

Оригинальная статья / Original article

УДК 633.85: 663.437: 664.649

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-449-459>



Динамика макронутриентов в процессе кратковременного проращивания семян льна

© И.Э. Миневич*, А.П. Нечипоренко**, А.А. Гончарова*, В.Е. Ситникова**

*Федеральный научный центр лубяных культур, г. Тверь, Российская Федерация

**Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Резюме: Проращивание является экологичным и доступным способом для максимальной реализации биохимического потенциала растительного пищевого сырья. В результате биоактивации собственной ферментной системой происходит увеличение водорастворимых белковых фракций, накопление свободных аминокислот и жирных кислот, а также легкорастворимых редуцирующих сахаров, что приводит к повышению пищевой ценности сырья и улучшению функциональных свойств заключенного в нем белка. В качестве сырья использовали семена льна как источник эссенциальных полиненасыщенных жирных кислот, пищевых волокон, полноценного белка, полипептидов и лигнанов, которые поддерживают важнейшие физиологические функции организма человека. Цель работы состояла в исследовании динамики макронутриентов в процессе кратковременного проращивания семян льна химическими и спектроскопическими методами. Проращивание семян льна проводили в лабораторных условиях в специальных поддонах при температуре 18–20 °С. Семена проращивали в течение 5 суток при периодическом увлажнении. Были представлены визуальные изменения, происходящие с семенами льна на всех стадиях кратковременного проращивания. Показана периодичность в изменениях основных макронутриентов семян льна. Был сделан вывод, что в исследуемый период проращивания еще не протекает основной гидролитический распад запасных белков, приводящий к безвозвратному снижению, прежде всего, содержания белков и белкового азота. На основании изменения содержания липидов и кислотного числа, интенсивности пиков функциональных групп в области липидов, в частности полосы 1748 см⁻¹ валентных колебаний С=О-групп жирных кислот, предположено отсутствие расщепления запасных липидов на раннем этапе проращивания. Показано накопление растворимых веществ в исследуемый период проращивания, в том числе водорастворимых белковых соединений, а также водорастворимых полисахаридов и продуктов их гидролитического расщепления. Пророщенные семена льна являются ценным ингредиентом для создания продуктов здорового питания.

Ключевые слова: семена льна, белки, макронутриенты, ненасыщенные жирные кислоты, кратковременное проращивание, ИК-спектроскопия, ограниченный гидролиз

Для цитирования: Миневич И.Э., Нечипоренко А.П., Гончарова А.А., Ситникова В.Е. Динамика макронутриентов в процессе кратковременного проращивания семян льна. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2021. Т. 11. N 3. С. 449–459. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-449-459>

Dynamics of macronutrients during short-term germination of flax seeds

Irina E. Minevich*, Alla P. Nechiporenko**, Agatha A. Goncharova*, Vera E. Sitnikova

*Federal Scientific Center for Fiber Crops, Tver, Russian Federation

**National Research University of Information Technology, Mechanics and Optic, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract: Germination is an environmentally friendly and convenient approach to enhancing the biochemical potential of food plant raw materials. The nutritional value of raw materials and the functional properties of protein contained therein can be significantly improved by activating the inherent enzyme system. Bioactivation not only increases the amount of water-soluble protein fractions, but also promotes accumulation of free amino and fatty acids and easily soluble reducing sugars. We used flax seeds as a source of essential polyunsaturated fatty acids, dietary fibres, complete protein, polypeptides and lignans to support the most important physiological functions of the human body. The aim was to study the dynamics of macronutrients in the process of short-term germination of flax seeds by chemical and spectroscopic methods. Flax seeds were germinated in laboratory conditions in special trays at a temperature of 18–20 °C for 5 days with perio-

