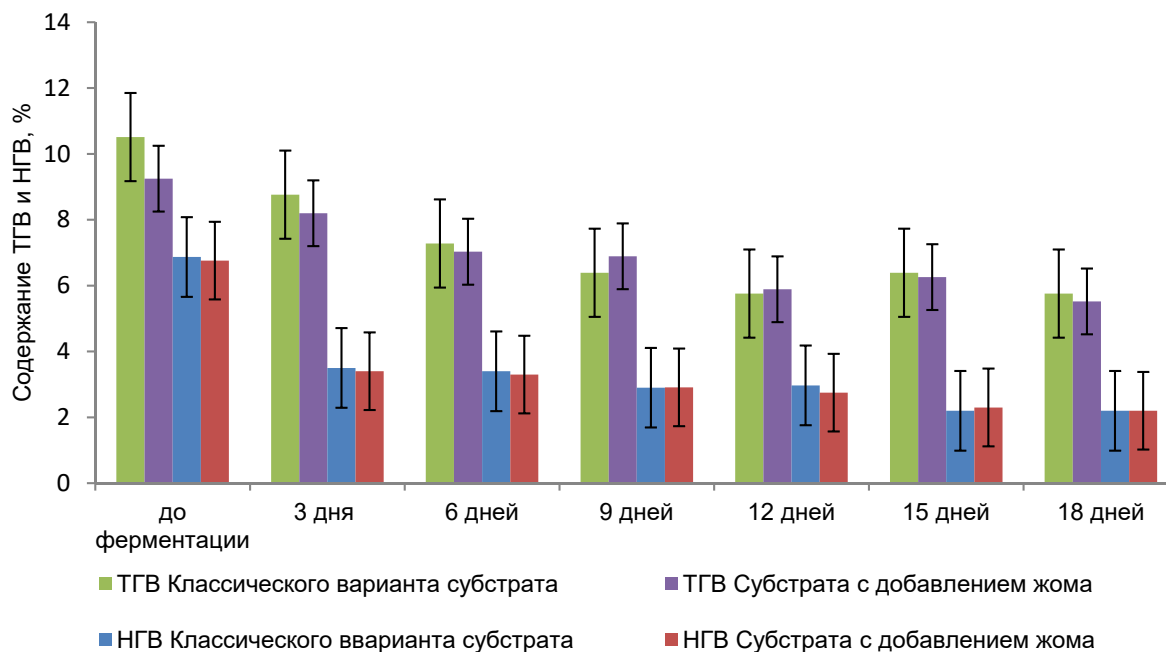


Рис. 4. Динамика изменения общего содержания трудногидролизующих веществ (целлюлозы) (ТГВ) и негидролизующих веществ (лигнин) (НГВ) на стадии ферментации

Fig. 4. Dynamics of changes in total difficult-to-hydrolyze substances (cellulose) (DHS) and non-hydrolyzable substances (lignin) (NHS) content at the fermentation stage

Заключение. Метод изучения оценки группового состава субстрата может являться основой для оценки качества субстрата. Одним из главных показателей является содержание ЛГВ и РВ, поскольку на начальной стадии ферментации они служат источником питания для мезофильной микрофиты, которая на этой стадии активна. В начале ферментации отмечаются высокие показатели ЛГВ, значительная часть которых составляют РВ (до 50 %), в конце отмечается снижение обоих показателей. Из данных литературы известно, что мезофильные микроорганизмы способны усваивать только простые и доступные вещества, такие как сахара и пектины, в то время как сложные соединения (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин) для них пока не доступны. По окончании ферментации наблюдается, что с уменьшением ЛГВ одновременно происходит увеличение ГВ в субстрате. Данный момент возможно объяснить с двух позиций. Первая предполагает истощение питательных веществ, в первую очередь сахаров, первоначально входящих в состав обоих субстратов, мезофильной микрофитой. Другая позиция связана с активной биодegradацией трудноусваиваемых соединений термофилами, в результате которой образуется лигнин-гумусовый комплекс, который будет служить основным источником питания [4, 13, 21]. Вторым показателем является содержание ГВ, возрастающее на протяжении всего процесса ферментации, в ходе которого при расщеплении лигнина и целлюлозы образуется лигнин-гумусовый комплекс, который, согласно источникам литературы, станет перерабатываться грибами, но не будет доступен большей части конкурентной микрофиты.

