

# НАНОСТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗЕРНА ОЗИМОЙ РЖИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСТРУЗИИ

**Е.В. СЛАВНОВ,**

*доктор технических наук, профессор,  
заведующий лабораторией,*

**Е.А. ЛЯПУНОВА,**

*аспирант, Институт механики сплошных сред УрО РАН*

**В.П. КОРОБОВ,**

*кандидат медицинских наук, доцент,  
заведующий лабораторией,*

**Л.М. ЛЕМКИНА,**

*кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник,  
Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН*

**Е.В. ПЕПЕЛЯЕВА,**

*Пермская ГСХА им. академика Д.Н. Прянишникова*

**Ключевые слова:** зерновые Урала, процесс экструзии, озимая рожь, наноструктура.

Экструзионная технология находит в последнее десятилетие всё более широкое признание как эффективный

метод переработки сельскохозяйственных культур, в частности, зерновых. Использование экструзионной

614013, г. Пермь,  
ул. Академика Королёва, 1;  
тел. 8 (342) 237-84-61



614081, г. Пермь,  
ул. Голева, 13;  
тел. 8 (342) 244-67-12

614990, г. Пермь,  
ул. Коммунистическая, 23;  
тел. 8 (342) 212-53-94

**Grain crops of Ural, extrusion  
process, winter rye grains,  
nanostructure.**



Рисунок 1. Флаконы с раствором зерна (слева) и экструдата (справа)

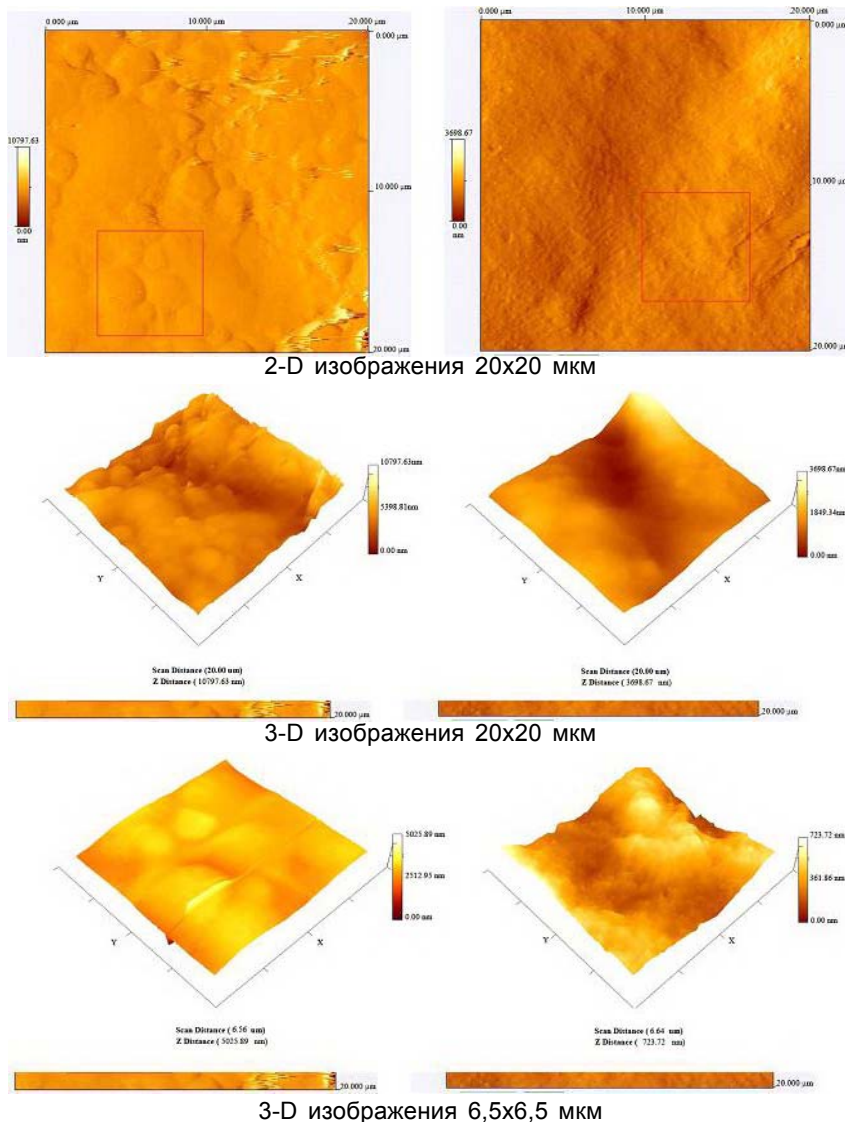


Рисунок 2. Структура препаратов из перемешанных смесей зерна (слева) и экструдата (справа)

переработки при получении кормов позволяет улучшить их перевариваемость, усвояемость, повысить стабильность при хранении, получить новые виды продуктов с высокими пищевыми качествами [1, 2, 3, 4].

