

СОДЕРЖАНИЕ β -ГЛЮКАНОВ В ЗЕРНЕ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПРИЗНАК ПРИ СЕЛЕКЦИИ ЯЧМЕНЯ НА ПИЩЕВОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

(обзор иностранной литературы)

В.И. ПОЛОНСКИЙ, А.В. СУМИНА

На основании данных зарубежной литературы рассмотрено целевое использование ячменя в зависимости от содержания β -глюканов в зерне. Проанализировано влияние генотипа, климатических условий выращивания растений и агрономических приемов на количество β -глюканов в зерне ячменя. Приводятся сведения о физиолого-биохимических показателях содержания β -глюканов, которые могут быть полезны при разработке способов косвенной оценки селекционного материала. Так, зафиксирована отрицательная корреляция между содержанием β -глюканов в зерне ячменя, с одной стороны, и значением массы 1000 зерен, содержанием амилозы, крахмала, процентом золы, величиной урожая зерна — с другой. Найдена сильная позитивная связь между количеством β -глюканов и липидов в зерне, содержанием в нем белка, а также натурой зерна и его твердостью. Наличие указанных корреляций делает возможной косвенную оценку при селекции ячменя на повышенное/пониженное содержание β -глюканов в зерне. Агрономически наиболее перспективны (особенно в засушливом климате) пленчатые безамилозные сорта, так как они способны к реализации значительного потенциала урожая при высоком содержании β -глюканов. Сделано заключение о существовании генотипической вариации в содержании β -глюканов в зерне ячменя для достижения прогресса в селекции на этот признак.

Ключевые слова: β -глюканы, ячмень, зерно, крахмал, пищевые волокна, диетическое питание, твердость зерна, клеточные стенки, эндосперм, оценка.

Ячмень относится к важнейшим возделываемым в мире зерновым культурам, по валовому сбору он находится на пятом месте после пшеницы, кукурузы, риса, сорго.

В последние годы резко возрос интерес к здоровому (функциональному) питанию, особенно это касается включения в диету растворимых пищевых волокон из зерновых культур. Недавно в США Администрацией по пищевым продуктам и медикаментам (US Food and Drug Administration) был принят нормативный документ, разрешающий использовать изготовленные на основе ячменя продукты для снижения риска сердечно-сосудистых заболеваний и позволяющий официальную регистрацию таких продуктов в качестве снижающих уровень холестерина биодобавок; ранее это было сделано для пищевых продуктов, полученных из овса (Anonymous, 2005; 1997; цит. по 1). Как оказалось, в состав клеточных стенок эндосперма ячменя, овса и других зерновых культур входят специфические полисахариды, так называемые (1,3;1,4)- β -D-глюканы, которые способствуют снижению количества холестерина и сахара в крови, уменьшают риск сердечно-сосудистых заболеваний и диабета, служат эффективными средствами в предотвращении и лечении ряда серьезных болезней человека, включая рак кишечника, помогают избавиться от избыточной массы тела, поддерживая чувство насыщения, укрепляют иммунную систему, обладая антимикробными свойствами (2-5). Может быть, поэтому в настоящее время в некоторых странах Европы возвращается утраченный интерес к ячменю как пищевому продукту (6).

β -Глюканы и целевое использование ячменя. Механизмы, посредством которых растворимые пищевые волокна, такие как β -глюканы, вызывают снижение уровня холестерина и глюкозы в крови, до конца не выяснены и активно обсуждаются в специальной литературе. Большинство гипотез базируется на предполагаемом влиянии повышенной

вязкости содержимого желудочно-кишечного тракта на уменьшение поглощения холестерина, желчных кислот и их метаболитов (7-10). Кроме того, указанные полисахариды, замедляя процесс всасывания питательных веществ, в первую очередь углеводов, снижают гипергликемию и секрецию инсулина. Последнее положительно воздействует на состояние здоровья больных диабетом II типа и также вносит определенный косвенный вклад в уменьшение количества холестерина в крови (7, 8, 11).

В клинических исследованиях, выполненных с участием более чем 400 пациентов, были продемонстрированы позитивные результаты включения β -глюканов и цельнозерновых продуктов, приготовленных из ячменя, в диету больных. Наблюдаемый эффект выражался в уменьшении концентрации глюкозы (3, 12), общего холестерина (13), липопротеида низкой плотности и триглицеридов в крови (2, 14). На 90 добровольцах (мужчины и женщины) показано, что употребление в пищу ячменных β -глюканов в течение 6 нед способствовало существенному снижению массы тела (15).

Для того чтобы разнообразить диету, обогащенную пищевыми волокнами, ведется поиск нетрадиционных подходов к созданию зерновых пищевых продуктов, например исследуется возможность добавления β -глюканов в йогурт (16) или в пшеничную муку при выпечке хлеба (3, 17, 18). Кроме того, учитывается полезность продуктов, изготовленных из зерна других культур, в частности ржи и овса. В экспериментах на грызунах показано, что активность β -глюканов, полученных из зерна как ячменя, так и овса, при снижении содержания холестерина в крови была приблизительно равной (19).

Следует, однако, отметить, что в некоторых работах сообщается об отсутствии существенных физиологических эффектов от употребления пищи, обогащенной β -глюканами ячменя. Так, в клинических исследованиях у мужчин с высоким содержанием холестерина не было доказано уменьшения риска сердечно-сосудистых заболеваний (20), а также не всегда непосредственно демонстрировалось влияние вязкости β -глюканов на снижение количества холестерина (21). Возможно, причина заключалась в используемой авторами диете либо дозе и свойствах β -глюканов.

Кроме рассмотренной выше положительной роли, которую играют полисахариды клеточных стенок эндосперма злаков в пище человека, β -глюканы часто выступают как негативный фактор в усвоении питательных веществ при кормлении нежвачных животных. Дело в том, что высокая вязкость полисахаридов способствует образованию слизей, затрудняющих пищеварение и ассимиляцию питательных веществ из желудочно-кишечного тракта. Все это сопровождается снижением скорости прироста живой массы у домашних животных и ухудшением их внешнего вида (4, 22).

Еще одно проявление специфического эффекта большого количества β -глюканов из клеточных стенок эндосперма злаков связано с процессом получения солода, необходимого для приготовления пива. Как известно, замедление деградации клеточных стенок в прорастающих семенах ячменя может уменьшать выход крахмала, белка и других компонентов эндосперма и, следовательно, снижать объем получаемого экстракта (солода). Арабиноксиланы и β -глюканы формируют внутри клеточных стенок своего рода барьер, который должны преодолевать гидролитические ферменты для химической атаки молекул крахмала и белка, и таким образом полисахариды обуславливают вязкость экстракта и скорость фильтрации пива (23). Поэтому очень важно, чтобы зерно у сортов ячменя пивоваренного направления имело низкое содержание главных полисахаридов кле-

точной стенки и/или характеризовалось быстрым синтезом (активированием) ферментов, способных гидролизовать такие полисахариды (4, 24).

