Лекция 6. Основные технологии биообработки зерна

Кафедра биотехнологии, КазНУ имени аль-Фараби
проф. д.б.н. Кенжебаева С.С.

Цель лекции. Ожидаемые результаты освоения лекции

- **Цель лекции**

Сформировать у обучающихся системное представление о современных технологиях биообработки зернового сырья, принципах их действия, механизмах ферментативной и микробной модификации компонентов зерна, а также их промышленном применении для получения пищевых, кормовых и биотехнологических продуктов с улучшенными функциональными свойствами.

✓ объяснять принципы современных технологий биообработки зерновых культур;

✓ классифицировать основные методы биоконверсии зерна;

✓ объяснять механизмы действия ферментов и микроорганизмов;

✓ анализировать влияние различных технологий на химический состав и качество зерна;

✓ выбирать рациональную технологию биообработки для конкретной производственной задачи;

✓ оценивать преимущества, ограничения и перспективы современных биотехнологий переработки зернового сырья

Содержание лекции

- **1. Введение -** Понятие биообработки зернового сырья.
- **2. Ферментативная обработка зерна - амилазы; протеазы; ксиланазы; целлюлазы; β-глюканазы; фитазы; липазы.**
- **3. Микробная ферментация - зерна**молочнокислые бактерии; дрожжи; Bacillus; Aspergillus; твердофазная ферментация.
- **4. Биоконверсия зернового сырья -** проращивание; солодоращение; ферментативный гидролиз; получение биоактивных соединений.
- **5. Иммобилизованные ферменты и клетки -** преимущества; современные носители; промышленное применение.
- **6. Современные биореакторы -** реакторы периодического действия; непрерывные биореакторы; колонные; packed-bed; fluidized-bed; мембранные реакторы.
- **7. Инновационные технологии -** мультиферментные системы; нанобиотехнологии; искусственный интеллект; цифровые биореакторы; синтетическая биология.
- **8. Промышленное применение -** хлебопечение; производство комбикормов; биоэтанол; функциональные продукты; переработка побочных продуктов.
- **9. Преимущества, ограничения и перспективы**

Методы биообогащения зерновых культур.

Биообогащение (биофортификация) — повышение содержания или биодоступности необходимых питательных веществ в зерне с использованием агрономических, генетических и биотехнологических подходов.

1. Агрономическое биообогащение

- Внесение микроэлементов (Zn, Fe, Se) через почву или внекорневые подкормки.
- Оптимизация минерального питания растений для повышения накопления микроэлементов в зерне.

2. Генетическое и селекционное биообогащение

- Отбор сортов и линий с повышенным содержанием Fe, Zn и других питательных веществ.
- Использование традиционной селекции, молекулярных маркеров и геномных технологий.

Методы биообогащения зерновых культур.

3. Биотехнологическое биообогащение

- Применение генной инженерии и редактирования генома для изменения накопления и распределения питательных веществ.
- Регуляция генов транспорта, хелатирования и депонирования микроэлементов.

4. Микробиологическое биообогащение

- Использование полезных ризосферных микроорганизмов, повышающих доступность минеральных элементов.
- Применение микробных инокулянтов, способствующих усвоению питательных веществ растениями.

5. Повышение биодоступности при биообработке зерна

- Проращивание, ферментация и применение фитаз для снижения содержания фитатов.
- Повышение потенциальной доступности Fe и Zn без обязательного увеличения их общего содержания в зерне.

Основной вывод: Комплексное применение агрономических, селекционных и биотехнологических методов позволяет улучшать питательную ценность зерновых культур и повышать эффективность использования микроэлементов.

Биофортификация зерна в процессе выращивания и повышение биодоступности минералов при переработке зерна — взаимодополняющие, но не тождественные подходы. Это разграничение важно для магистрантов.

Методы биообогащения зерновых культур.