dic moistening. Visual changes occurring in flax seeds at all stages of short-term germination are demonstrated. The periodicity of changes in the main macronutrients of flax seeds is shown. It is concluded that, during the studied period of germination, the principal hydrolytic decomposition of seed storage proteins was incomplete, leading to a permanent decrease, first of all, in the content of proteins and protein nitrogen. Based on the changes in the lipid content and acid number, the intensity of the peaks associated with functional groups in the lipid region, in particular, the band at 1748 cm^{-1} assigned to stretching vibrations of C=O groups of fatty acids, no degradation of storage lipids at an early stage of germination was assumed. The accumulation of soluble substances during the studied germination period is demonstrated, including water-soluble protein compounds, as well as water-soluble polysaccharides and products of their hydrolytic degradation. Sprouted flax seeds are a valuable ingredient for producing healthy foods.

Keywords: flax seeds, proteins, macronutrients, unsaturated fatty acids, short-term germination, IR spectroscopy, limited hydrolysis

For citation: Minevich IE, Nechiporenko AP, Goncharova AA, Sitnikova VE. Dynamics of macronutrients during short-term germination of flax seeds. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(3):449–459. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-449-459>

ВВЕДЕНИЕ

Использование биологически активного растительного сырья для создания продуктов здорового питания является в последние годы одним из трендов коррекции пищевого статуса населения. Значимость этого направления как фактора профилактики алиментарно-зависимых заболеваний подтверждена в «Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года», (утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 29.06.2016 г. № 1364-р). Под термином «здоровое питание», в соответствии с Федеральным законом № 29, понимается питание, обеспечивающее рост, нормальное развитие и жизнедеятельность человека, отвечающее требованиям безопасности¹.

Исходя из принятого определения, пищевые продукты стали рассматривать как эффективное средство поддержания физического и психического здоровья, профилактики многих заболеваний. Большое значение для расширения ассортимента продуктов здорового питания имеет выбор сырья.

Для максимальной реализации потенциала растительного сырья широко используют биологические методы, которые условно можно разделить на три группы по способу модификации сырья:

- под действием микрофлоры;
- под действием внесенных извне ферментных препаратов;
- под действием собственных ферментных, преимущественно катаболических, систем [1].

В частности, биоактивация семян (зерна) проращиванием позволяет активизировать их ферментную систему. В результате протекания биохимических процессов в семенах происходит увеличение водорастворимых белковых фрак-

ций, накопление свободных аминокислот и жирных кислот, а также легкорастворимых редуцирующих сахаров, что приводит к повышению пищевой ценности сырья и улучшению функциональных свойств заключенного в нем белка [2–6]. Проращивание приводит также к деградации антиалиментарных факторов – α -галактозидных олигосахаридов, ингибиторов панкреатических протеиназ и липазы, фитогемагглютининов, таннидов, фитатов, цианогенных гликозидов [1, 6–10]. Ферментативная модификация семян и зерна способствует повышению их биологической активности за счет появления продуктов гидролитического распада биополимеров (белков, углеводов) – физиологически активных пептидов, моно- и олигосахаридов, нуклеотидов и пр. – потенциальных экзорегуляторов метаболизма. Например, олигосахариды оказывают регулирующее действие на микрофлору, многие из них являются бифидогенными факторами [11]. Так, пророщенные семена сои характеризуются улучшенными органолептическими свойствами: запахом и вкусом, в них определено значительное увеличение содержания сапонина, эстрогенных соединений и почти всех фитостероинов, особенно бета-ситостерина [6].

Изучение физиологических и протеомных изменений в зародыше и эндосперме во время прорастания семян позволило авторам работы [12] выявить сложные метаболические сети, участвующие в прорастании семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.). Было установлено, что наибольшие протеомные изменения происходили в зародыше через 24 ч после набухания семян. Полученные данные позволяют по-новому взглянуть на молекулярные механизмы прорастания семян.

Была показана роль эндосперма в поддержке роста зародыша: он снабжает его питательными веществами, защищает зародыш и контролирует

¹О качестве и безопасности пищевых продуктов: федер. закон РФ от 02.01.2000 г. № 29-ФЗ (ред. от 13.07.2020 г.)