Строение молекул β -глюканов. Главным растворимым компонентом пищевых волокон зерновых культур служат (1,3;1,4)- β -D-глюканы. Это обобщенный термин, который используется для обозначения высокомолекулярных полимеров глюкозы с гликозидными связями $\beta(1-3)$ и $\beta(1-4)$.

Молекулы β -глюканов — линейные гомополисахариды, в состав которых входят остатки D-глюкопиранозы, соединенные β -1-4-связями и организованные в блоки единиц, которые разделены β -1-3-связями (25). Хотя большинство сегментов в этих блоках представлены три- и тетрамерами, в полимерных цепях обычно присутствуют более длинные блоки (26). Различия в химическом строении и структуре β -глюканов затрагивают соотношение тримеров и тетрамеров, связей $\beta(1-4)/\beta(1-3)$ и количество длинных целлюлозных олигомеров (27, 28).

Относительное количество трисахаридов в β -глюканах из зерен ячменя составляет 52-69 %, тетрасахаридов — 25-33 %, соотношение трисахариды/тетрасахариды равно 1,8-3,5. Величина указанной пропорции определяется химической структурой зерновых β -глюканов. Для каждого вида злаков оно имеет свое значение и по диагностической ценности может быть сопоставимо с индивидуальной характеристикой отпечатков пальцев (29-34).

Соотношение между три- и тетрасахаридами в β -глюканах, во-первых, выше у сортов ячменя с низким содержанием амилозы (так называемые Waxy-формы), чем у сортов с нормальным количеством этого компонента крахмала, во-вторых, выше в клеточных стенках алейронового слоя по сравнению с таковыми в эндосперме (26, 35). Различия в указанном соотношении не только обусловлены генотипом, но и зависят от внешних факторов, складывающихся в период формирования и созревания семян у зерновых злаков (36-38). Кроме того, пропорция между три- и тетрасахаридами в β -глюканах связана с условиями выделения последних, в частности при увеличении температуры при водной экстракции β -глюканов от 40 до 65 °C доля трисахаридов возрастает (27, 39).

Молекулярная масса β -глюканов ячменя выражается шести-семизначными числами (31×10^3 - 2700×10^3 Да). На различия в величине этой важной характеристики влияет ряд факторов: сорт, условия внешней среды при выращивании растений, а также методики выделения, очистки и измерения (1, 27). Молекула β -глюканов представляет собой изогнутую цепь, модель которой описывается цилиндром, имеющим длину, равную 3,5-3,8 нм, и диаметр около 0,45 нм (40).

Пути биосинтеза ряда полисахаридов (крахмала, целлюлозы, гликогена) изучены довольно хорошо, но реакции образования β -глюканов и процесс их аккумуляции в стенках клеток эндосперма все еще недостаточно понятны. Найдено, что биосинтез клеточных стенок в процессе формирования зерна связан с морфологическими изменениями при его созревании (4).

Исследования показывают, что молекулярное строение и структурная организация β -глюканов и арабиноксиланов из зерна овса и ячменя представляют собой важные детерминанты их физических свойств, таких как растворимость в воде, вязкость (способность к гелеобразованию), переваримость. Все перечисленное обуславливает функциональность указанных полисахаридов и их физиологическую роль в желудочно-кишечном

тракте человека (1, 32, 33, 41, 42). Зарегистрированы различия в величине вязкости фракций β -глюканов, экстрагированных водой при температурах 45 и 90 °С. Это же подтверждено вариациями по молекулярной массе среды выделенных полисахаридов, полученных из разных сортов ячменя (37).

Содержание β -глюканов в зерне ячменя. β -Глюканы представляют собой полисахариды, которые распространены исключительно в растениях семейства Мятликовые и найдены в составе клеточных стенок ячменя, овса, пшеницы, ржи, кукурузы, риса, сорго (43, 44). Кроме того, для клеточных стенок злаков характерно высокое содержание гетероксиланов и незначительное количество либо полное отсутствие целлюлозы и пектина. У семян злаков стенки клеток алейронового слоя и эндосперма состоят главным образом из (1,3;1,4)- β -D-глюканов и арабиноксиланов. Например, клетки крахмалистого эндосперма в зрелом зерне ячменя окружены тонкими стенками, содержащими приблизительно 70 % β -глюканов, 25 % арабиноксиланов, 2 % целлюлозы и 2 % глюкоманнанов (45, 46). Полисахариды β -глюканы формируют внутренний слой стенок эндосперма ячменя (47, 48).

Удаление внешних слоев, включая пленку, с зерновок злаков понижает долю нерастворимых пищевых волокон, белка, золы и свободных липидов, но увеличивает соответствующий показатель по крахмалу и β -глюканам (49, 50). В семенах голозерных форм или в лишенных оболочек зернах содержится 11-20 % от общего количества пищевых волокон и 3-10 % — от количества их растворимых форм (51).

По содержанию β -глюканов ячмень и овес считаются рекордсменами среди культурных зерновых злаков (52, 53). Величина этого показателя качества у пшеницы, ячменя, овса, ржи в целом зерне составляет соответственно 0,6; 4,2; 3,9; 2,5 %, в отделенном эндосперме — 0,3; 4,1; 1,8; 1,7 % в расчете на сухую биомассу (54).

Цельное зерно ячменя в среднем содержит 3-9 % β -глюканов (55-59). Однако существуют интересные мутанты ячменя с низким накоплением крахмала и повышенным — β -глюканов, полностью или частично компенсирующим потерю крахмала. Так, у высоколизиновых мутантов ячменя Riso 13 и 29 содержание крахмала понижено на 30 %, β -глюканов — повышено на 20 % (60). Выделенная профессором университета штата Монтана (США) Р.Ф. Эсликом (R.F. Eslick) изолиния голозерного ячменя с очень низким содержанием амилозы Prowashonupana (high protein, waxy, short awn nude «Compana»), чрезвычайно богата β -глюканами, доля которых составляет около 15-18 % (57, 61).

Пищевые продукты, полученные на основе злаков с низким содержанием крахмала и повышенным — β -глюканов, могут иметь важное значение в низкокалорийной диете человека (62). Уже созданы шесть линий ячменя, которые рассматриваются в качестве возможных растений — кандидатов для производства функциональной пищи благодаря высокому содержанию растворимых и нерастворимых пищевых волокон и низкой энергетической ценности (60).

