

ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСТВОРИМЫХ β -ГЛЮКАНОВ В ЗЕРНЕ ОВСА

Попов В.С.*, Перчук И.Н., Хорева В.И.

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, д. 42, 44;

*✉ v.popov@vir.nw.ru

Актуальность. Овес посевной (*Avena sativa* L.) является одним из важнейших источников белка, масла, крахмала и пищевых волокон, в частности β -глюканов. Пищевые волокна служат источником питания для микрофлоры кишечника и существенно влияют не только на ее состав, но и на процессы нормального функционирования кишечника в целом. В связи с возросшим интересом к β -глюкану как компоненту пищи и биологически-активной добавке возникает необходимость в наличии удобного и недорогого метода определения содержания β -глюканов в зерне. В статье дается обзор существующих методов выделения и определения растворимых β -глюканов в злаковых: ферментативного, щелочного, щелочно-ферментативного, колориметрического; отмечены их достоинства и недостатки. Основными недостатками некоторых методов являются сложность и длительность выполнения, значительная стоимость используемых реагентов, отсутствие возможности определения точного содержания β -глюканов из-за недостаточной очистки их от различных примесей. **Результаты.** В данном исследовании на примере голозерных и пленчатых сортов овса рассмотрена возможность использования гравиметрического метода, разработанного на основе модифицированного нами щелочного метода. Измельченные зерна овса предварительно обрабатывали 50% раствором этанола для инактивации β -глюканазы и удаления свободных сахаров, части липидов, белков и других веществ. Высвобождение β -глюканов из алейронового слоя и эндосперма муки проводили 5% раствором NaOH и окончательную экстракцию осуществляли 70% раствором этилового спирта. β -глюканы всплывали на поверхность в виде сгустка волокон, который затем высушивали при температуре 100-102°C до постоянной массы и взвешивали. Содержание β -глюканов рассчитывали на сухую навеску (%). Выделенные β -глюканы исследовали на наличие сопутствующих веществ: содержание азотистых веществ определяли по методу Къельдаля, наличие крахмала определяли по качественной реакции с реактивом Люголя. **Заключение.** Содержание β -глюканов в зерне изученных образцов составило от 3,12±0,18% до 4,65±0,17% на сухой вес. В результате проведенного исследования были подобраны оптимальные условия выделения β -глюканов: установлены соотношения экстрагирующих смесей, режимы центрифугирования, осаждения и сушки. Показано, что данный метод позволяет выделять β -глюканы при минимальной примеси азотистых веществ (0,07-0,12%) и отсутствии следов крахмала. Одним из преимуществ описанного метода является его доступность для массового анализа при изучении коллекции зерновых культур.

Ключевые слова: *Avena sativa*, некрахмальные полисахариды, щелочной метод, гравиметрический метод, голозерный овёс, пленчатый овёс.

Для цитирования: Попов В.С., Перчук И.Н., Хорева В.И. Гравиметрический метод количественного определения растворимых β -глюканов в зерне овса. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(1):5-12. DOI: 10.30901/2658-6266-2021-1-01

Прозрачность финансовой деятельности. Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. **Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.** **Дополнительная информация.** Полные данные этой статьи доступны <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2021-1-01> **Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы. Все авторы одобрили рукопись. Конфликт интересов отсутствует.**

A GRAVIMETRIC METHOD FOR THE QUANTITATIVE DETERMINATION OF SOLUBLE β -GLUCAN CONTENT IN OAT GRAIN

Popov V.S.*, Perchuk I.N., Khoreva V.I.

N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources,
42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia;