рост зародыша, действует как механический барьер во время развития и прорастания семян. Его структура и функция в зрелых сухих семенах различны и специфичны для разных видов культур [13]. Последние достижения в биологии семян показали, что эндосперм способен воспринимать сигналы окружающей среды, а также производить и секретировать сигналы, регулирующие рост зародыша. Таким образом, прорастание – системная реакция, включающая двуправленные взаимодействия между зародышем и эндоспермом.

Несмотря на исследования и значимые результаты в области биохимии прорастания семян, научный и практический интерес к этим процессам не ослабевает. В настоящее время на основе пророщенных зерновых культур в промышленности выпускаются хлопья, сухие завтраки, различные виды хлеба и мучных кондитерских изделий повышенной пищевой ценности. Расширяется ассортимент сырья, пищевую и биологическую ценность которого повышают путем проращивания. При этом практическое значение имеет определение продолжительности процесса, при котором конкретное сырье обладает повышенной биологической активностью за счет накопления продуктов гидролитического расщепления биополимеров. В связи с этим актуальны исследования динамики макронутриентов конкретного сырья в процессе проращивания.

Перспективным сырьем для биоактивации путем проращивания являются семена льна. Семена льна являются источником основных функциональных пищевых ингредиентов и биологически активных веществ, оказывающих благотворное влияние на организм человека. Они богаты эссенциальными полиненасыщенными жирными кислотами, пищевыми волокнами, полноценным белком, полипептидами и лигнанами, относящимся к классу фитоэстрогенов, которые поддерживают важнейшие физиологические функции организма человека [14, 15]. В настоящее время их используют в качестве функционального ингредиента для корректировки химического состава и пищевой ценности продуктов [16–18].

Цель работы состояла в исследовании динамики макронутриентов в процессе кратковременного проращивания семян льна химическими и спектроскопическими методами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования в данной работе являлись семена льна масличного (*Linum usitatissimum* L.) 2018 года производства. Пророщенные семена льна имели следующие характеристики: содержание, %: белка – 21,77; жира – 42,96; влаги – 3,65; зольность – 4,25%.

Определение параметров семян льна проводили на базе лаборатории переработки лубяных культур Федерального научного центра лубяных культур перед проведением проращивания.

Проращивание семян льна проводили в лабораторных условиях в специальных поддонах при температуре 18–20 °С при соотношении вода : семена 2 : 1. Семена проращивали в течение 5 суток при периодическом увлажнении.

Проросшие семена льна имели проростки длиной от 2 до 5 мм. Процесс проращивания семян прекращали сушкой до влажности семян не более 5%. Отбор проб пророщенных семян проводили каждые сутки. Продукты хранили при температуре 4 °С.

В работе определяли: кислотное число (ГОСТ 31700-2012), масличность (ГОСТ 10857-64), содержание белка (ГОСТ 10846-91), влажность (ГОСТ 10856-96), зольность (ГОСТ 10847-2019).

Фракционный состав белкового комплекса исходных и пророщенных семян льна определяли по методу Ермакова²: последовательной экстракцией дистиллированной водой, 7%-м раствором NaCl и 0,1 М раствором NaOH. Осаждение белков производили 5%-м раствором CCL₃COOH.

Колебательные спектры образцов (32 скана) получали методом ИК-спектроскопии НПВО (нарушенного полного внутреннего отражения) на спектрометре Tensor 37 (Bruker, Германия) с алмазным НПВО-элементом, управляемым программным пакетом OPUS со стандартными градуировочными возможностями, в диапазоне частот 4000–600 см⁻¹ в формате поглощения.