Твердость зерна и содержание в нем β -глюканов. Экспериментально обнаружено, что показатель твердости зерновок злаков в значительной степени обусловлен степенью адгезии между гранулами крахмала и белковым матриксом в эндосперме (63, 64). Как правило, мягкие сорта используются для получения солода, тогда как сорта непивоваренного направления относятся к так называемым твердым. Для прогноза качества будущего солода на практике применяется сортовой показатель,

связанный с измерением физической твердости зерновок (65). Обычно величину твердости зерновок ячменя определяют с помощью прибора для исследования характеристик индивидуальных зерновок — Single Kernel Characterization System (SKCS 4100, «Perten Instruments, Inc.», IL США) (66). Кроме того, в скрининге зерен на признак твердости может применяться метод измерения отражения лучей в ближней инфракрасной области спектра (67, 68).

Общепринято, что твердость зерна ячменя, оцененная в показателях энергии, затраченной для его помола, в значительной степени влияет на качество солода, она отрицательно связана с объемом водного экстракта ячменя и модификацией эндосперма (69, 70). Дело в том, что на твердость зерновок ячменя, кроме содержания белка в зерне, оказывают существенное влияние компоненты клеточных стенок эндосперма — β -глюканы и арабиноксиланы. Найдена сильная положительная связь между количеством этих веществ в зерне, с одной стороны, и показателем твердости зерен — с другой (71, 72). Наблюдаемый эффект может быть обусловлен различием в толщине клеточных стенок эндосперма у линий ячменя с неодинаковым содержанием β -глюканов (61).

По данным G.P. Fox с соавт. (68), твердость зерен ячменя в основном связана с двумя факторами — условиями внешней среды, при которых происходило формирование и созревание зерна, а также с генотипом (сортом). Полученные результаты свидетельствуют о влиянии условий выращивания на содержание белка, что, в свою очередь, сопровождается изменением твердости зерна. Существующая зависимость названного физического показателя от генотипа, по мнению этих авторов, делает возможным выведение сортов ячменя с очень твердыми либо очень мягкими зерновками.

Основываясь на определении твердости зерна и используя методы регистрации размеров получаемых при его разрушении частиц, а также методы измерения сопротивления разрушению зерна, оценили большое число селекционных линий и сортов, выращиваемых в различных условиях, на предмет их возможного использования в пивоварении (68).

В экспериментах A. Lazaridou с соавт. (66) изучался процесс экстракции полисахаридов из высокоочищенных клеточных стенок эндосперма ячменя, выращенного в различных условиях (три варианта опытов). Полученные образцы варьировали по величине твердости зерна, содержанию в нем белка и β -глюканов. При использовании набора методических подходов (экстракция водой, растворами гидроксида бария и едкого натра, обработка ферментами солода) были продемонстрированы существенные модификации по растворимости и атакуемости разных полисахаридов из клеточной стенки эндосперма, которые, по-видимому, зависели от химического состава и свойств этих веществ, формирующихся под влиянием условий выращивания.

Компоненты клеточных стенок эндосперма (β -глюканы и арабиноксиланы), влияя на его структуру и физические свойства, играют значительную роль в процессе набухания при прорастании семян. Так, на десяти сортах ячменя, выращенных в течение 2 лет в различных условиях (девять вариантов), найдено, что относительное поглощение воды зерновками отрицательно коррелирует с содержанием β -глюканов в эндосперме, а также с показателем твердости зерна (72).

По-видимому, твердость зерновок не связана с их абсолютной массой. Это может следовать из данных литературы о несущественном различии относительного поглощения воды неодинаковыми по массе зерновками

ми ячменя в течение первых 10 ч набухания (73). Скорость поглощения воды зерновками закономерно возрастает при увеличении температуры, что показано в модельных опытах (74).

С повышением интереса к использованию ячменя в пищевых продуктах, которые требуют специальных технологий обработки (более интенсивного физического воздействия), появляется необходимость получать зерно с определенной величиной твердости. В связи с этим, по мнению В.В. Baik и S.E. Ulrich (75), важно выяснить, каким образом структура клеточных стенок эндосперма связана с твердостью зерна, какой компонент (крахмал, белок, β -глюканы) наиболее важен (в количественном и качественном отношении), в том числе для различий в твердости, и, наконец, какова доля влияния генотипа и внешних условий на формирование признака «твердость зерна» у ячменя.

Влияние генотипа и внешних условий на содержание β -глюканов в зерне. Содержание β -глюканов в зерне в значительной мере определяется конкретным генотипом и климатическими условиями выращивания растений (55, 76-79). При этом одними авторами показано, что генетический фактор имеет большее влияние на изменение количества β -глюканов (53, 80-84), другие исследователи пришли к заключению о решающем значении параметров внешней среды (77, 85, 86).

В экспериментах с выращиванием 33 сортов и линий ячменя в течение 2 лет в двух засушливых местностях в США было показано, что вариация в содержании β -глюканов в зерне обусловлена генотипом на 66 % (83) или 51 % (82). В последнем случае содержание белка в зерне зависело от внешних условий на 69 %, величина урожая и натура — соответственно на 83 и 70 %. Зарегистрировав значительное влияние внешних условий на содержание крахмала, β -глюканов и белка в зерне ячменя, С.Е. Fastnaught с соавт. (77) пришли к выводу о необходимости введения качественных стандартов и тестов для пищевого ячменя.

В экспериментах, выполненных с девятью сортами ячменя и десятью сортами овса, обнаружено, что межсортовые различия в содержании β -глюканов у злаков сохраняются по годам (53). В результате изучения 33 генотипов ячменя при выращивании в девяти различных географических точках в течение 2 лет было сделано заключение о том, что генотипическая вариация в содержании β -глюканов довольно существенна для достижения прогресса в селекции на этот качественный признак (87).

А.А. Chernyshova с соавт. (88) оценивали генетическую компоненту вариации по количеству β -глюканов в зерне овса и в потомстве от скрещивания форм с высоким содержанием этих полисахаридов и образцов, демонстрирующих элитные агрономические показатели. Результаты работы, выполненной на 24 сортах и линиях, позволили авторам прийти к выводу, что значительная изменчивость в содержании β -глюканов в зерне делает успешную селекцию на этот хозяйственно полезный признак вполне возможной.

Кроме генетического фактора и параметров внешней среды на содержание β -глюканов в зерне влияет фаза развития растений. Так, показано, что количество этих химических веществ постепенно повышается в течение периода формирования зерна, а в самом конце процесса созревания растений названный биохимический показатель выходит на плато или его величина снижается (44).