*✉ v.popov@vir.nw.ru

Background. Oat (*Avena sativa* L.) is one of the most important sources of protein, oil, starch and dietary fibers, in particular β -glucans. Dietary fiber serves as a source of nutrition for the intestinal microflora and significantly affects not only its composition, but also the normal functioning of the intestine as a whole. In connection with the increased interest in β -glucans as a food component and dietary supplement, there is a need in a convenient and inexpensive method for determination of β -glucans content in grain. The article provides an overview of the existing methods for the isolation and determination of soluble β -glucans in cereals: enzymatic, alkaline, alkaline-enzymatic, colorimetric; their advantages and disadvantages are noted. The main disadvantages of some methods are the complexity and duration of execution, significant cost of the required reagents, and the inability to determine the exact content of β -glucans due to their insufficient purification from various impurities. **Results.** This study used the example of naked and covered oat cultivars to demonstrate applicability of the gravimetric method that we developed by modifying the alkaline method. Whole grain oat flour was pretreated with a 50% ethanol solution to inactivate β -glucanase and remove free sugars, some lipids, proteins, and other substances. β -glucans were released from the aleurone layer and the endosperm with a 5% sodium hydroxide solution, and finally extracted with a 70% ethanol solution. β -glucans floated to the surface in the form of a bunch of fibers, which was then dried at a temperature about 100-102°C to constant weight and weighed. The content of β -glucans was calculated from the dry weight (%). The isolated β -glucans were checked for the presence of accompanying substances: the content of nitrogenous substances was determined by the Kjeldahl method, and the presence of starch was determined by a qualitative reaction with Lugol's reagent. **Conclusions.** The content of β -glucans in the grain of the studied samples ranged from 3.12±0.18 up to 4.65±0.17% of the dry weight. As a result of the study, the optimal conditions of β -glucans isolation were selected: the extraction mixtures ratios, as well as the modes of centrifugation, sedimentation and drying were established. It has been shown that this method makes it possible to isolate β -glucans with a minimum impurity of nitrogenous substances (0.07-0.12%) and no traces of starch. One of the advantages of the described method is its availability for mass analysis when studying a collection of grain crops.

Keywords: *Avena sativa*, non-starch polysaccharides, alkaline method, gravimetric analysis, naked oat, covered oat.

For citation: Popov V.S., Perchuk I.N., Khoreva V.I. A gravimetric method for the quantitative determination of soluble β -glucan content in oat grain. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(1):5-12. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2021-1-01

Financial transparency. The authors have no financial interest in the presented materials or methods. **The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. Additional information.** Extended data is available for this paper at <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2021-1-01> **The journal's opinion is neutral to the presented materials, the author, and his or her employer. All authors approved the manuscript. No conflict of interest.**

ORCID:

Popov V.S. <https://orcid.org/0000-0003-3274-7662>

Perchuk I.N. <https://orcid.org/0000-0001-6568-5248>

Khoreva V.I. <https://orcid.org/0000-0003-2762-2777>

УДК 633.13:581.192

Поступила в редакцию: 21.01.2021

Принята к публикации: 11.02.2021

Введение

Зерно овса является одной из важнейших зерновых культур, используемой в пищевой и кормовой промышленности. Питательная ценность овса определяется его химическим составом: содержанием белка, крахмала, масла и наличием в масле ненасыщенных жирных кислот, присутствием основных минеральных элементов, разнообразных химических веществ, проявляющих антиоксидантные свойства и пищевых волокон, в частности β -гликоканов (Shewry et al., 2009). β -гликоканов представляют собой класс неперевариваемых полисахаридов, широко встречающихся в природе в таких источниках, как зерно, дрожжи, бактерии, водоросли и грибы (Brownlee, 2011; Gematdinova et al., 2017).

Наибольшее содержание β -гликоканов среди зерновых культур (г на 100 г сухого вещества) отмечено в ячмене – 2-20 г и овсе – 3-8 г. Другие злаки также содержат β -гликоканов, но в значительно меньших количествах: сорго – 1,1-6,2 г, рожь – 1,3-2,7 г, кукуруза – 0,8-1,7 г, тритикале – 0,3-1,2 г, пшеница – 0,5-1,0 г, рис – 0,13 г (Salomatov, 2015).

По растворимости в воде различают растворимые и нерастворимые β -гликоканов. Содержание нерастворимых β -гликоканов может составлять 30 и более процентов от сухого веса зерна, тогда как растворимых β -гликоканов значительно меньше, и в зависимости от разновидности овса составляет на сухой вес зерна в порядке убывания 3,9-7,5% для голозёрного овса, 3,0-3,9% для тёмного плёнчатого овса, 2,6-3,9% для жёлтого плёнчатого овса

и 2,0-4,1% для светлого плёнчатого овса (Gajdosova et al., 2007).

Наряду с другими нерастворимыми пищевыми волокнами (лигнин, нерастворимая клетчатка, некоторые гемицеллюлозы), нерастворимые β -гликоканов не подвергаются воздействию пищеварительных ферментов, поэтому не перевариваются и не усваиваются организмом (Dikeman, Fahey, 2006). Однако наибольший интерес представляют растворимые β -гликоканов. Они легче поддаются ферментации, более эффективно содействуют питанию и росту бактерий толстого кишечника, которые в свою очередь синтезируют витамины, ферменты и другие биологически активные вещества.