Метод	Объект	Микроэлемент	Эффект
Фитазная обработка	Зерно, отруби	Fe, Zn	↑ биодоступность
Микробная ферментация	Зерно	Fe, Zn	↓ фитаты
Комбинированные технологии	Зерно	Fe, Zn, Mg	Комплексное биообогащение
Использование хелатов	Сырьё	Mg	↑ усвояемость

Биотехнологические методы биообогащения

Биообогащение микроэлементами достигается за счёт сочетания **ферментативной биообработки, микробной ферментации и использования биодоступных форм микроэлементов.**

Биотехнологические методы биообогащения зерновых культур

1. Генетическая инженерия

1. Введение и регулирование экспрессии генов, контролирующих накопление макро- и микроэлементов (Fe, Zn), БАВ и витаминов.
2. Модификация биосинтеза и транспорта питательных веществ для повышения их содержания в зерне.

2. Редактирование генома (CRISPR/Cas)

1. Направленная модификация генов транспорта и депонирования микроэлементов.
2. Изменение метаболических путей, влияющих на содержание фитатов и биодоступность минералов.
3. Возможность одновременного редактирования гомеологичных генов у полиплоидной пшеницы.

3. Клеточная селекция и индуцированный мутагенез

Создание генетического разнообразия с использованием физических и химических мутагенов.

Отбор клеточных культур и мутантных линий с изменённым накоплением минеральных элементов.

Получение перспективного исходного материала для селекции биообогащённых сортов.

Биотехнологические методы биообогащения зерновых культур

- **4. Молекулярно-маркерные технологии**
- Выявление генов и количественных локусов (QTL), связанных с содержанием Fe, Zn и белка в зерне.
- Применение SNP-маркеров, GWAS и геномной селекции для отбора перспективных генотипов.
- **5. Метаболическая инженерия**
- Регуляция биосинтеза каротиноидов, витаминов и других питательно ценных соединений.
- Модификация путей синтеза никотианамина и других хелаторов, участвующих в транспорте металлов.

Основной вывод: Современные биотехнологические методы позволяют целенаправленно изменять накопление и биодоступность питательных веществ, создавая новые возможности для получения зерновых культур с повышенной пищевой ценностью.

- **Генетическая инженерия и CRISPR/Cas обеспечивают целевые изменения, тогда как индуцированный мутагенез создаёт преимущественно случайную наследственную изменчивость. Повышение содержания минералов необходимо подтверждать аналитическими измерениями зерна, а их биодоступность оценивать отдельно.**

Влияние биообработки на пищевую ценность и безопасность

1. Повышение пищевой ценности

- Ферментативный гидролиз и ферментация способствуют расщеплению сложных углеводов и белков.
- Образование пептидов, свободных аминокислот и других биологически активных соединений.
- Улучшение усвояемости отдельных питательных компонентов зерна.

2. Повышение биодоступности минеральных веществ

- Активация эндогенных и микробных фитаз способствует гидролизу фитиновой кислоты.
- Снижение содержания фитатов может повышать биодоступность Fe, Zn и других минералов.
- Проращивание и молочнокислая ферментация способствуют изменению минеральной доступности.

3. Модификация биоактивных соединений

- Ферменты и микроорганизмы способствуют высвобождению связанных фенольных кислот.
- Биотрансформация может изменять антиоксидантные свойства зерновых продуктов.
- Возможно повышение содержания отдельных доступных форм биологически активных веществ.

Влияние биообработки на пищевую ценность и безопасность

4. Повышение микробиологической безопасности

- Контролируемая молочнокислая ферментация снижает pH и подавляет рост ряда нежелательных микроорганизмов.
- Некоторые заквасочные культуры синтезируют органические кислоты и антимикробные соединения.
- Эффективность зависит от используемых культур, условий ферментации и исходной микробной обсеменённости.

5. Снижение содержания нежелательных соединений

- Ферментация может уменьшать содержание отдельных антипитательных факторов.
- Некоторые микроорганизмы способны трансформировать определённые микотоксины, однако безопасность продуктов их превращения требует отдельной оценки.
- Необходим контроль микотоксинов, патогенных микроорганизмов и других загрязнителей.

Основной вывод: Контролируемая биообработка зернового сырья способствует улучшению пищевой ценности, биодоступности питательных веществ и отдельных показателей безопасности зерновых продуктов.

Важно: Биообработка не гарантирует устранения всех опасных загрязнителей и не заменяет санитарно-гигиенический контроль, надлежащую производственную практику и систему HACCP.