Условия послеуборочного хранения зерна также оказывают определенное влияние на накопление рассматриваемых полисахаридов из кле-

точной стенки. Показано, что количество растворимых β -глюканов как овса, так и ячменя падает при хранении на складе, особенно при температуре 25 °С по сравнению с режимом холодильника (около 8 °С) (52). В условиях среды, близких к оптимальным, содержание β -глюканов оставалось постоянным в течение 6-месячного срока хранения (44).

Наряду с перечисленными выше факторами содержание β -глюканов в зерне зависит от погодных условий в сезон вегетации (53, 87). Среди них ведущими выступают температура и влагообеспеченность. Рост первого показателя положительно сказывается на накоплении рассматриваемых полисахаридов в клеточной стенке, тогда как увеличение второго играет в этом процессе отрицательную роль. На восьми сортах двурядного ячменя, выращиваемого в климатических камерах до созревания при пяти температурных режимах, зарегистрировано повышение количества водорастворимых β -глюканов с ростом температуры (89), причем отмечалось увеличение молекулярной массы этих химических соединений. В условиях низких температур в течение вегетации количество β -глюканов в зерне снижалось (90). В экспериментах с искусственным орошением показано, что с повышением нормы полива накопление названных полисахаридов в зерне ячменя уменьшалось (91).

Агрономические факторы (в частности, применение минеральных удобрений, выбор предшественника) тоже играют роль в изменении содержания β -глюканов в зерне. Так, при применении высоких доз азотных удобрений количество β -глюканов в зерне ячменя повышалось (91). Овес, выращенный по зерновому предшественнику, накапливал относительно большее количество β -глюканов, чем при возделывании после бобовых культур (92).

Косвенные показатели содержания β -глюканов в зерне. Обычно общее содержание β -глюканов в зерне злаков измеряют биохимически по методу В.В. McCleary и R. Codd (93). Как правило, концентрацию β -глюканов в образцах определяют с помощью специального набора реактивов фирмы «Megazyme International Ireland Ltd.» (Bray Business Park, Bray, Co. Wickow, Ирландия) (53, 66). Кроме того, для оценки содержания β -глюканов в размолотом зерне ячменя, как уже упоминалось, используется биофизический подход — измерение величины отражения в ближней инфракрасной области спектра (94, 95).

В практической селекции очень важно иметь простые, оперативные методы оценки качественных показателей сельскохозяйственных растений, в частности это необходимо при отборе культур злаков на содержание β -глюканов в зерне. Для решения указанной задачи выполняются многочисленные исследования, посвященные поиску закономерных связей и корреляций между содержанием рассматриваемых полисахаридов в зерне и различными анатомо-морфологическими, физическими, химическими и физиологическими параметрами зерновок и выделяемых из них веществ. В дополнение к этому при селекции ячменя на высокое или низкое содержание β -глюканов в зерне используют молекулярные маркеры (96).

Так, зафиксирована неустойчивая, но явно отрицательная корреляция между накоплением β -глюканов в зерне ячменя, с одной стороны, и значением массы 1000 зерен (78, 91), содержанием амилозы (77, 82, 83, 97), крахмала (60), процентом золы (79), величиной урожая зерна (82, 88) — с другой. На растениях овса обнаружена сильная положительная связь между количеством β -глюканов в зерне, с одной стороны, и содержанием бел-

ка и натурой — с другой, а также негативная корреляция между накоплением β -глюканов и длительностью периода всходы—выметывание (87). В работах других исследователей не было обнаружено корреляции между содержанием β -глюканов в зерне ячменя и накоплением в нем белка (72, 79), а также массой 1000 зерен (79). Для ячменя найдена сильная позитивная связь между содержанием β -глюканов и долей липидов в зерне (79), содержанием в нем белка (82, 91), а также натурой зерна (79).

Продемонстрировано, что по количеству β -глюканов в зерне шести- и двурядные сорта ячменя между собой значительно не различаются (77). Размер зерна, на который в большей степени влияет генотип, чем условия выращивания (98), положительно коррелирует с содержанием β -глюканов, но отрицательно — с величиной отношения пентозаны/ β -глюканы (56). Яровые формы ячменя по сравнению с озимыми имеют большее содержание белка и водорастворимых волокон (A. Batal, N. Dale, 2009; цит. по 79).

В работе норвежских ученых S.H. Knutsen и A.K. Holtekjolen (99), проведенной на 16 сортах голозерного и пленчатого ячменя, а также в опытах американских исследователей (79), выполненных на 14 образцах пленчатого и 37 — голозерного ячменя, не обнаружено существенных различий в содержании β -глюканов и водорастворимых арабиноксиланов между этими двумя формами. Другими авторами найдено, что для голозерных форм ячменя характерна более высокая доля β -глюканов, чем для пленчатых (77, 100). При этом образцы тибетского ячменя голозерного типа характеризуются наивысшим содержанием β -глюканов в зерне (55). Как правило, голозерные сорта злаков по сравнению с пленчатыми формами показывают более низкую величину среднего урожая. Поэтому агрономически наиболее перспективны (особенно для условий засушливого климата) пленчатые безамилозные сорта, так как они способны к реализации значительного потенциала урожая при высоком содержании β -глюканов (83).

Показано, что накопление β -глюканов в зерне овса снижает скорость прорастания семян. С помощью метода Монте-Карло были смоделированы условия, влияющие на содержание β -глюканов у пленчатого и голозерного овса в течение вегетации. Анализ выявил положительную связь между задержкой появления всходов и долей β -глюканов в зерне (коэффициент корреляции был равен соответственно 0,32 и 0,25) (84). Подобные различия обусловлены как генотипом, так и внешними факторами, причем роль последних в поглощении воды семенами при их набухании, по данным некоторых авторов (86), проявляется сильнее.

Экспериментально доказано, что от содержания водорастворимых арабиноксиланов в зерне ржи в сильной степени зависит вязкость водного экстракта муки, которая может быть определена с помощью вискозиметра (101). По этому физико-химическому показателю можно проводить отбор и, вовлекая в скрещивание полученные линии, создавать гибриды с параметрами вязкости водного экстракта зерна, имеющими значения существенно выше либо ниже, чем у стандартного сорта. Первые могут представлять интерес для пищевых целей, вторые — при использовании в качестве корма животным.

Показано (60), что в зерне ячменя, обогащенном β -глюканами и имеющем пониженное содержание крахмала, увеличена доля сухого вещества (и, соответственно, уменьшено количество воды). Это, по мнению авторов, происходит благодаря меньшей способности связывать воду у клеточных стенок эндосперма, чем у кристаллических структур крахмала, на-

ходящихся в амилопластах.

Следует подчеркнуть, что в целом корреляция между содержанием β -глюканов в зерне ячменя и рядом агрономических показателей несущественна (87).