Белокполисахаридные комплексы (БПС) получали путем проведения водной экстракции измельченных семян льна (исходных и пророщенных) при следующих условиях: гидромодуль – 15; температура, T – 50 °С; продолжительность – 1 ч. Из экстракта БПС комплексы выделяли осаждением трехкратным избытком изопропилового спирта. Полисахаридные (ПС) комплексы получали путем проведения водной экстракции цельных семян льна (исходных и пророщенных) аналогично БПС. Целевые продукты сушили в микроволновой печи LG Intellrowave (MS-1724U) при мощности печи 500 Вт в течение 1–3 мин.

Анализы проводили в 3-кратной повторности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно проведенным на сегодняшний день исследованиям представляется, что прорастание семян в общем виде запускается двумя основными процессами – активизацией метаболического аппарата и началом обмена веществ в результате поступления в семя воды. При увлажнении семян сразу же начинается их набухание, затем происходит активизация и синтез

²Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П. Методы биохимического исследования растений. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Агропромиздат, 1987. 430 с.

ферментов, определяющих начало гидролитических процессов. Эти и другие процессы (увеличение содержания осмотически активных веществ, подкисление оболочек клеток и др.) создают предпосылки для начала роста зародыша. На следующем этапе начинается рост зародышевых осей и выход корешка. При этом сначала используются собственные питательные вещества, а затем происходит мобилизация питательных веществ запасяющих органов (семядолей или эндосперма).

Визуальные изменения, происходящие в процессе кратковременного проращивания семян льна, представлены на рис. 1. Активное поглощение воды, набухание коллоидов, создание высокого осмотического давления внутри клеток, которое обусловлено растворимыми внутриклеточными веществами, приводит к увеличению объема семени. В среднем объем набухшего семени в 1,5 раза больше исходного. За 5 суток семена льна прошли все начальные этапы прорастания – от набухания до роста проростков.

Благодаря высокой влажности некоторые вещества семени (углеводы – сахара, пентозаны; азотистые и минеральные вещества) переходят в растворимое состояние и частично диффундируют в воду. Это способствует оживлению зародыша, который для своей жизнедеятельности начинает активно использовать по-

явившиеся растворимые и легко усваиваемые питательные вещества. Активирующиеся гидролитические ферменты диффундируют в эндосперм, где начинают катализировать гидролиз части высокомолекулярных веществ и превращают их в растворимые соединения. С поглощением воды зародыш начинает потреблять накопленные в нем сахара и свободные аминокислоты еще до того, как соответствующие ферменты поступят в эндосперм и путем гидролиза дадут новые порции питательных веществ зародышу. Этим можно объяснить периодичность изменений показателей семян льна.

В табл. 1 представлены характеристики прорастающих семян льна, которые определяли каждые сутки.

Все изменения в семенах льна свидетельствуют о периодичности происходящих процессов в прорастающих семенах. В результате резкого повышения влажности (с 3,8 до 51,3%) запускаются процессы гидролиза азотистых соединений, особенно белков, до свободных аминокислот, которые затем расходуются на создание новых белковых соединений. Этим можно объяснить колебания показателя содержания общего азота при проращивании семян льна в первые пять суток. На каждой стадии прорастания протекают процессы, связанные с изменением состава и состояния питательных веществ в семени.



Рис. 1. Семена льна при кратковременном проращивании

Fig. 1. Flax seed during short-time germination

Таблица 1. Характеристика семян льна в процессе проращивания

Table 1. Characteristics of flax seeds during germination

Наименование образца	Продолжительность проращивания, сут.	Показатель				
		Общий азот, N, %	Сырой протеин, N*6,25, %	Масличность, %	Кислотное число, мг КОН на 1 г масла	Влажность, %
Исходные семена	0	3,48±0,17	21,77±1,09	42,96±2,15	3,14±0,16	3,80±0,19
ПР1	1	3,70±0,18	22,72±1,14	42,30±2,11	3,05±0,15	51,30±2,56
ПР2	2	4,57±0,23	28,56±1,43	32,00±1,60	3,26±0,16	54,10±2,71
ПР3	3	3,47±0,17	21,69±1,08	46,05±2,30	3,29±0,16	52,90±2,65
ПР4	4	4,28±0,21	26,75±1,34	29,82±1,49	3,26±0,16	57,27±2,86
ПР5	5	3,61±0,18	22,55±1,13	40,45±2,02	3,15±0,16	54,00±2,70