Технологическая схема биообогащения

– Биообработка и биообогащение микроэлементами (A–C)

- A – подготовка зерна (очистка, гидратация);
  B – биообработка (ферментация + фитазный гидролиз);
  C – продукт с повышенной биодоступностью Fe, Zn и Mg.

Практическое значение и перспективы

- Биообогащённые растительные материалы обладают повышенной пищевой ценностью и могут использоваться для производства функциональных продуктов питания и кормов. Данные технологии имеют особое значение для регионов с дефицитом микроэлементов.

Схема: Биообработка и биообогащение микроэлементами

- Процесс направлен на преодоление основной проблемы зерновых культур — высокого содержания **фитиновой кислоты** (антипитательного фактора), которая связывает катионы металлов в нерастворимые комплексы, препятствуя их усвоению.
- **Этап А: Подготовка зерна**
- Первичный этап, закладывающий основу для эффективного протекания биохимических реакций.
- **Очистка:** Удаление примесей, поврежденных зерен и микробной контаминации.
- **Гидратация (Замачивание):** Насыщение зерна влагой активирует эндогенные (внутренние) ферменты самого зерна и подготавливает субстрат для последующей ферментации.
- .

Схема: Биообработка и биообогащение микроэлементами

- **Этап В: Биообработка (Технологическое ядро)**
- На этом этапе происходят глубокие структурные изменения химического состава:
- **Ферментация:** Использование специфических штаммов микроорганизмов (например, молочнокислых бактерий) снижает pH среды. Это создает оптимальные условия для работы ферментов.
- **Фитазный гидролиз:** Ключевой процесс, при котором фермент **фитаза** расщепляет фитиновую кислоту (инозитолгексафосфат).
  - *Результат:* Высвобождение связанных ионов металлов (Fe^{2+}, Zn^{2+}, Mg^{2+}) из состава фитатов.

Схема: Биообработка и биообогащение микроэлементами

- **Этап С: Готовый продукт с повышенной биодоступностью**
- Конечный результат биообработки характеризуется качественно новыми диетологическими свойствами:
- **Железо (Fe):** Повышение абсорбции в ЖКТ, что критично для профилактики анемии.
- **Цинк (Zn):** Улучшение усвоения для поддержки иммунной функции и белкового синтеза.
- **Магний (Mg):** Повышение доступности для метаболических процессов и энергетического обмена.

Промышленное применение технологий биообработки зернового сырья

Отрасль	Биотехнология	Конечный продукт
☐ **Хлебопечение**	Амилазы, ксиланазы, протеазы, заквасочные культуры	Хлеб, булочные изделия, цельнозерновые продукты
☐ **Пивоварение и солодовенное производство**	Проращивание, α-амилаза, β-амилаза, протеазы	Солод, пиво, виски, ферментированные напитки
☐ **Производство круп и пищевых концентратов**	Ферментация, фитаза	Каши, хлопья, продукты быстрого приготовления
☐ **Кормовая промышленность**	Фитаза, ксиланазы, целлюлазы, пробиотики	Комбикорма с повышенной усвояемостью
☐ **Биоэтанольная промышленность**	Амилазы, глюкоамилазы, дрожжи	Биоэтанол и биотопливо
☐ **Функциональные продукты питания**	Молочнокислая ферментация, проращивание	Продукты с повышенным содержанием витаминов и антиоксидантов

Основные эффекты биообработки

- ✓ повышение усвояемости белков;
- ✓ увеличение биодоступности Fe, Zn, Mg и Ca;
- ✓ снижение содержания фитиновой кислоты;
- ✓ улучшение вкуса, аромата и текстуры продукции;
- ✓ увеличение срока хранения;
- ✓ повышение выхода готовой продукции;
- ✔ снижение энергозатрат производства

Преимущества, ограничения и перспективы биообработки зерна. Преимущества, ограничения и перспективы развития технологий

- Преимущества
- **Высокая селективность** воздействия на компоненты зерна.
- **Экологическая безопасность** процесса.
- **Минимальное использование химических реагентов.**
- **Повышение пищевой и биологической ценности продукции.**
- **Улучшение функциональных свойств зернового сырья.**
- **Повышение биодоступности витаминов и микроэлементов.**
- **Энергосбережение и снижение углеродного следа производства.**

Перспективы развития биообработки зернового сырья

1. Совершенствование ферментативных технологий

- Разработка высокоактивных и стабильных ферментных препаратов.
- Применение многокомпонентных ферментных комплексов для глубокой переработки зерна.