В настоящее время на основе метода спектроскопии в ближней инфракрасной области спектра реализован автоматизированный подход к разделению зерна ячменя и пшеницы на три группы по пищевому (кормовому) качеству. Для этого разработана и изготовлена специальная пилотная сортировальная установка VoMill TriQ single seed pilot NIR sorter («VoMill АВ»-Lund», Швеция) (102). С помощью оптических волокон регистрируется спектр отражения от каждой зерновки, сигнал проходит компьютерную обработку, и далее по результатам анализа пневматическая система разделяет зерно на три фракции: с низким, средним и высоким качеством. Зерно первой категории используется на корм животным, третьей — для получения высококачественного хлеба. Производительность сортировальной машины достигает 10 т/ч. Установка может использоваться не только в производственных условиях, но и в селекционных целях.

Таким образом, благодаря высокому содержанию растворимых пищевых волокон — β -глюканов в клеточных стенках эндосперма зерно ячменя рассматривается сегодня как перспективный пищевой продукт, способствующий уменьшению риска сердечно-сосудистых заболеваний. При сильно выраженном повышении доли β -глюканов в зерне снижаются два других важных показателя качества названной культуры — кормовое достоинство и пригодность к использованию в пивоварении. β -Глюканы представляют собой высокомолекулярные полимеры глюкозы, связанной $\beta(1-3)$ и $\beta(1-4)$ гликозидными связями, цельное зерно ячменя в среднем содержит 3-9 % этих веществ. Получены мутантные формы ячменя с низким накоплением в зерне крахмала и повышенным — β -глюканов, что полностью или частично компенсирует потерю крахмала. Содержание β -глюканов у ячменя в значительной степени определяется генотипом и климатическими условиями выращивания растений, при этом количество рассматриваемых полисахаридов положительно связано с температурой и дозой азотных удобрений, отрицательно — с влагообеспеченностью. Зафиксирована отрицательная корреляция между содержанием β -глюканов в зерне ячменя, с одной стороны, и значением массы 1000 зерен, содержанием амилозы, накоплением крахмала, долей золы, величиной урожая зерна — с другой. Найдена сильная позитивная связь между долей β -глюканов и липидов в зерне, содержанием в нем белка, а также натурой зерна и его твердостью. Наличие указанных корреляций делает возможной косвенную оценку при селекции ячменя на повышенное/пониженное содержание β -глюканов в зерне. Показано, что генотипическая вариация в накоплении β -глюканов существенна для достижения прогресса в селекции на этот хозяйственно ценный признак. Наиболее перспективны, особенно для зон с засушливым климатом, пленчатые безамилозные сорта ячменя, так как они способны к реализации значительного потенциала урожая при высоком содержании β -глюканов.

ФГБОУ ВПО Красноярский государственный аграрный университет,
660049 Россия, г. Красноярск, просп. Мира, 90,
e-mail: vadim.polonskiy@mail.ru

Поступила в редакцию
14 апреля 2010 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2013, № 5, pp. 30-43

β -GLUCANS CONTENT AS A PERSPECTIVE TRAIT IN THE BARLEY

BREEDING FOR FOODSTUFF USE

(review)

V.I. Polonskii, A.V. Sumina

Krasnoyarsk State Agrarian University, 90, prosp. Mira, Krasnoyarsk, 660049 Russia, e-mail vadim.polonskiy@mail.ru
Received April 14, 2010 doi: 10.15389/agrobiol.2013.5.30eng

Abstract

On the ground of data of foreign literature the authors consider the target utilization of barley in connection with β -glucans in grain. The authors analyzed the influence of a genotype, climatic conditions and agronomic methods of plant growing on β -glucans content in barley corn. The information was presented about physiologo-biochemical parameters β -glucans, which may be helpful for a development of indirect estimation of breeding material. Thus, it was fixed the negative correlation between β -glucans content in barley grain on the one hand and value of 1000seeds mass, amylose and starch content, ash percent, corn yield — on the other hand. The strong positive correlation was found between the content in corn of β -glucans, lipids, protein and the grain-unit and its hardness. The existence of such correlations makes possible the development of indirect estimation during barley breeding on heightened/reduced β -glucans content in grain. It was shown, that gluma-ceous amylose-free varieties are more advanced agronomically (in arid climate, especially), as they are able to realize a substantial potential of yield with high content of β -glucans. The authors made a conclusion about an importance of genetic variability in content of β -glucans in barley grain for successful breeding on this determinant.

Keywords: β -glucans, barley, grain, starch, fibre, dietary nutrition, hardness, cell wall, endosperm, evaluation.

REFERENCES

1. Lazaridou A., Biliaderis C.G. Molecular aspects of cereal β -glucan functionality: Physical properties, technological applications and physiological effects. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46: 101-118.
2. Behall K.M., Scholfield D.J., Hallfrisch J. Diets containing barley significantly reduce lipids in mildly hypercholesterolemic men and women. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2004, 80: 1185-1193.
3. Cavallero A., Empilli S., Brighenti F., Stanca A.M. High (1-3,1-4)- β -glucan barley fractions in bread making and their effects on human glycemic response. *Journal of Cereal Science*, 2002, 36: 59-66.
4. Fincher G.B. *Cereal cell wall polysaccharides in food, feed and fibre. 30th Nordic Cereal Congress, Book of Abstracts*. Copenhagen, 2009: 28.
5. Brown G.D., Gordon S. Immune recognition. A new receptor for beta-glucans. *Nature*, 2001, 413: 36-37.
6. Byung-Kee B., Ulrich S.E. Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48: 233-242.
7. Bell S., Goldman V.M., Bistran B.R., Arnold A.H., Ostroff G., Forse A. Effect of β -glucan from oats and yeast on serum lipids. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1999, 39: 189-202.
8. Dikeman C.L., Fahey G.C. Viscosity as related to dietary fibre. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2006, 46: 649-663.
9. Battiliana P., Ornstein K., Minehira K., Schwarz J.M., Acheson K., Schneiter P., Burri J., Jequier E., Tappy L. Mechanisms of action of β -glucan in postprandial glucose metabolism in healthy men. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2001, 55: 327-333.
10. Wood P.J. Relationships between solution properties of cereal β -glucans and physiological effects — a review. *Trends in Food Science and Technology*, 2002, 13: 313-320.
11. Bourdon I., Yokoyama W., Davis P., Hudson C., Backus R., Richter D., Knuckles B., Schneeman B.O. Postprandial lipid, glucose, insulin, and cholecystokinin responses in men fed barley pasta enriched with β -glucan. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1999, 69: 55-63.
12. Behall K.M., Scholfield D.J., Hallfrisch J. Barley β -glucan reduces plasma glucose and insulin responses compared with resistant starch in men. *Nutrition Research*, 2006, 26: 644-650.
13. McIntosh G.H., Whyte J., McArthur R., Nestel P.J. Barley and wheat foods: influence on plasma cholesterol concentrations in hypercholesterolemic men. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1991, 53: 1205-1209.
14. Talati R., Baker W.L., Pabilonia M.S., White C.M., Coleman C.I. The effects of barley-derived soluble fibre on serum lipids. *Annals of Family Medicine*, 2009, 7: 157-163.
15. Smith K.N., Queenan K.M., Tomas W., Fulcher R.G., Slavin G.L. Physiological effects of concentrated barley β -glucan in mildly hypercholesterolemic adults. *Journal of the American*