Из положительных сторон, связанных с употреблением продуктов богатых растворимыми β -гликоканов, необходимо отметить их способность предотвращать расщепление и переваривание части холестерина, поступающего с пищей, снижать в сыворотке концентрацию липопротеидов низкой плотности, стабилизировать уровень сахара в крови (глюкозы), а также уменьшать риск возникновения сердечно-сосудистых заболеваний (Porov et al., 2014; Regand et al., 2011). Это связывают с высокой вязкостью растворов β -гликоканов, что проявляется в их функциональных и физиологических эффектах (Wood, 2010). Также выявлено положительное влияние β -гликоканов на усвоение кормов и повышение иммунитета у сельскохозяйственных животных (Cherdthong et al., 2018).

Несмотря на положительную роль в питании, у β -гликоканов имеются и отрицательные свойства.

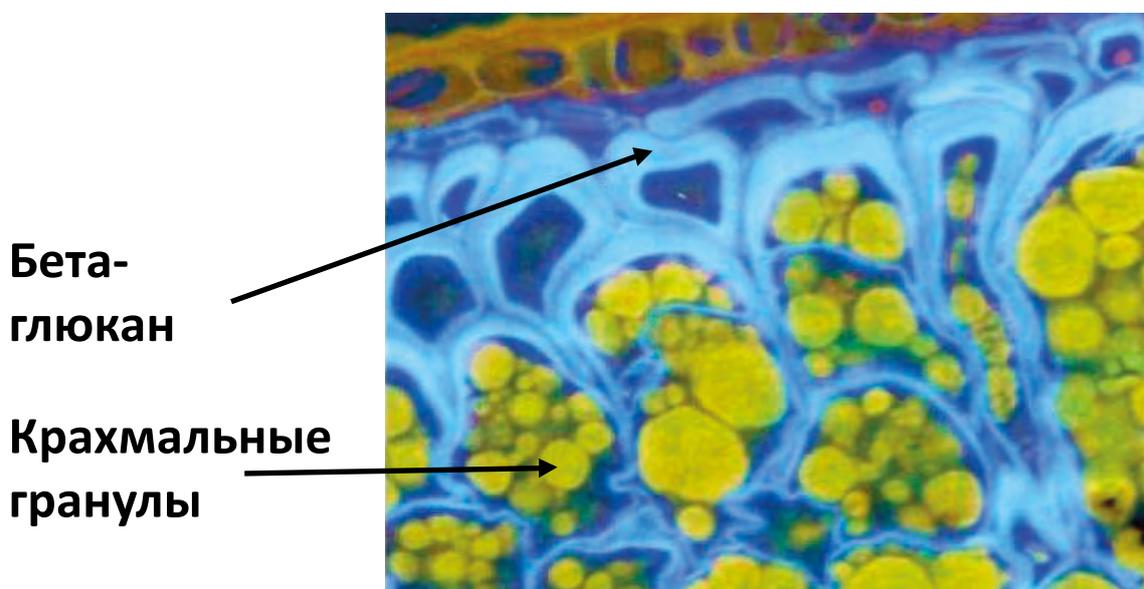


Рис. 1. Распределение β -гликоканов в зерне овса
(<https://www.sweoat.com/oat-beta-glucans>, с модификацией)

Fig. 1. Distribution of β -glucans in oat grain
(<https://www.sweoat.com/oat-beta-glucans>, with modification)

Предполагается, что, связывая ионы железа, β -глюканы могут уменьшать его биологическую доступность (Faure et al., 2015). Для технологии пивоварения необходимо, чтобы солод (сусло) содержал как можно меньше β -глюканов, поскольку они способствуют повышению вязкости суслу и пива, снижению их выхода, плохой фильтруемости. Кроме того, питательная ценность овса для нежвачных животных отрицательно коррелирует с содержанием пищевых волокон в зерновке (Svihus, Gullord, 2002).

Таким образом, необходимо отметить важность количественного определения β -глюканов в различном зерновом сырье. Однако определение и получение чистого β -глюкана является сложным и дорогостоящим процессом, поскольку у зерновых он находится в связанном виде и сконцентрирован в основном в алейроновом и субалейроновом слое (рис. 1), где также содержится крахмал, белки и липиды (Bechtel et al., 2009).

Целью настоящей работы являлась разработка доступного и недорогого для массового анализа метода количественного определения β -глюканов в зерне голозёрного и плёнчатого овса.