2. Развитие микробных биотехнологий

- Использование специализированных штаммов и микробных консорциумов.
- Оптимизация ферментации для получения функциональных пищевых ингредиентов.

3. Интеграция биотехнологических процессов

- Сочетание проращивания, ферментативного гидролиза и микробной ферментации.
- Повышение эффективности использования питательных и биоактивных компонентов зерна.

4. Разработка функциональных продуктов

- Повышение биодоступности Fe, Zn и других минеральных веществ.
- Получение пищевых волокон, биоактивных пептидов и фенольных соединений.

5. Устойчивое биопроизводство

- Комплексное использование зерна и побочных продуктов его переработки.
- Снижение энергозатрат, образования отходов и экологической нагрузки.

Современные технологии прецизионной ферментации

Прецизионная ферментация — использование специально подобранных или генетически модифицированных микроорганизмов для направленного получения определённых соединений.

- Целевые продукты: ферменты, витамины, белки, органические кислоты и другие метаболиты.
- Микробные продуценты: дрожжи, бактерии и микроскопические грибы.
- Субстраты: доступные сахара, в том числе полученные при гидролизе зернового крахмала.
- Оптимизация: управление метаболическими путями, составом среды и условиями культивирования.
- Преимущества: высокая специфичность биосинтеза и возможность стандартизации качества продукта.

Применение: получение ценных ингредиентов с использованием углеводных ресурсов зернового сырья.

Биотехнологическое получение функциональных ингредиентов из зерна: основные группы

Функциональные ингредиенты — компоненты зернового сырья, обладающие питательными, физиологическими или технологическими свойствами, которые могут использоваться при разработке продуктов с заданными характеристиками.

1. Пищевые волокна и олигосахариды

- Арабиноксиланы, β-глюканы и арабиноксилоолигосахариды.
- Отдельные фракции обладают пребиотическим потенциалом и способствуют поддержанию кишечной микробиоты.

2. Биоактивные пептиды

- Образуются при ферментативном гидролизе белков пшеницы, овса и других зерновых культур.
- Некоторые пептиды проявляют антиоксидантную и другие виды биологической активности в экспериментальных исследованиях.

3. Фенольные соединения

- Феруловая, р-кумаровая и другие фенольные кислоты.
- Ферментативная обработка способствует высвобождению связанных фенольных соединений из клеточных стенок зерна.

4. Ферментированные зерновые ингредиенты

- Содержат продукты микробного метаболизма: органические кислоты, пептиды и другие соединения.
- Могут характеризоваться улучшенными вкусовыми и функционально-технологическими свойствами.

Основной вывод: Зерновые культуры являются перспективным источником функциональных ингредиентов, состав и свойства которых можно направленно изменять биотехнологическими методами.

Биотехнологическое получение функциональных ингредиентов из зерна

Основные группы функциональных ингредиентов:

1. • Арабиноксилоолигосахариды — получают ферментативным гидролизом арабиноксиланов зерновых оболочек; отдельные фракции обладают пребиотическим потенциалом.
2. • Биоактивные пептиды — образуются при контролируемом протеолизе зерновых белков.
3. • Фенольные соединения — высвобождаются из клеточных стенок под действием эстераз и других ферментов.
4. • Модифицированные пищевые волокна — характеризуются изменённой растворимостью и функционально-технологическими свойствами.
5. • Ферментированные зерновые ингредиенты — могут содержать органические кислоты и другие продукты микробного метаболизма.

- *Практическое значение: разработка функциональных продуктов питания с улучшенными питательными и технологическими характеристиками.*

Технологии получения функциональных ингредиентов и их применение

1. Ферментативный гидролиз

- Ксиланазы и β-глюканазы модифицируют некрахмальные полисахариды зерна.
- Протеазы обеспечивают получение пептидных фракций из зерновых белков.
- Феруловилэстеразы способствуют высвобождению связанных фенольных кислот.