Содержание жира и значения кислотного числа также подвержены колебаниям в исследуемом временном интервале проращивания (см. табл. 1). Распад жиров, в отличие от протеолиза белков, является более сложным многостадийным процессом [19]. При проращивании масличных семян основным обменным процессом считается превращение липидов в сахара: протекает гидролиз триглицеридов с образованием свободных жирных кислот и глицерина, который через последовательность реакций гликолиза превращается в сахара. Однако на ранних стадиях проращивания липиды не подвергаются расщеплению, так как участвуют в других метаболических процессах [2]. Непосредственно расщепление запасного жира начинается после 4-х дней проращивания, а после 8-ми дней происходит максимальное его расходование³ [2, 19].

Анализ полученных нами результатов свидетельствует, что кислотное число в своем максимальном значении (на 3-й день проращивания) повышалось незначительно, на 4,78% (см. табл. 1). В этом случае повышение кислотного числа обусловлено, вероятно, гидролитическими процессами, протекающими в зародыше. Максимальное снижение масличности на 30,59% на 4-й день проращивания коррелировало с механизмом проращивания, описанным А.Б. Дьяковым [19]. Следует отметить, что биологическая ценность липидов в процессе кратковременного проращивания семян остается неизменной. Об этом свидетельствуют данные авторов работ [5, 20, 21], которые показали, что жирнокислотный профиль семян льна не изменялся в интервале 1, 4 и 8 суток проращивания.

На рис. 2 и 3 представлены ИК-спектры пророщенных семян льна и фрагменты протеиновой и углеводной областей этих ИК-спектров (обозначение образцов приведено в соответствии с указанными в табл. 1).

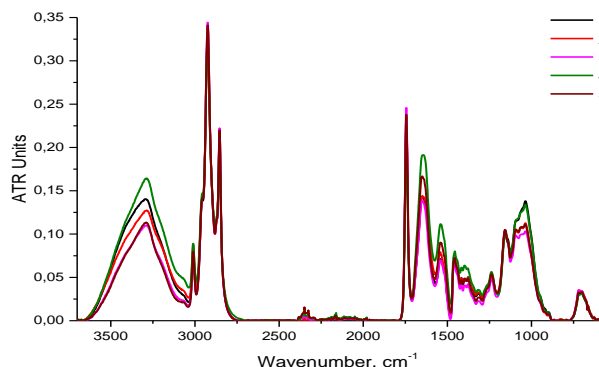


Рис. 2. ИК спектры пророщенных семян льна: 1 – ПР1; 2 – ПР2; 3 – ПР3; 4 – ПР4; 5 – ПР5

Fig. 2. IR spectra of germinated flax seeds: 1 – ПР1; 2 – ПР2; 3 – ПР3; 4 – ПР4; 5 – ПР5

Структурированные полосы в белковой ($1700\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$) и углеводных областях ($1150\text{--}1030\text{ cm}^{-1}$) свидетельствуют, предположительно, о соединениях с разной длиной цепи, образующихся в результате гидролиза прежде всего белков, полипептидов и полисахаридов. Особенно выделяется структурированность в углеводной области, что, вероятно, можно объяснить разнообразием поли- и олигосахаридных структур. Интенсивные полосы в области $2950\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ обязаны проявлению валентных асимметричных и симметричных колебаний CH_2 -групп преимущественно липидных и полисахаридных структур. Интенсивная полоса 1748 cm^{-1} валентных колебаний C=O -групп жирных кислот также подтверждает наличие значительного количества липидных компонентов. Присутствие полос 3008 и 722 cm^{-1} , характерных соответственно для валентных и деформационных колебаний CH -групп при двойной связи CH=CH , свидетельствует о наличии в составе липидных компонентов ненасыщенных жирных кислот.