В процессе экструзии осуществляется совместное воздействие на продукт интенсивным сдвигом, давлением и температурой, создаются условия для протекания термодинамических процессов, приводящих к перестройкам структуры продукта. Экструзионное диспергирование зерна, по-видимому, сопровождается микронизацией пищевых компонентов до молекулярных и субмолекулярных структур.

#### Цель и методика исследований

Целью работы является визуальный сравнительный анализ структуры исходного зерна и экструдата на нанометрическом уровне с дополнительной оценкой состояния их некоторых углеводных и белковых компонентов.

В эксперименте в качестве исходного материала было использовано зерно озимой ржи. Экструдат ржи был получен на экструзионной установке зерновых продуктов [1] при следующих режимах: температура по зонам шнека – 110-180-210°C; обороты шнека, увлажнителя и загрузчика – 17,7; 4,0, 1,26 с<sup>-1</sup> соответственно; давление экструзии – 4,2-6,0 МПа.

Подготовка препаратов для проведения атомно-силовой микроскопии включала несколько этапов. Образцы зерна и экструдата измельчали в мельнице для зерна ЭМ-3А (Россия) и просеивали через сито с ячейкой 0,4 мм. Из полученных порошков готовили навески по 200 мг, помещали их в стеклянные флаконы, в которые вносили по 5 мл физраствора (0,14 М NaCl). Флаконы с содержимым взбалтывали два раза по 60 секунд со скоростью 70 с<sup>-1</sup> на микровибраторе ML-1 (Польша), после чего 0,25 мл суспензий образцов из флаконов наносили на предметное стекло, а флаконы с остатками суспензий оставляли в бытовом холодильнике при температуре 6-8°C. Предметные стёкла для удаления влаги помещали в термостат с температурой 37°C до формирования на стёклах сухих плёнок препаратов зерна и экструдата.

Через сутки во флаконах произошло послойное разделение суспензированных образцов зерна и экструдата (рис. 1). Препарат экструдата имел три ярко выраженных слоя: на дне – крупнодисперсный ноздреватый осадок, в средней части – коллоидообразный слой мутновато белого цвета, в верхней части флакона – прозрачный раствор. Препарат исходного зерна имел также три зоны расслоения: на дне – тонкий крупнодисперсный плотный осадок, в средней части – небольшая по высоте коллоидообразная прослойка, верхний слой – чуть мутноватый раствор. Аналогично вышеописанной методике были подготовлены препараты для трёх указанных сло-

ёв зерна и экструдата.

Полученные на предметных стёклах сухие плёнки препаратов исследовали на атомно-силовом микроскопе Nano-DST™ в полуконтактном режиме работы, суть которого заключается в следующем: поверхность образца сканируется зондом пирамидальной формы с радиусом закругления у вершины 10 нм; при этом регистрируется сила взаимодействия зонда с поверхностью. При своём движении над профилем поверхности зонд расположен близко к поверхности, но не касается её. Изменения силы взаимодействия зонда с поверхностью, обусловленные особенностями рельефа, подаются в систему обратной связи. По анализу данных пьезоэлектрических датчиков строится изображение поверхности. При сканировании образцов регистрацию информации производили по различным каналам данных. Для снятия более чётких изображений подбиралась необходимая скорость движения зонда над поверхностью, составившая в наших опытах 0,56 Нз. Ввиду инерционности системы меньшие скорости движения позволяют наиболее точно регистрировать изменения силы взаимодействия зонда с поверхностью и получать более чёткие изображения, однако возрастает время сканирования. Контролем качества сканирования являлась степень идентичности сигнала при прямом и обратном ходе кантилевера.