2. Микробная ферментация

- Молочнокислые бактерии преобразуют доступные углеводы и изменяют состав зернового субстрата.
- Дрожжи и микроскопические грибы участвуют в биосинтезе ферментов и других метаболитов.
- Контролируемая ферментация может улучшать пищевые и органолептические свойства продуктов.

3. Комбинированные технологии

- Последовательное применение ферментативного гидролиза и микробной ферментации.
- Сочетание проращивания, биоконверсии и выделения целевых соединений.
- Оптимизация выхода и функциональных свойств ингредиентов.

Практическое применение **Технологии получения функциональных ингредиентов**

Функциональные ингредиенты	Направления применения
Арабиноксилоолигосахариды	Пребиотические ингредиенты при подтверждённой активности
β-Глюканы	Продукты с повышенным содержанием растворимых пищевых волокон
Белковые гидролизаты	Белковые и специализированные пищевые ингредиенты
Фенольные соединения	Разработка ингредиентов с антиоксидантными свойствами
Ферментированные зерновые компоненты	Хлебобулочные и другие зерновые продукты

Основной вывод: Интеграция ферментативных и микробных технологий позволяет получать из зернового сырья разнообразные ингредиенты с заданными питательными и функционально-технологическими характеристиками.

Цифровизация и автоматизация процессов биообработки зерна

- **Современные направления:**
- 1. Автоматизированные биореакторы — регулирование температуры, pH, аэрации и перемешивания.
- 2. Онлайн-мониторинг — контроль концентрации субстратов, продуктов метаболизма и технологических параметров.
- 3. Спектроскопические методы — применение ближней инфракрасной спектроскопии (NIR) для экспресс-оценки состава сырья и продуктов.
- 4. Математическое моделирование — прогнозирование кинетики ферментативного гидролиза и микробной ферментации.
- 5. Искусственный интеллект — анализ многопараметрических данных и оптимизация режимов переработки.
- *Основной результат: повышение воспроизводимости процессов, стабильности качества продукции и эффективности использования ресурсов.*

Комплексная биообработка зерна в концепции биорефинерии

Биорефинерия — система комплексной переработки биологического сырья с получением нескольких видов ценной продукции.

- Зерновое сырьё и побочные продукты
- Зерно, отруби, солома, шелуха
- Фракционирование
- Крахмал, белки, волокна
- Ферментативный гидролиз
- Сахара, олигосахариды
- Микробная ферментация
- Кислоты, биомасса, спирты
- Пищевые ингредиенты • Биохимикаты • Биотопливо • Кормовые продукты

Преимущества: каскадное использование компонентов сырья, расширение ассортимента продукции и снижение образования отходов.

Основные проблемы и направления совершенствования биообработки зерна

Проблема	Перспективное решение
Высокая стоимость ферментных препаратов	Иммобилизация и повторное использование ферментов
Низкая доступность структурных полисахаридов	Предварительная обработка и ферментные комплексы
Нестабильность микробной ферментации	Контроль параметров и применение стандартизированных культур
Изменчивость состава зернового сырья	Аналитический мониторинг и адаптация режимов
Риск образования нежелательных метаболитов	Контроль безопасности сырья и готовой продукции
Высокие производственные затраты	Интеграция процессов и ресурсосберегающие технологии

Основной вывод: Дальнейшее развитие биообработки зерна связано с интеграцией биокатализа, микробных технологий, автоматизации и принципов устойчивого производства

Ограничения биообработки зерна.

- Высокая стоимость некоторых ферментных препаратов.
- Чувствительность ферментов к температуре и pH.
- Необходимость строгого контроля технологического процесса.
- Возможная вариабельность активности микроорганизмов.
- Ограниченный срок хранения отдельных биопрепаратов.
- Необходимость соблюдения требований биологической безопасности.

Перспективы развития биообработки зернового сырья

- Разработка высокоэффективных рекомбинантных ферментов.
- Применение иммобилизованных ферментов и микробных клеток.
- Использование методов синтетической биологии.
- Интеграция искусственного интеллекта для оптимизации биопроцессов.
- Создание цифровых биореакторов и систем мониторинга в режиме реального времени.