Материал и методы

В литературе обсуждается ряд методов определения β -глюканов, среди которых наиболее широко применяемым является биофизический ферментативный метод с использованием лихеназы и β -глюкозидазы (Lee et al., 1997; McCleary, Codd, 1991). Однако данный метод доста-

точно трудоёмкий и требует проведения множества операций. Кроме того, стоимость набора реагентов, поставляемых компанией Megazyme, может оказаться довольно значительной, если требуется проанализировать большое количество образцов, что является не всегда оправданным для каждодневных и частых анализов.

Метод признан пригодным для точного, быстрого и экономичного определения β -глюканов в семенах ячменя, овса, пшеницы, тритикале, люпина и других культур. В настоящее время изучается его потенциал в ближней инфракрасной области. Но данный метод требует настройки прибора, предварительного построения калибровочных кривых, полученных на большом объёме материала с использованием классических методов анализа (Blakeney et al., 2005; Schmidt et al., 2009).

Существует также колориметрический метод определения β -глюканов с использованием флуоресцентного осветляющего агента калькофлуора белого (Tikanoja et al., 2014, European Patent EP2810051A1).

Интересным представляется метод извлечения β -глюканов из зерна щелочным и двухступенчатым щелочно-ферментативным способом. В исследованиях (Salomatov, 2015; Gematdinova et al., 2017) рассматриваются принцип и основные этапы щелочного метода экстракции. Однако предложенные методы имеют ряд недостатков, связанных с большой продолжительностью анализа и отсутствием возможности точного определения содержания β -глюканов из-за наличия сопутствующих веществ. В методе, описанном А.С. Саломатовым, выход

Таблица 1. Характеристика используемых в работе образцов овса

Table 1. Characters of oat accessions used in the work

| Название сорта/ Cultivar name | Форма овса/ Oat form | Ботаническая разновидность/ Botanical variety | Происхождение/ Origin |
|----------------------------------|--------------------------|---|--|
| Пушкинский Pushkinskii | Голозёрный Naked oat | <i>inermis</i> | Ленинградская обл. Leningrad Province |
| Вятский Vyatskii | | <i>inermis</i> | Кировская обл. Kirov Province |
| Голец Goletz | | <i>inermis</i> | Красноярский край Krasnoyarsk Territory |
| Тайдон Taidon | | <i>inermis</i> | Кемеровская обл. Kemerovo Province |
| Факир Fakir | Плёнчатый Covered oat | <i>aurea</i> | Кировская обл. Kirov Province |
| Лев Lev | | <i>mutica</i> | Московская обл. Moscow Province |
| Сапсан Sapsan | | <i>mutica</i> | Кировская обл. Kirov Province |
| Тубинский Tubinskii | | <i>mutica</i> | Красноярский край Krasnoyarsk Territory |

β -глюканов составлял 71,12%, при этом на долю примесей приходилось 28,88%. Кроме того, методы, предложенные авторами, были рассмотрены только на примере голозёрных сортов овса, тогда как значительная часть сортообразцов представлена плёнчатыми формами.

В данной работе приводится модификация щелочного метода, при этом оптимизированы основные этапы и параметры выделения β -глюканов; сокращено время проведения эксперимента, увеличен выход и чистота

Приборы и материалы, используемые для определения β -глюканов:

- центрифуга с охлаждением SL16R, (Thermo Fisher Scientific или аналогичная);
- рН-метр АНИОН-4100 (Анион или аналогичный);
- мельница лабораторная ЛМТ-1 (Плаун или аналогичная);
- реактивы: хлористоводородная кислота ХЧ; гидроксид натрия ХЧ; фосфорновольфрамовая кислота ХЧ; спирт этиловый ХЧ.

Овсяную муку получали методом прямого помола цельного зерна (голозёрного) и с плёнками (для плёнчатых сортов).

Результаты и обсуждение

Гравиметрический метод определения β -глюканов в зерне овса включает в себя получение овсяной муки с последующим поэтапным отделением сопутствующих веществ (белок, масло, крахмал), высушиванием до постоянной массы выделившихся β -глюканов, их взвешиванием и определением процентного содержания в муке, с дальнейшим пересчётом на сухое вещество.