#### Результаты исследований

Результаты атомно-силовой микроскопии в 2-D и 3-D изображениях по сигналу HGT прямого хода представлены на рисунках 2, 3, 4. Плоские 2-D изображения имеют размер 20x20 мкм и цветовую шкалу величины профиля поверхности в размерности нанометров (слева), соответствующую своему изображению. Объёмные 3-D изображения представлены на размерах 20x20 мкм и 6,5x6,5 мкм (последние на плоских изображениях выделены рамкой). Справа от изображений расположена цветовая шкала величины профиля поверхности в размерности нанометров, соответствующая своему изображению. Под изображением отображается размер сканирования и максимальный размер высоты поверхности, соответствующий верхнему пределу цветовой шкалы.

На рисунке 2 представлена на наноразмере структура препаратов, полученных из перемешанных смесей: слева – зерна, справа – экструдата. Максимальные значения высоты профиля: 10797 нм и 3698 нм при размере сканирования 20x20 мкм, 5026 нм и 724 нм при размере сканирования 6,5x6,5 мкм, соответственно, для зерна и экструдата. Характерный размер изменения рельефа наноструктуры препарата экструдата по сравнению с препаратом зерна в первом случае меньше в 4 раза, во втором – в 7 раз. Сканирование на меньшей площади уменьшает влияние изменения толщины самой плёнки препарата на из-

меряемые величины, имея в виду, что профиль поверхности снимают по отношению к плоскости предметного стекла. Можно отметить, что структура экструдата на наномасштабе мельче и – глядя на изображения – более однородная.

Не менее интересные данные получены при атомно-силовой микроскопии препаратов, полученных из отдельных слоёв во флаконе. На рисунке 3 представлены изображения наноструктуры препаратов верхнего слоя для зерна (слева) и экструдата (справа). В препарате экструдата наблюдается мелкодисперсная, однородная структура. Препарат зерна в отличие от экструдата имеет крупномасштабную ярко выраженную структуру, что хорошо видно при сканировании площадки 6,5x6,5 мкм. По изображению при сканировании площадки 2,4x2,4 мкм можно оценить характерный размер структуры препарата зерна как 1,8-2,0 мкм и экструдата – 0,2-0,21 мкм. По изображениям структуры препаратов второго слоя зерна и экструдата, представленных на рисунке 4, следует отметить те же характерные отличия. Структура препаратов третьего слоя и

зерна и экструдата имеет слишком большие для атомно-силовой микроскопии характерные изменения профиля поверхности, что не позволило провести их визуализацию.

Известно, что наибольшую часть – 72-78% - зерновки ржи, как и всех злаковых культур, составляет эндосперм. В этой части зерна сосредоточен главный запас жизненно необходимых человеку соединений: витаминов и минералов, а также легкоусвояемых веществ, имеющих пищевую ценность (белков и крахмала). Обнаруженные атомно-силовой микроскопией существенные различия тонкой структуры размола и экструдата зерна, по-видимому, могут отражать нарушения нативной молекулярной и надмолекулярной структуры крахмала и полипептидных соединений при действии экструзионных факторов.

В этой связи представляют интерес данные, полученные при изучении распределения свободной глюкозы и аминокислот низкомолекулярных соединений после диспергирования размолотых образцов зерна и экструдата и обработки комплексом пищеварительных гидролаз, содержащихся в препа-