Заключение

- 1. Биообработка зернового сырья объединяет ферментативные, микробиологические и комбинированные технологии, направленные на модификацию его химического состава и структуры.
- 2. Ферментативный гидролиз, проращивание и ферментация способствуют повышению доступности отдельных питательных веществ и улучшению функциональных свойств зерновых продуктов.
- 3. Агрономические, селекционные и биотехнологические методы биообогащения расширяют возможности повышения содержания Fe, Zn и других ценных компонентов зерна.
- 4. Контролируемая биообработка может улучшать отдельные показатели пищевой безопасности, однако требует обязательного микробиологического и токсикологического контроля.
- 5. Развитие прецизионной ферментации, цифрового мониторинга и интегрированных биопроцессов открывает новые возможности глубокой переработки зернового сырья.
- 6. Комплексное использование зерна и побочных продуктов способствует созданию функциональных пищевых ингредиентов и развитию циркулярной биоэкономики.

Основной вывод: Современные технологии биообработки зерна являются важным инструментом повышения пищевой ценности, качества и эффективности переработки зерновых культур.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные цели и направления биотехнологической обработки зернового сырья?
2. Какие ферментативные и микробиологические методы применяются для биообработки зерна?
3. Как проращивание и ферментация влияют на пищевую ценность и биодоступность питательных веществ?
4. Какие существуют методы биообогащения зерновых культур железом, цинком и другими микроэлементами?
5. Какую роль играют генетическая инженерия, CRISPR/Cas и молекулярные маркеры в биообогащении зерна?
6. Какие функциональные ингредиенты можно получать из зерновых культур и побочных продуктов их переработки?
7. Как ферментативный гидролиз и микробная ферментация используются для получения биоактивных пептидов, олигосахаридов и фенольных соединений?
8. В чём заключаются особенности прецизионной ферментации и её перспективы в переработке зернового сырья?
9. Как цифровизация, автоматизация и искусственный интеллект способствуют оптимизации процессов биообработки зерна?
10. Каковы преимущества интегрированных биотехнологий и концепции биорефинерии для устойчивой переработки зерновых культур?

Литература

1. Мелешкина Е.П., Витол И.С. Актуальные направления развития науки о зерне. Обзор // Пищевые системы. 2024. Т. 7, № 3. С. 444–453. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-3-444-453.
2. Витол И.С., Мелешкина Е.П. Ферментативные гидролизаты зерна и продуктов его переработки. Обзор предметного поля // Пищевые системы. 2025. Т. 8, № 1. С. 144–152. DOI: 10.21323/2618-9771-2025-8-1-144-152.
3. Римарева Л.В., Серба Е.М., Соколова Е.Н., Борщева Ю.А., Игнатова Н.И. Ферментные препараты и биокаталитические процессы в пищевой промышленности // Вопросы питания. 2017. Т. 86, № 5. С. 63–74.
4. Bilal M., Iqbal H.M.N. State-of-the-art strategies and applied perspectives of enzyme biocatalysis in the food sector. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020;60(12):2052–2066.
5. Choi J.M., Han S.S., Kim H.S. Industrial applications of enzyme biocatalysis: Current status and future aspects. *Biotechnology Advances*. 2015;33:1443–1454.
6. He M., Koris A., Csighy A., et al. Enhancing high-fibre cereal food quality through microbial-enzymatic processing: Mechanisms, applications, and prospects. *Food Chemistry*. 2026;502:147645. (ScienceDirect)
7. Zhu X., Feng K., Dai X., et al. Separation and identification of microbial enzymes on cereal grains/oilseeds and their activity assessment and effects on the quality of processing products: A comprehensive review. *LWT – Food Science and Technology*. 2025;227:118031. (ScienceDirect)
8. Microbial fermentation of cereals: Nutritional, techno-functional, and compositional transformations toward data-driven process optimization. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2026. (Tandfonline)
9. Gobbetti M., Di Cagno R., De Angelis M. Functional microorganisms for cereal fermentation. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2020;11:95–120.
10. Shewry P.R., Hey S.J. The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*. 2015;4:178–202.
11. Arendt E.K., Zannini E. *Cereal Grains for the Food and Beverage Industries*. 2nd ed. Woodhead Publishing; 2022.