Метод количественного определения β -глюканов включает в себя следующие этапы:

1. Предварительно измельченное зерно овса обрабатывали 50%-ным этиловым спиртом в соотношении 1:10 (масса муки в граммах: объём спирта в мл, $m:v$; $g:ml$), для извлечения свободных сахаров, части липидов, белков и других веществ. Экстракцию проводили при температуре 60°C в течение 30 минут, что также способствует инактивации β -глюканазы (Skendi et al., 2003). Затем суспензию центрифугировали при скорости вращения 15 тыс. об/мин в течение 15 минут и температуре +20°C (такие же параметры центрифугирования применяли на всех остальных этапах работы кроме этапа нейтрализации, где для более полного отделения осадка применяли центрифугирование с охлаждением при температуре +10°C). Этиловый спирт сливали, а полученный осадок использовали для дальнейшего исследования.

2. Высвобождение β -глюканов из алейронового слоя и эндосперма муки проводили в щелочной среде двукратной последовательной обработкой осадка 5%-ным раствором гидроксида натрия, сначала в соотношении 1:14 ($m:v$), а затем – 1:6 ($m:v$) при температуре 45°C в течение

конечного продукта; результаты подвергнуты статистической обработке и сопоставлены с данными, полученными арбитражным ферментативным методом АОАС 995.16 и ICC Standard Method No. 168 для β -глюкана (Megasyne) (Polonskiy et al., 2019).

Разработанный метод был нами апробирован на голозёрных и плёнчатых сортах овса посевного (*Avena sativa* L.) (таблица 1).

30 минут. Для лучшего перемешивания и предотвращения образования комков муки, суспензию периодически перемешивали плоскими стеклянными палочками. После каждой щелочной экстракции проводили центрифугирование. На данном этапе происходит отделение клетчатки, а в супернатанте остаются белки, крахмал, β -глюканы.

3. Объединённые щелочные экстракты нейтрализовали соляной кислотой до рН 7,0, контролируя кислотность с помощью рН-метра.

4. К полученному раствору добавляли 10%-ную фосфорновольфрамовую кислоту в соотношении 1:1,5 к массе муки (1 г муки:1,5 мл кислоты, $m:v$), перемешивали и смесь центрифугировали. Фосфорновольфрамовая кислота способствует более полному осаждению крахмала и белка и образованию плотного осадка. При этом в супернатанте остаются аминокислоты, простые сахара и β -глюканы, а в осадок переходят олигомеры крахмала и белка.

5. Выделение β -глюканов из супернатанта осуществляли добавлением к нему двукратного объёма 70%-ного этилового спирта и выдерживанием смеси в течение одного часа при температуре +20°C. При этом для лучшего перемешивания супернатант вливали в спирт, а разделение осуществляли в мерных цилиндрах на 100 см³, что способствует лучшему отделению β -глюканов от примесей.

6. β -глюканы всплывали на поверхность в виде сгустка волокон, а образовавшийся на дне рыхлый осадок, содержащий азотистые вещества и частицы крахмала, не учитывали (рис. 2). Всплывшие β -глюканы помещали в предварительно высушенные и взвешенные фарфоровые чашечки и высушивали при температуре 100-102°C до постоянной массы.

7. Содержание β -глюканов на сухую навеску муки (x , %) рассчитывали по формуле:

$$x = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100 \cdot 100}{m \cdot c}$$

где, m_1 – масса фарфоровой чашечки с высушенными β -глюканами, г;

m_2 – масса фарфоровой чашечки, г;

m – масса муки, г;

c – содержание сухих веществ в навеске муки, %.

Содержание сухого вещества определено методом, основанном на взвешивании муки до и после её высушивания до постоянной массы при температуре 100-102°C (Ermakov, Arasimovich, 1987).

Выделенные β -глюканы проверяли на наличие сопутствующих веществ. Содержание азотистых веществ, определяемых по методу Кьельдаля, было незначи-

тельным (таблица 2). Качественная реакция на крахмал с реактивом Люголя не выявила характерной синей окраски, что указывало на отсутствие крахмалистых полисахаридов.

Результаты апробирования метода представлены в таблице 2.