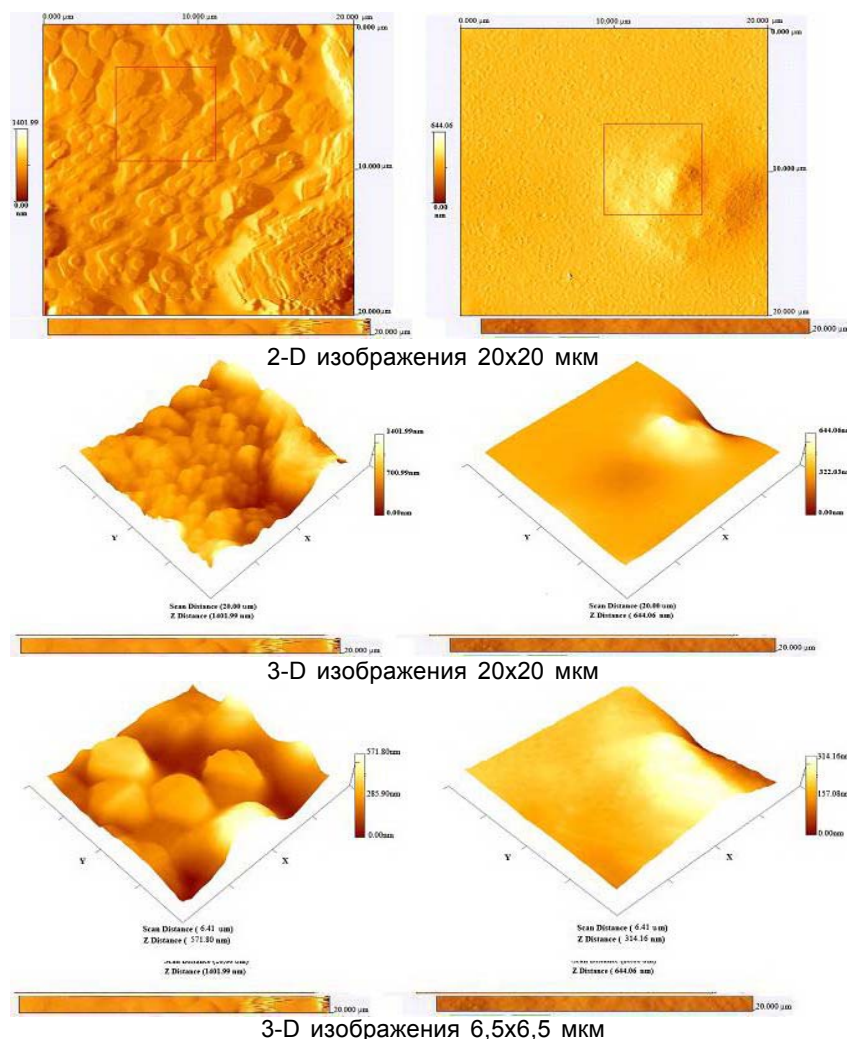


Рисунок 3. Структура препаратов верхнего слоя зерна (слева) и экструдата (справа)



рате мезим форте.

Использование специфического глюкозооксидазного метода [5] определения содержания свободной глюкозы показало, что в супернатантах (водной фазе) суспензий зерна оно равно 16,9 мг%. В растворимой части препарата экструдата этот показатель равен лишь 1,6 мг%, что может быть связано с температурной карамелизацией большей части свободной глюкозы в процессе экструзии. Однако при ферментативной обработке образцов водной фазы суспензии размолотого зерна содержание свободной глюкозы в них возрастает на 10,6%, в то время как в образце такой же фазы экструдата – более чем в 25 раз. Эти данные, по-видимому, отражают большую доступность олиго- и полисахаридов для пищеварительных ферментов после экструзионного воздействия на зерно. Подобная динамика содержания свободной глюкозы обнаруживается и при анализе осадков препа-

ратов зерна и экструдата. Так, содержание свободной глюкозы в осадках суспензии размолотого зерна составляет 31,5 мг%, а в осадках суспензии экструдата – 2,5 мг%. Однако после ферментативного гидролиза содержание глюкозы в осадках препаратов зерна возрастает на 66,3%, в то время как в осадке суспендированного экструдата – более чем в 23 раза. Полученные результаты подтверждают сделанное выше предположение о большей доступности питательных субстратов экструдатов, нежели необработанного зерна, для гидролизующих ферментов пищеварительного тракта животных и человека. Возможно, это происходит за счёт высокого уровня микронизации содержимого эндосперма с разрушением молекулярных структур составляющих крахмал амилозы и амилодекстрина, а также расщеплением белковых молекул, которые сопровождаются резким увеличением поверхности взаимодействия ферментов

со своими субстратами.

Подтверждением этому служат также результаты изучения в полученных суспендированных препаратах зерна и экструдата общего содержания аминокислот низкомолекулярных соединений колориметрическим методом Узбекова в модификации Чулковой [6], основанном на высокотемпературном взаимодействии нингидрина с аминокислотами и небольшими пептидами с образованием окрашенных комплексов, оптическая плотность которых пропорциональна содержанию этих соединений в исследуемом материале. Экструзионное воздействие приводит к небольшому – на 21% – снижению содержания аминокислот и коротких пептидов в водной фазе экструдата. Однако действие пищеварительных протеаз сопровождается увеличением уровня аминокислот в препаратах размолотого зерна на 57%, а в экструдате – на 80%. Важно отметить, что в осадках препаратов зерна и экструдата эти изменения более выражены с возрастанием содержания свободного аминокислота, соответственно, на 157% и 226%. При расчёте суммарного изменения содержания азота низкомолекулярных соединений в препаратах после ферментативного воздействия обнаружено, что экструзия приводит к увеличению этого показателя примерно более чем на 30%.