Присутствующие Б, целлюлоза и лигнин в грибных субстратах позволяют судить о качестве произошедшей ферментации, поскольку между данными показателями отмечается взаимосвязь. Лигнин и целлюлоза служат источником питания и энергии для микроорганизмов, участвующих в их расщеплении с выделением сахаров и других соединений, в то время как Б образуются в качестве вторичного продукта и, как правило, в следовых количествах. Снижение количества лигнина и целлюлозы предполагает более доступную энергию, а соответственно, и меньшую зависимость от внешних питательных веществ (например, сахаров). Содержание целлюлозы и лигнина, которые, будучи менее доступными соединениями для большинства микроорганизмов в самом начале, к концу ферментации уменьшались. Примечательно, что содержание лигнина в субстратах меньше, чем целлюлозы, что согласуется с литературными данными о природе грибов белой гнили, предпочитающих расщепление негидролизующий остаток (лигнин), чем целлюлозу. С уменьшением лигнина и целлюлозы отмечается уменьшение количества Б в субстрате. Контроль уровня всех трех показателей необходим, поскольку при избыточном накоплении Б происходит подавление роста мицелия, что, соответственно, приводит к снижению урожайности, уменьшению размеров грибов и другим неблагоприятным последствиям. В случае недостатка лигнина и целлюлозы происходит ослабление мицелия и снижение его устойчивости к конкурентной микрофите, естественно присутствующей в субстрате.

Список использованных источников

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь – интерактивная информационно-аналитическая система распространения официальной статистической информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=141211>. – Дата доступа: 27.03.2024.
2. Еникиев, Р. И. Технология приготовления питательных субстратов для выращивания шампиньонов / Р. И. Еникиев, А. Р. Ибатуллина // *Novainfo*. – 2017. – № 59. – С. 158–162.
3. Kertesz, M. A. Compost bacteria and fungi that influence growth and development of *Agaricus bisporus* and other commercial mushrooms / M. A. Kertesz, M. Thai // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 102, № 4. – P. 1639–1650.
4. Industrially Important Fungi for Sustainable Development / A. M. Abdel-Azeem [et al.]. – Switzerland : Springer Nature, 2021. – Vol. 1 : Biodiversity and Ecological Perspectives. – 589 p.
5. Гарибова, Л. В. Выращивание грибов / Л. В. Гарибова. – М. : Вече, 2005. – 94 с.
6. Нурметов, Р. Д. Выращивание шампиньонов и вешенки : руководство / Р. Д. Нурметов, Н. Л. Девочкина – М. : Россельхозакадемия, 2010. – 68 с.
7. Иванов А. И. Шампиньоны России (род *Agaricus* L.). Видовой состав, экология, культивирование / А. И. Иванов. – Пенза : RIO ПГАУ. – 2017. – 200 с.
8. Биоконверсия целлюлозосодержащего сырья. ферментативный гидролиз целлюлозы (обзор литературы) / А. А. Шубаков. [и др.] // *Известия Коми научного центра УРО РАН*. – 2022. – Т. 4, № 56. – С. 27–34.
9. Обзор современных исследований по ферментативному гидролизу лигноцеллюлозосодержащего сырья / Ш. Келдиёрова [и др.] // *Вестник науки*. – 2020. – Т. 1, № 24. – С. 96–99.
10. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
11. Микробиологические аспекты выращивания высших грибов / М. Г. Саубенова [и др.] // *Микробиология және вирусология*. – 2021. – Т. 3, № 34. – P. 1–10.
12. Лысак, В. В. Микробиология. Практикум : пособие / В. В. Лысак, Р. А. Желдакова, О. В. Фомина. – Минск : БГУ, 2015. – 115 с.
13. Состав микробного сообщества на разных стадиях компостирования, перспектива получения компоста из муниципальных органических отходов (обзор) / А. Н. Ножевникова [и др.] // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 211–221.
14. Impact of cultivation substrate and microbial community on improving mushroom productivity : a review by / N. Suwanparach [et al.] // *Biology*. – 2022. – Vol. 11, № 4. – P. 1–33.
15. Технические материалы на основе свекловичного жома / Б. А. Кулишов [и др.] // *Вестник технического университета*. – 2015. – Т. 18, № 23. – С. 72–77.
16. Погарелова, Ю. Н. Новые направления использования свекловичного жома в республике Беларусь / Ю. Н. Погарелова, Ж. В. Бондаренко // *Труды БГТУ. Сер. IV, Химия, технология органических веществ и биотехнология / Бел. гос. технол. ун-т*. – Минск, 2009. – Вып. 17. – С. 266–269.
17. Исследование сорбционных свойств целлюлозы свекловичного жома по отношению к ионам никеля / Т. А. Кузнецова [и др.] // *Химия растительного сырья*. – 2020. – № 2. – С. 307–314.
18. Pannekens, M. Natural bitumen is an extraordinary habitat for microorganisms : dr. rer. nat sci. diss. / M. Pannekens. – Dustburg, 2021, 155 p.
19. Орлов, Д. С. Химия почв / Д. С. Орлов. – М. : Изд-во МГУ, 1992. – 259 с.
20. Kulikova, N. A. Interactions between Humic Substances and Microorganisms and Their Implications for Nature-like Bioremediation Technologies / N. A. Kulikova, I. V. Perminova // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26, № 9. – P. 1–32.
21. Феофилова, Е. П. Лигнин: химическое строение, биодegradация, практическое использование (обзор) / Е. П. Феофилова, И. С. Мысякина // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2016. – Т. 52, № 6. – С. 559–569.