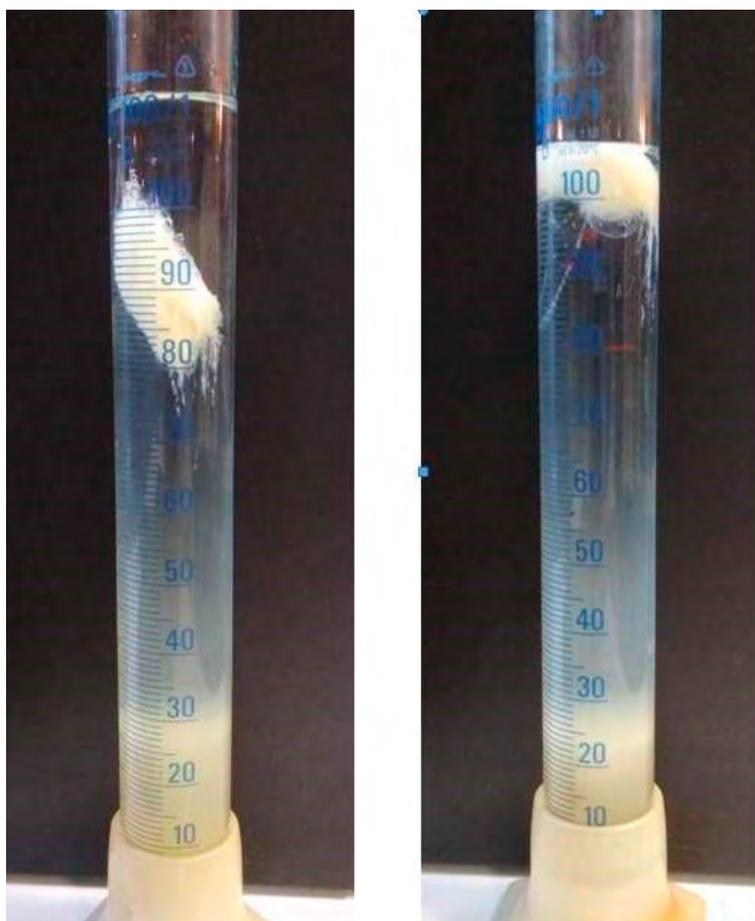


Рис. 2. Всплывшие волокна β -глюканов в растворе этанола

Fig. 2. β -glucan fibers floating in ethanol solution

Как видно из таблицы 2, содержание β -глюканов, в исследованных голозёрных и плёнчатых сортах овса сопоставимо со средними значениями за 3 года, установленными для данных сортов стандартным ферментативным методом (Megasynt) и находилось в диапазоне от $3,46 \pm 0,23$ до $4,65 \pm 0,17\%$ для голозёрных сортов, и от $3,12 \pm 0,18$ до $4,28 \pm 0,34\%$ для плёнчатых сортов овса в пересчёте на сухой вес. Содержание примесей в выделенных β -глюканах не превышало допустимый уровень: азотистые вещества находились в диапазоне от 0,07 до 0,12% к сухому весу β -глюканов; следы крахмала не обнаружены.

Разработанный гравиметрический метод определе-

ния β -глюканов в зерне овса позволяет непосредственно выделять β -глюканы из образцов, очищать их от различных примесей и рассчитывать процентное содержание к массе навески.

Информация о содержании β -глюканов в зерне разных образцов овса чрезвычайно скудна (Loskutov, Polonskiy, 2017). Предлагаемый нами метод определения β -глюканов можно с успехом применять для анализа голозёрных и плёнчатых сортов овса. К достоинствам метода относятся доступность используемых в нем реактивов и оборудования, а также незначительные временные затраты на подготовку и проведение анализа. Особо следует отметить возможность количественного определения получа-

Таблица 2. Содержание β-глюканов в голозёрных и плёнчатых сортах овса

Table 2. β-glucans content in naked and covered oat cultivars

| Форма овса/ Oat form | Название сорта/ Cultivar name | Сухое вещество, %/ Dry matter, % | β-глюканы, % β-glucans, % | | Азотистые вещества (от суммы β-глюканов), %/ Nitrogenous substances (of the total β-glucans), % | Средние данные за 3 года/ Average data for 3 years* | |
|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---|---|--|--|------|
| | | | на воздушно-сухую навеску/ of the air dried sample | на термически высушенную навеску/ of the heat-dried sample | | \bar{x} | Cv |
| Голозёрный Naked oat | Пушкинский Pushkinskii | 92,02±0,28 | 3,95±0,06 | 4,29±0,06 | 0,12 | - | - |
| | Вятский Vyatskii | 91,21±0,01 | 3,16±0,21 | 3,46±0,23 | 0,09 | 3,73 | 8,6 |
| | Голец Goletz | 90,89±0,11 | 3,83±0,02 | 4,21±0,02 | 0,07 | 4,06 | 13,7 |
| | Тайдон Tajdon | 91,18±0,14 | 4,24±0,16 | 4,65±0,17 | 0,11 | 4,77 | 9,9 |
| Плёнчатый Covered oat | Факир Fakir | 92,40±0,11 | 3,49±0,11 | 3,78±0,12 | 0,08 | - | - |
| | Лев Lev | 92,47±0,07 | 3,96±0,31 | 4,28±0,34 | 0,10 | - | - |
| | Сапсан Sapsan | 92,53±0,04 | 3,42±0,06 | 3,70±0,06 | 0,08 | 3,83 | 1,5 |
| | Тубинский Tubinskii | 91,31±0,08 | 2,85±0,17 | 3,12±0,18 | 0,07 | 2,90 | 10,3 |