- College of Nutrition*, 2008, 27: 434-440.
16. Nilsen M.S., Jespersen B.M., Engelsen S.B. *Cereal β -glucans — from raw material through processing and product development to health effects. 30th Nordic Cereal Congress, Book of Abstracts*. Copenhagen, 2009: 29.
 17. Holtekjolen A.K., Olsen H.H.R., Fargestad E.M., Uhlen A.K., Knutsen S.H. Variations in water absorption capacity and baking performance of barley varieties with different polysaccharide content and composition. *Food Science and Technology*, 2008, 41: 2085-2091.
 18. Izydorczyk M.S., Chornick T.L., Paulley F.G., Edwards N.M., Dexter J.E. Physicochemical properties of hull-less barley fibre-rich fractions varying in particle size and their potential as functional ingredients in two-layer flat bread. *Food Chemistry*, 2008, 108: 561-570.
 19. Delaney B., Nicolosi R.J., Wilson T.A., Carlson T., Frazer S., Zheng G.-H., Hess R., Ostergren K., Haworth J., Knutson N. β -Glucan fractions from barley and oats are similarly antiatherogenic in hypercholesterolemic Syrian Golden Hamsters. *The Journal of Nutrition*, 2003, 133: 468-475.
 20. Keogh G.F., Cooper G.J.S., Mulvey T.B., McArdle B.N., Coles G.D., Monro J.A., Poppitt S.D. Randomized controlled crossover study of the effect of a highly β -glucan-enriched barley on cardiovascular disease risk factors in mildly hypercholesterolemic men. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2003, 78: 711-718.
 21. Wood P.J. Cereal β -glucans in diet and health. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46: 230-238.
 22. Bedford M.R., Classen H.L., Campbell G.L. The effect of pelleting, salt and pentosanase on the viscosity of intestinal contents and the performance of broilers feed rye. *Poultry Sci.*, 1991, 70: 1571-1577.
 23. Stewart D.C., Hawthorne D., Evans D.E. Development and assessment of a small-scale worth filtration test for the prediction of beer filtration efficiency. *Journal of the Institute of Brewing*, 2000, 106: 361-366.
 24. Brennan C.S., Amor M.A., Harris N., Smith D., Cantrell I., Griggs D., Shewryll P.R. Cultivar differences in modification patterns of protein and carbohydrate reserves during malting of barley. *Journal of Cereal Science*, 1997, 26: 83-93.
 25. Woodward J.R., Phillips D.R., Fincher G.B. Water-soluble (1 3), (1 4)- β -d-glucans from barley (*Hordeum vulgare*) endosperm. I. Physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*, 1983, 3: 143-156.
 26. Wood P.J., Weisz J., Blackwell B.A. Structural studies of (1-3)(1-4)- β -D-glucans by ^{13}C -nuclear magnetic resonance spectroscopy and by rapid analysis of cellulose-like regions using high-performance anion-exchange chromatography of oligosaccharides released by lichenase. *Cereal Chemistry*, 1994, 71: 301-307.
 27. Izydorczyk M.S., Macri L.J., MacGregor A.W. Structure and physicochemical properties of barley non-starch polysaccharides — I. Water-extractable b-glucans and arabinoxilans. *Carbohydrate Polymers*, 1998, 35: 249-258.
 28. Staudte R.G., Woodward J.R., Fincher G.B., Stone B.A. Water-soluble (1 3)(1 4)- β -d-glucans from barley (*Hordeum vulgare*) endosperm. III. Distribution of cello-triosyl and cellotetraosyl residues. *Carbohydrate Polymers*, 1983, 3: 299-312.
 29. Wang Q., Wood P.J., Huang X., Huang X., Cui W. Preparation and characterization of molecular weight standards of low polydispersity from oat and barley (1 3)(1 4)- β -D-glucan. *Food Hydrocolloids*, 2003, 17: 845-853.
 30. Irakli M., Biliaderis C.G., Izydorczyk M.S., Papadoyannis I.N. Isolation, structural features and rheological properties of water-extractable β -glucans from different Greece barley cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2004, 84: 1170-1178.
 31. Lazaridou A., Biliaderis C.G., Micha-Screttas M., Steele B.R. A comparative study on structure-function relations of mixed linkage (1 3), (1 4) linear β -D-glucans. *Food Hydrocolloids*, 2004, 18: 837-855.
 32. Vaikousi H., Biliaderis C.G., Izydorczyk M.S. Solution flow behavior and gelling properties of water-soluble barley (1 3,1 4)- β -glucans varying in molecular size. *Journal of Cereal Science*, 2004, 39: 119-137.
 33. Papageorgiou M., Lakhdara N., Lazaridou A., Biliaderis C.G., Izydorczyk M.S. Water extractable (1 3,1 4)- β -d-glucans from barley and oats: an intervarietal study on their structural features and rheological behavior. *Journal of Cereal Science*, 2005, 42: 213-224.
 34. Johansson L., Karesoja M., Ekholm P., Virkki L., Tenhu H. Comparison of the solution properties of (1 3),(1 4)- β -d-glucans extracted from oats and barley. *Food Science and Technology*, 2008, 41: 180-184.
 35. Izydorczyk M.S., Jacobs M., Dexter J.E. Distribution and structural variation of nonstarch polysaccharides in milling fractions of hull-less barley with variable amylase content. *Cereal Chemistry*, 2003, 80: 645-653.
 36. Jiang G., Vasanthan T. MALDI-MS and HPLC quantification of oligosaccharides of lichenase-hydrolyzed water-soluble β -glucan from ten barley varieties. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2000, 48: 3305-3310.