References

1. *Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'. Interaktivnaya informacionno-analiticheskaya sistema rasprostraneniya oficial'noj statisticheskoy informacii* [National Statistical Committee of the Republic of Belarus. Interactive information and analytical system for disseminating official statistical information]. Available at: <http://dataportal.belstat.gov.by/Indicators/Preview?key=141211> (accessed 27 March, 2024).
2. Enikiev R. I., Ibatullina A. R. *Tekhnologiya prigotovleniya pitatel'nyh substratov dlya vyrashchivaniya shampin'onov* [Technology for preparing nutrient substrates for growing champignons]. *Novainfo*, 2017, no. 59, pp. 158–162. (in Russian)
3. Kertesz M. A., Thai M. Compost bacteria and fungi that influence growth and development of *Agaricus bisporus* and other commercial mushrooms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, vol. 102, no. 4, pp. 1639–1650.
4. Abdel-Azeem A. M., Yadav A. N., Yadav N., Usmani Z. Industrially Important Fungi for Sustainable Development. Volume 1: Biodiversity and Ecological Perspectives. Switzerland, Springer Nature, 2021, 589 p.
5. Garibova L. V. *Vyrashchivanie gribov* [Growing mushrooms]. Moscow, Veche Publ., 2005, 94 p. (in Russian)
6. Nurmetov R. D., Devochkina N. L. *Vyrashchivanie shampin'onov i veshenki: rukovodstvo* [Growing champignons and oyster mushrooms: a guide]. Moscow, Russian Agricultural Academy Publ., 2010, 68 p. (in Russian)
7. Ivanov A. I. *Shampin'onny Rossii (rod Agaricus L.). Vidovoj sostav, ekologiya, kul'tivirovanie* [Champignons of Russia (genus *Agaricus* L.). Species composition, ecology, cultivation]. Penza, RIO PSAU Publ., 2017, 200 p. (in Russian)