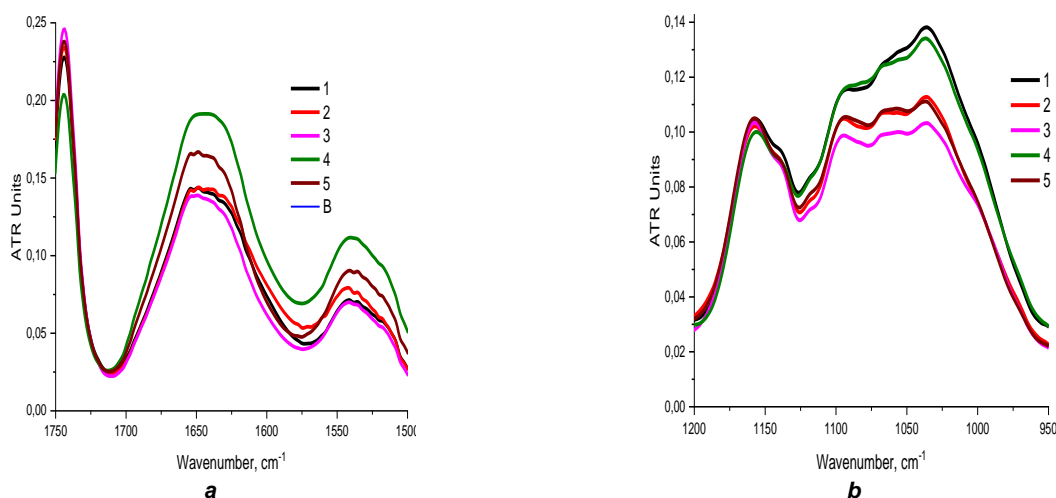


Рис. 3. Фрагменты протеиновой (а) и углеводной областей (б) ИК-спектров, представленных на рис. 2

Fig. 3. Fragments of the protein (a) and carbohydrate regions (b) of the IR spectra in Fig. 2

Таким образом, на представленных ИК-спектрах исследуемых семян льна (рис. 2 и 3) хорошо видны изменения расположения, интенсивности и формы полос основных функциональных групп, характеризующих белковый, углеводный и липидный комплексы.

Периодичность происходящих процессов отражается на изменении интенсивности пиков основных полос функциональных групп в зависимости от продолжительности проращивания, которые представлены на рис. 4. Интенсивно протекают процессы расщепления белковых и полисахаридных веществ. Периодичность в изменении интенсивности полос ИК-спектров функциональных групп белков, углеводов и общих липидов в общем коррелирует с данными химического анализа (см. таб. 1).

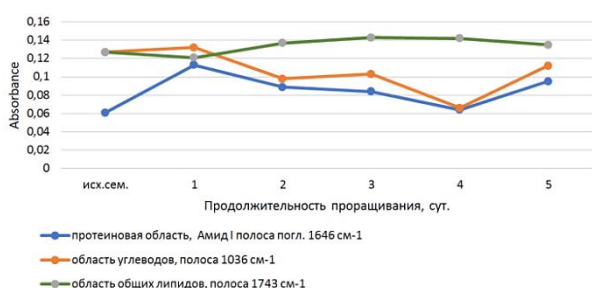


Рис. 4. Изменение интенсивности пиков основных полос, характеризующих функциональные группы белков, углеводов и липидов

Fig. 4. Change in the peaks intensity of the main bands characterizing the functional groups of proteins, carbohydrates and lipids

Набухание, гидролитические процессы, протекающие на стадиях проращивания, способствуют увеличению водорастворимых веществ, о содержании которых судили по результатам проведения водной экстракции исследуемых семян льна. Изменение сухого остатка водного экстракта в процессе проращивания семян льна представлено на рис. 5.