37. Storsley J.M., Izydorczyk M.S., You S., Biliaderis C.G., Rossnagel B. Structure and physicochemical properties of β -glucans and arabinoxilans isolated from hull-less barley. *Food Hydrocolloids*, 2003, 17: 831-844.
38. Wood P.J., Weisz J., Beere M.U. et al. Structure of (1,3,1,4)- β -glucan in waxy and nonwaxy barley. *Cereal Chemistry*, 2003, 80: 329-332.
39. Woodward J.R., Phillips D.R., Fincher G.B. Water-soluble (1,3,1,4)- β -D-glucans from barley (*Hordeum vulgare*) endosperm. IV. Comparison of 40 °C and 65 °C soluble fractions. *Carbohydrate Polymers*, 1988, 8: 85-97.
40. Gomez C., Navarro A., Manzanares P., Horta A., Carbonell J.V. Physical and structural properties of barley (1-3), (1-4)- β -D-glucan. Part II. Viscosity, chain stiffness and macromolecular dimensions. *Carbohydrate Polymers*, 1997, 32: 17-22.
41. Izydorczyk M.S., Dexter J.E. Barley β -glucans and arabinoxylans: Molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products. *Food Research International*, 2008, 41: 850-868.
42. Johansson L., Tuomainen P., Ylinen M., Ekholm P., Virkki L. Structural analysis of water-soluble and insoluble β -glucans of whole-grain oats and barley. *Carbohydrate Polymers*, 2004, 58: 267-274.
43. Fincher G.B., Stone B.A. *Cell walls and their components in cereal grain technology*. In: *Advances in cereal science and technology* / Y. Pomeraz (ed.). American Association of Cereal Chemists, St. Paul, 1986: 207-295.
44. Aman P., Graham H., Tilley A. Content and solubility of mixed-linked (1-3;1-4)- β -D-glucan in barley and oats during kernel development and storage. *Journal of Cereal Science*, 1989, 10: 45-50.
45. Fincher G.B. Morphology and chemical composition of barley endosperm cell walls. *Journal of the Institute of Brewing*, 1975, 81: 116-122.
46. Wilson S.M., Burton R.A., Doblin M.S., Stone B.A., Newbigin E.J., Fincher G.J., Bacic A. Temporal and spatial appearance of wall polysaccharides during cellularization of barley (*Hordeum vulgare*) endosperm. *Planta*, 2006, 224: 655-667.
47. Bamforth C.W., Kanauchi M. A simple model for the cell wall of the starchy endosperm in barley. *Journal of the Institute of Brewing*, 2001, 107: 235-240.
48. Woodward J.R., Fincher G.B., Stone B.A. Water-soluble (1,3), (1,4)- β -D-glucans from barley (*Hordeum vulgare*) endosperm. II. Fine structure. *Carbohydrate Polymers*, 1983, 3: 207-225.
49. Quinde Z., Ulrich S.E., Baik B.K. Genotypic variation in color and discoloration potential of barley-based food products. *Cereal Chemistry*, 2004, 81: 752-758.
50. Quinde-Axtell Z., Powers P., Baik B.K. Retardation of discoloration in barley flour gel and dough. *Cereal Chemistry*, 2006, 83: 385-390.
51. Fastnought C.E. *Barley fibre*. In: *Handbook of dietary fibre* /S. Cho, M. Dreher (eds.). Marcel Dekker, NY, 2001: 519-542.
52. Gajdosova A., Petrulakova Z., Havrlentova M., Cervena V., Hozova B., Sturdik E., Kogan G. The content of water-soluble and water-insoluble β -D-glucans in selected oats and barley varieties. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 70: 46-52.
53. Lee C.J., Horsley R.D., Manthey F.A., Schwarz P.B. Comparison of β -glucan content of barley and oat. *Cereal Chemistry*, 1997, 74: 571-575.
54. Henry R.J. Pentosan and (1-3,1-4)- β -glucan concentrations in endosperm and wholegrain of wheat, barley, oats, and rye. *Journal of Cereal Science*, 1987, 6: 253-258.
55. Zhang G., Wang J., Chen J. Analysis of β -glucan content in barley cultivars from different locations of China. *Food Chemistry*, 2002, 79: 251-254.
56. Henry R.J. Genetic and environmental variation in the pentosan and β -glucan contents of barley, and their relation to malting quality. *Journal of Cereal Science*, 1986, 4: 269-277.
57. Aman P., Newman C.W. Chemical composition of some different types of barley grown in Montana, USA. *Journal of Cereal Science*, 1986, 4: 133-141.
58. Kalra S., Jood S. Effect of dietary barley β -glucan on cholesterol and lipoprotein fractions in rats. *Journal of Cereal Science*, 2000, 31: 141-145.
59. Xue Q., Wang L., Newman C.W., Graham H. Influence of the hullless, waxy starch and short-awn genes on the composition of barley. *Journal of Cereal Science*, 1997, 26: 251-257.
60. Munck L., Moller B., Jacobsen S., Sondergaard I. Near infrared spectra indicate specific mutant endosperm genes and reveal a new mechanism for substituting starch with (1,3,1,4)- β -glucan in barley. *Journal of Cereal Science*, 2004, 40: 213-222.
61. Andersson A.A.M., Andersson R., Autio K., Aman P. Chemical composition and microstructure of two naked waxy barleys. *Journal of Cereal Science*, 1999, 30: 183-191.
62. Rudi H., Uhlen A.K., Harstad O.M., Munck L. Genetic variability in cereal carbohydrate compositions and potentials for improving nutritional value. *Animal Feed Science and Technology*, 2006, 130: 55-65.
63. Wang L., Jeronimidis G. Investigation of the fracture mode for hard and soft wheat endosperm using the loading-unloading bending test. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48: 193-202.