* стандартный метод АОАС 995.16 и ICC Standard Method No. 168 для β-глюкана (Megasyne) (Polonskiy et al., 2019).

емого продукта благодаря практически полному отсутствию в нем сопутствующих примесей. Учитывая тот факт, что в настоящее время в изучении коллекционных образцов злаков (Polonskiy et al., 2019) с целью выявления нового интересного селекционного материала большее значение придается методам, позволяющим определять в зерне содержание важных биохимических компонентов, повышающих его пищевую ценность, предлагаемый метод можно использовать при массовом анализе.

Заключение

При изучении генофонда зерновых, в частности овса и ячменя, как культур, характеризующихся высоким содержанием β-глюканов, предложенный нами метод может быть полезен для построения калибровочных кривых при использовании метода инфракрасной спектроскопии. Возможно, в дальнейшем это позволит найти новое более узкоспециализированное и многозадачное

применение данных культур в пищевой промышленности и будет способствовать созданию коммерческих сортов овса кормового и пищевого направлений (Zhu et al., 2016).

References/Литература

- Bechtel D.B., Abecassis J., Shewry P.R., Evers A.D. Development, structure, and mechanical properties of the wheat grain. In: Shewry P. R., Khan K. (eds.) *Wheat: chemistry and technology*. 4th ed. American Association of Cereal Chemists (AACC), St. Paul. MN; 2009. p.51-95. DOI: 10.1016/B978-1-891127-55-7.50010-0
- Blakeney A.B., Flinn P.C. Determination of non-starch polysaccharides in cereal grains with near-infrared reflectance spectroscopy. *Molecular Nutrition and Food Research*. 2005;49(6):546-550. DOI: 10.1002/mnfr.200500038
- Brownlee I.A. The physiological roles of dietary fibre. *Food Hydrocolloids*. 2011;25(2):238-250. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2009.11.013
- Cherdthong A., Seankamsorn A., Suriyapha C., Chanjula P., Wanapat M. Effect of β-glucan supplementation on feed intake, digestibility of nutrients and ruminal fermentation in Thai native beef cattle. *Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2018;102(6):1509-1514. DOI: 10.1111/jpn.12989
- Dikeman C.L., Fahey G.C. Viscosity as related to dietary fibre:

- a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2006;46(8):649-663.
- Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P., Peruanskiy Yu.V., Lukovnikova G.A., Ikonnikova M.I. Methods of biochemical research of plants (Metody biohimicheskikh issledovaniy rasteniy). A.I. Ermakov (ed.). 3rd ed. Leningrad; 1987. [in Russian] (Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П., Перуанский Ю.В., Луковникова Г.А., Иконникова М.И. Методы биохимических исследований растений / под ред. А.И. Ермакова. 3-е изд. Ленинград; 1987).
- Faure A.M., Koppeno W.H., Nyström L. Iron (II) binding by cereal β -glucan. *Carbohydrate Polymers*. 2015;115:739-743. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.07.038
- Gajdošová A., Petrušáková Z., Havrlentová M., Červená V., Hozová B., Šturdík 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.
- Gematdinova V.M., Kanarskii A.V., Kanarskaya Z.A., Smetanskaya I.I. Influence of alkaline and environmental processing of oil and grain outs on β -glucane output (Vliyanie shelochnoy i fermentativnoy obrabotki zerna ovsa i ovseyanikh otrubej na vihod beta-glucana). *Proceedings of VSUET = Vestnik VGUIT*. 2017;79(3):164-168. [in Russian] (Гемаддинова В.М., Канарский А.В., Канарская З.А., Сметанская И.И. Влияние щелочной и ферментативной обработки зерна овса и овсяных отрубей на выход бета-глюкана. *Вестник ВГУИТ*. 2017;79(3):164-168). DOI: 10.20914/2310-1202-2017-3-164-168
- 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(5):571-575. DOI: 10.1094/CCHEM.1997.74.5.571
- Loskutov I.G., Polonskiy V.I. Content of β -glucans in oat grain as a perspective direction of breeding for health products and fodder. *Agricultural Biology*. 2017;52(4):646-657. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.4.646eng
- McCleary B.V., Codd R. Measurement of (1 \rightarrow 3),(1 \rightarrow 4)- β -D-glucan in barley and oats: streamlined enzymic procedure. *Journal of Science Food and Agriculture*. 1991;55:303-312.
- Polonskiy V.I., Surin N.A., Gerasimov S.A., Lipshin A.G., Sumina A.V., Zute S. The study of oat varieties (*Avena sativa* L.) of different geographical origin for grain quality and productivity (Izuchenie sortov ovsa (*Avena sativa* L.) razlichnogo geograficheskogo proiskhozhdeniya po kachestvu zerna i produktivnosti). *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(6):683-690. [in Russian] (Полонский В.И., Сурин Н.А., Герасимов С.А., Липшин А.Г., Сумина А.В., Зюте С. Изучение сортов овса (*Avena sativa* L.) различного географического происхождения по качеству зерна и продуктивности. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(6):683-690. DOI: 10.18699/VJ19.541
- Popov V.S., Krasilnikov V.N., Barsukova N.V. Beta-glucans of oats in functional and therapeutic nutrition (Beta-glyukany ovsa v funktsionalnom i lechebnoy pitanii). *Problems of economics and management in trade and industry = Problemy ekonomiki i upravleniya v torgovle i promyshlennosti*. 2014;2(6):78-83. [in Russian] (Попов В.С., Красильников В.Н., Барсукова Н.В. Бета-глюканы овса в функциональном и лечебном питании. *Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности*. 2014;2(6):78-83).
- Regand A., Chowdhury Z., Tosh S.M., Wolever T.M.S., Wood P. The molecular weight, solubility and viscosity of oat β -glucan affect human glycemic response by modifying starch digestibility. *Food Chemistry*. 2011;129(2):297-304. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.04.053
- Salomatov A.S. Acidic extraction of β -glucan from barley (Polucheniye beta-glucana iz yachmenya metodom kislotnoy ekstraktsii). *Bulletin of Altai State Agrarian University = Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015;6(128):130-134. [in Russian] (Саломатов А.С. Получение β -глюкана из ячменя методом кислотной экстракции. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2015;6(128):130-134).
- Schmidt J., Gergely S., Schönlechner R., Grausgruber H., Tömösközi S., Salgó A., Berghofer E. Comparison of Different Types of NIR Instruments in Ability to Measure β -glucan Content in Naked Barley. *Cereal Chemistry*. 2009;86(4):398-404. DOI: 10.1094/CCHEM-86-4-0398
- Shewry P.R., Piiroinen V., Lampi A-M., Nyström L., Li L., Rakszegi M., Fraš A., Boros D., Gebruers K., Courtin C.M., Delcour J.A., Andersson A.A.M., Dimberg L., Bedó Z., Ward J.L. Phytochemical and Fiber Components in Oat Varieties in the HEALTH-GRAIN Diversity Screen. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2009;56(21):9777-9784. DOI: 10.1021/jf801880d
- Skendi A., Biliaderis C.G., Lazaridou A., Izydorczyk M.S. Structure and rheological properties of water soluble β -glucans from oat cultivars of *Avena sativa* and *Avena byzantina*. *Journal of Cereal Science*. 2003;38(1):15-31. DOI: 10.1016/S0733-5210(02)00137-6
- Svihus B., Gullord M. Effect of chemical content and physical characteristics on nutritional value of wheat, barley and oats for poultry. *Animal Feed Science and Technology*. 2002;102(1-4):71-92. DOI: 10.1016/S0377-8401(02)00254-7
- Tikanoja S., Suoniemi-Kähärä A., Otama L. Method for determining the concentration of beta-d-glucan. Finland; patent number: EP2810051A1; 2014.
- Wood P.J. Oat and rye β -glucan: properties and function. *Cereal Chemistry*. 2010;87(4):315-330. DOI: 10.1094/CCHEM-87-4-0315
- Zhu F., Du B., Xu B. A critical review on production and industrial applications of β -glucans. *Food Hydrocolloids*. 2016;52:275-288. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2015.07.003