#### Выводы

По результатам атомно-силовой микроскопии можно заключить, что экструзионная обработка приводит к перестройке и микронизации структуры компонентов зерна. Наноструктура препаратов зерна и экструдата существенно отличается как по характерному размеру, так и по однородности.

Наблюдаемые при атомно-силовой микроскопии изменения наноструктуры зерна ржи в процессе экструзионной обработки согласуются с полученными биохимическими данными, подтверждающими разрушение структуры пищевых биополимеров зерна, сопровождающееся резким увеличением поверхности взаимодействия ферментов со своими субстратами и обуславливающее значительное увеличение пищевой ценности экструдата.

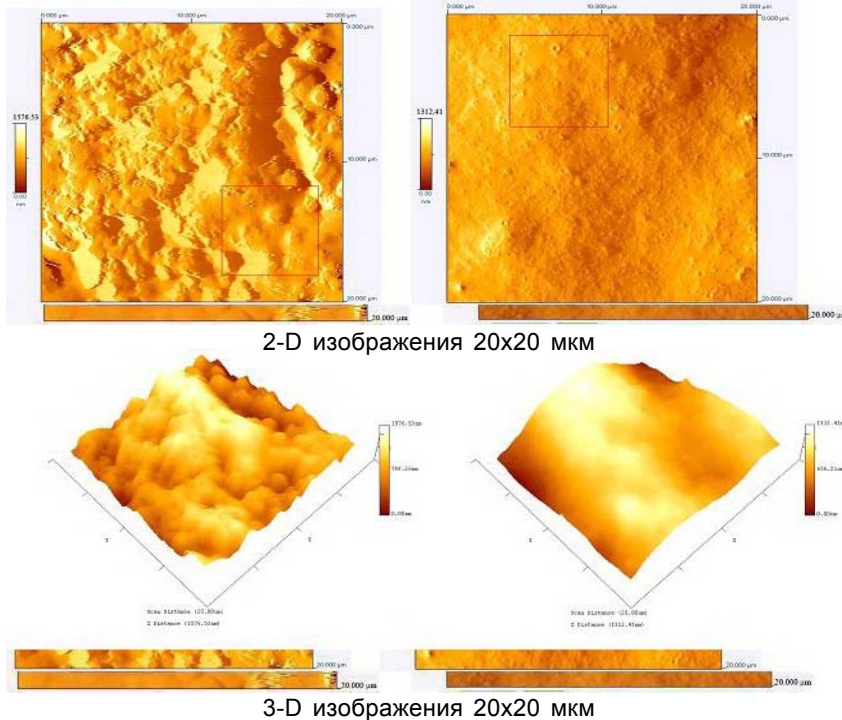


Рисунок 4. Структура препаратов среднего слоя зерна (слева) и экструдата (справа)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-08-96069p\_урал-а.

#### Литература

1. Славнов Е. В., Коробов В. П., Лемкина Л. М. Получение концентрированных кормовых добавок экструзионной обработки зерна озимой ржи с оценкой пищевой ценности // Аграрный вестник Урала. 2008. № 2. С. 80-83.
2. Ситников В. А., Морозков Н. А., Славнов Е. В. Нетрадиционный способ подготовки концентрированных кормов и результаты скармливания их животным // Аграрный вестник Урала. 2008. № 3. С. 52-55.
3. Соколова О. Я., Стряпков А. В. Влияние способов экструзионной подготовки зерна на содержание в нём подвижных форм тяжёлых металлов // Вестник ОГУ. 2005. № 5.
4. Славнов Е. В., Коробов В. П., Ситников В. А. Технология переработки зерна озимой ржи, повышающая его пищевую ценность и экологическую чистоту // Тез. докл. VI Междунар. конф. «Проблемы загрязнения окружающей среды». Пермь : ИЭГМ, 2005. С. 46.
5. Вилкова В. А. Определение количества и радиоактивности глюкозы в тканях // Методы биохимических исследований. Л. : ЛГУ, 1982. С. 234-238.
6. Колб В. Г., Камышников В. С. Клиническая биохимия. Мн. : Беларусь, 1976. С. 59-62.