64. Darlington H.F., Tecsi L., Harris N., Griggs D.L., Cantrell I.C., Shewry P.R. Starch granule associated proteins in barley and wheat. *Journal of Cereal Science*, 2000, 31: 21-29.
65. Allison M.J., Cowe I., McHale R. A rapid test for the prediction of malting quality of barley. *Journal of the Institute of Brewing*, 1976, 82: 166-167.
66. Lazaridou A., Chornick T., Biliaderis C.G., Izydorczyk M.S. Composition and molecular structure of polysaccharides released from barley endosperm cell walls by sequential extraction with water, malt enzymes, and alkali. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48: 304-318.
67. Nielsen J.P. Evaluation of malting barley quality using exploratory data analysis. II. The use of kernel hardness and image analysis as screening methods. *Journal of Cereal Science*, 2003, 38: 247-255.
68. Fox G.P., Osborne B., Bowman J., Kelly A., Cakir M., Poulsen D., Inkerman A., Henry R. Measurement of genetic and environmental variation in barley (*Hordeum vulgare*) grain hardness. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46: 82-92.
69. Brennan C.S., Haris N., Smith D., Shewry P.R. Structural differences in the mature endosperms of good and poor malting barley cultivars. *Journal of Cereal Science*, 1996, 24: 171-177.
70. Swanston J.S. Effects on barley grain size, texture and modification during malting associated with three genes on chromosome 1. *Journal of Cereal Science*, 1995, 22: 157-161.
71. Henry R.J. A comparative study of the total β -glucan content of some Australian barleys. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1985, 25: 424-427.
72. Gamlath J., Aldred G.P., Panozzo J.F. Barley (1-3; 1-4)- β -glucan and arabinoxylan content are related to kernel hardness and water uptake. *Journal of Cereal Science*, 2008, 47: 365-371.
73. Davidson D., Eastman M.A., Thomas J.E. Water during germination of barley. *Plant Science Letters*, 1976, 6: 223-230.
74. Bello M., Tolaba M.P., Aguerre R.J., Suarez C. Modeling water uptake in a cereal grain during soaking. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97: 95-100.
75. Baik B.B., Ulrich S.E. Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48: 233-242.
76. Perez-Vendrell A.M., Brufau J., Molina-Cano J.L., Francesh M., Guasch J. Effects of cultivar and environment on β -(1,3)-(1,4)-D-glucan content and acid extract viscosity of Spanish barleys. *Journal of Cereal Science*, 1996, 23: 285-292.
77. Fastnaught C.E., Berglund P.T., Holm E.T., Fox G.J. Genetic and environmental variation in β -glucan content and quality parameters of barley for food. *Crop Sci.*, 1996, 36: 941-946.
78. Yalcin E., Celik S., Akar T., Sayim I., Koksul H. Effects of genotype and environment on β -glucan and dietary fibre contents of hull-less barleys grown in Turkey. *Food Chemistry*, 2007, 101: 171-176.
79. Griffey C., Brooks W., Kurantz M., Thomason W., Taylor F., Obert D., Moreau R., Flores R., Sohn M., Hicks K. Grain composition of Virginia winter barley and implications for use in feed, food, and biofuels production. *Journal of Cereal Science*, 2010, 51: 41-49.
80. Stuart I.M., Loi L., Fincher G.B. Varietal and environmental variations in (1 3, 1 4)- β -D-glucanase potential in barley: Relationship to malting quality. *Journal of Cereal Science*, 1988, 7: 61-71.
81. Miller S.S., Vincent D.J., Weisz J., Fulcher R.G. Oat β -glucans: An evaluation of eastern Canadian cultivars and unregistered lines. *Canadian Journal of Plant Science*, 1993, 73: 429-436.
82. Hang A., Obert D., Gironella A.I.N., Burton C.S. Barley amylase and β -glucan: their relationships to protein, agronomic traits, and environmental factors. *Crop Sci.*, 2007, 47: 1754-1760.
83. Rey J.I., Hayes P.M., Petrie S.E., Corey A., Flowers M., Ohm J.B., Ong C., Rhinhart K., Ross A.S. Production of dryland barley for human food: quality and agronomic performance. *Crop Sci.*, 2009, 49: 347-355.
84. Tiwari U., Cummins E. Simulation of the factors affecting β -glucan levels during the cultivation of oats. *Journal of Cereal Science*, 2009, 50: 175-183.
85. Zhang G., Chen J., Wang J., Ding S. Cultivar and environmental effects on (1-3, 1-4)- β -D-glucan and protein content in malting barley. *Journal of Cereal Science*, 2001, 34: 295-301.
86. Molina-Cano J.L., Sopena A., Polo J.P., Bergareche C., Moralejo M.A., Swanston J.S., Glidewell S.M. Relationships between barley hordeins and malting quality in a mutant of cv. Triumph. II. Genetic and environmental effects on water uptake. *Journal of Cereal Science*, 2002, 36: 39-50.
87. Peterson D.M., Wesenberg D.M., Burrup D.E. β -Glucan content and its relationship to agronomic characteristics in elite oat germplasm. *Crop Sci.*, 1995, 35: 965-970.
88. Chernyshova A.A., White P.J., Scott M.P., Jannink J.-L. Selection for nutrition function and agronomic performance in oat. *Crop Sci.*, 2007, 47: 2330-2339.
89. Anker-Nilssen K., Sahlstrom S., Knutsen S.H., Holtekjolen A.K. Influence of growth temperature on content, viscosity and relative molecular weight of water-soluble β -glucans in

- barley. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48: 670-677.
90. Saastamoinen M., Plaami S., Kumpulainen J. Genetic and environmental variation in β -glucan content of oats cultivated or tested in Finland. *Journal of Cereal Science*, 1992, 16: 279-290.
 91. Guler M. Barley grain β -glucan content as affected by nitrogen and irrigation. *Field Crops Research*, 2003, 84: 335-340.
 92. Redaelli R., Sgrulletta D., Scafati G., Destefanis E., Cacciatori P. Naked oats for improving human nutrition: genetic and agronomic variability of grain bioactive components. *Crop Sci.*, 2009, 49: 1431-1437.
 93. McCleary B.V., Codd R. Measurement of (1-3),(1-4)- β -D-glucan in barley and oats: streamlined enzymic procedure. *Journal of Science Food and Agriculture*, 1991, 55: 303-312.
 94. Munck L. *The revolutionary aspect of exploratory chemometric technology*. Narayana Press, Gylling, Denmark, 2005.
 95. Henry R.J. Near-infrared reflectance analysis of carbohydrates and its application to the determination of (1-3),(1-4)- β -D-glucan in barley. *Carbohydrate Polymers*, 1985, 14: 13-19.
 96. Li J., Baga M., Rossnagel B.G., Legge W.G., Chibbar R.N. Identification of quantitative trait loci for β -glucan concentration in barley grain. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48: 647-655.
 97. Oscarsson M., Andersson R., Salomonsson A.C., Aman P. Chemical composition of barley samples focusing on dietary fibre components. *Journal of Cereal Science*, 1996, 24: 161-170.
 98. Fox G.P., Kelly A., Poulsen D., Inkerman A., Henry R. Selecting for increased barley grain size. *Journal of Cereal Science*, 2006, 43: 196-208.
 99. Knutsen S.H., Holtekjolen A.K. Preparation and analysis of dietary fibre constituents in whole grain from hulled and hull-less barley. *Food Chemistry*, 2007, 102: 707-715.
 100. Huth M., Dongowski G., Gebhart E., Flamme W. Functional properties of dietary fibre enriched exudates from barley. *Journal of Cereal Science*, 2002, 32: 115-117.
 101. Boros D., Marquardt R.R., Slominsky B.A., Guenter W. Extract viscosity as an indirect assay for water-soluble pentosan content in rye. *Cereal Chemistry*, 1993, 7: 575-580.
 102. Munck L., Jespersen B.M. *Adapting cereal plants and human society to a changing climate and economy merged by the concept of self-organization*. In: *Barley: Production, improvement, and use* /S.E. Ulrich (ed.). John Wiley and Sons, USA, 2009, Chapter 17: 323-365.