8. Shubakov A. A., Mikhailova E. A., Martynov V. V. *Biokonversiya cellyulozosoderzhashchego syr'ya. fermentativnyj gidroliz cellyulozy (obzor literatury)* [Bioconversion of cellulose-containing raw materials. enzymatic hydrolysis of cellulose (literature review)]. *Izvestiya Komi nauchnogo centra URO RAN = News of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the RAS*, 2022, vol. 4, no. 56, pp. 27–34. (in Russian)
9. Keldiyorova Sh., Toshmurodov D., Alikulov B. *Obzor sovremennyh issledovaniy po fermentativnomu gidrolizu lignocellyulozosoderzhashchego syr'ya* [Review of modern research on the enzymatic hydrolysis of lignocellulose containing raw materials]. *Vestnik Nauki = Bulletin of Science*, 2020, vol. 1, no. 24, pp. 96–99. (in Russian)
10. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ih opredeleniya* [Basic properties of peat and methods for their determination]. Minsk, Science and Technology Publ., 1975, 320 p. (in Russian)
11. Saubenova M. G., Oleynikova E. A., Ermekbay Zh. N., Aitzhanova A. A., Bokenov D. D. *Mikrobiologicheskie aspekty vyrashchivaniya vysshih gribov* [Microbiological aspects of growing higher mushrooms]. *Mikrobiologiya zhene virusologiya = Microbiology and Virology*, 2021, vol. 3, no. 34, pp. 1–10. (in Russian)
12. Lysak, V. V., Zheldakova R. A., Fomina O. V. *Mikrobiologiya. Praktikum* [Microbiology. Workshop]. Minsk, BSU Publ., 2015, 115 p. (in Russian)
13. Nozhevnikova A. N., Mironov V. V., Botchkova E. A., Litt Y. I., Rusakova Y. V. *Sostav mikrobnogo soobshchestva na raznyh stadiyah kompostirovaniya, perspektiva polucheniya komposta iz municipal'nyh organicheskikh othodov (obzor)* [Composition of the microbial community at different stages of composting, prospects for obtaining compost from municipal organic waste (review)]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied Biochemistry and Microbiology*, 2019, vol. 55, no. 3, p. 211–221. (in Russian)
14. Suwannarach N., Kumla J., Zhao Y., Kakumyan P. Impact of cultivation substrate and microbial community on improving mushroom productivity. *Biology*, 2022, vol. 11, no. 4, pp. 1–33.
15. Kulishov B. A., Zimagulova L. A., An T. L., Kanarsky A. V. *Tekhnicheskie materialy na osnove sveklovichnogo zhoma* [Technical materials based on beet pulp]. *Vestnik tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Technical University*, 2015, vol. 18, no. 23, pp. 72–77. (in Russian)
16. Pogarelova Yu. N., Bondarenko Zh. V. *Novye napravleniya ispol'zovaniya sveklovichnogo zhoma v respublike Belarus'* [New directions for the use of beet pulp in the Republic of Belarus]. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. IV, Himiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya* [Proc. of the Belarusian State Technological University. Ser. IV, Chemistry, Technology of Organic Substances and Biotechnology]. Minsk, 2009, no. 17, pp. 266–269. (in Russian)
17. Kuznetcova T. A., Pestov N. A., Revin V. V. *Issledovanie sorbcionnyh svoystv cellyulozy sveklovichnogo zhoma po otnosheniyu k ionam nikelya* [Study of the sorption properties of beet pulp cellulose in relation to nickel ions]. *Himiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2020, no. 2, pp. 307–314. (in Russian)
18. Pannekens M. Natural bitumen is an extraordinary habitat for microorganisms. Diss. dr. rer. nat sci. Dustburg, 2021, 155 p.
19. Orlov D. S. *Himiya pochv* [Soil chemistry]. Moscow, MSU Publ., 1992, 259 p. (in Russian)
20. Kulikova N. A., Perminova I. V. Interactions between humic substances and microorganisms and their implications for nature-like bioremediation technologies. *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 9, pp. 1–32.
21. Feofilova E. P., Mysyakina I. S. *Lignin: himicheskoe stroenie, biodegradaciya, prakticheskoe ispol'zovanie (obzor)* [Lignin: chemical structure, biodegradation, practical use (review)]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied Biochemistry and Microbiology*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 559–569. (in Russian)

Информация об авторах

Янута Григорий Григорьевич – кандидат биологических наук, доцент, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanutag@rumbler.by

Шелоник Мария Александровна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: maria.shelonik006@gmail.com

Information about authors

Grigoriy G. Yanuta – Ph. D. (Biological), Assistant Professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanutag@rumbler.by

Mariya A. Shelonik – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: maria.shelonik006@gmail.com