Как следует из полученных данных, резкого повышения количества водорастворимых веществ не наблюдается, идет плавное повышение с незначительными колебаниями. На 3-и сутки проращивания было определено максимальное количество

водорастворимых веществ в экстракте в исследуемом периоде времени.

Из водных экстрактов измельченных семян избытком изопропилового спирта осаждали белкополисахаридные комплексы (БПС). Результаты определения выхода и содержания в них белка представлены в табл. 2. Изменение содержания белка в комплексах БПС свидетельствует, что с увеличением продолжительности проращивания повышалось количество водорастворимых белковых веществ. При этом содержание водорастворимых белков в БПС возросло с 36,28 до 59,00% на 3-и сутки проращивания и до 65,50% – на 5-ые сутки проращивания.

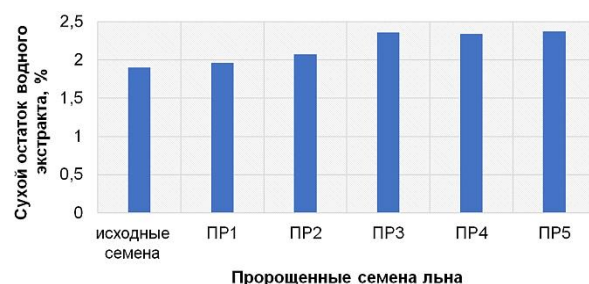


Рис. 5. Сухой остаток водных экстрактов семян льна при различных сроках проращивания, сут.: ПР1 – 1; ПР2 – 2; ПР3 – 3; ПР4 – 4; ПР5 – 5

Fig. 5. Dry residue of water extracts of flax seeds at different periods of germination, day: ПР1 – 1; ПР2 – 2; ПР3 – 3; ПР4 – 4; ПР5 – 5

Об изменении различных форм азотистых соединений в процессе проращивания семян льна судили по содержанию небелкового азота (рис. 6). Колебания в содержании небелкового азота позволяют предположить синтез аминокислот за счет гидролиза белков и активное потребление азотистых веществ зародышем.

В мобилизации белковых резервов участвуют многочисленные ферментные системы, различающиеся по специфичности к субстрату. При ограниченном протеолизе запасных белков от них отщепляется небольшое число низкомолекулярных пептидов, после чего белки становятся доступны действию протеаз [22, 23]. При этом

Таблица 2. Характеристика белкополисахаридных комплексов

Table 2. Characterization of protein-polysaccharide complexes

Продолжительность проращивания, сут.	Образец БПС	Выход БПС комплекса, %	Содержание белка в БПС комплексе, %
0	БПС 0	11,55±0,58	36,28±1,81
1	БПС 1	14,72±0,74	54,08±2,70
2	БПС 2	16,52±0,83	55,07±2,75
3	БПС 3	19,58±0,98	59,09±2,95
4	БПС 4	14,97±0,75	54,87±2,74
5	БПС 5	15,80±0,79	65,50±3,27

³Щербаков В.Г., Лобанов В.Г., Прудникова Т.Н., Федорова С.А. Биохимия растительного сырья: учебник для студентов вузов. М.: Колос, 1999. 376 с.



Рис. 6. Динамика общего и небелкового азота в семенах льна в процессе прорастания

Fig. 6. Dynamics of total and non-protein nitrogen in flax seeds during germination

считается, что ограниченный протеолиз протекает под действием SH-зависимой кислой эндопептидазы. Последующая гидролитическая фаза протекает при быстром росте проростка. К этому времени начинается активная мобилизация белков в запасующих органах семян и энергичный переток азотистых соединений из семядолей или других запасующих органов к растущим осевым частям. В ходе прорастания семян запасные белки распадаются до низкомолекулярных пептидов и аминокислот. Их соотношение определяется активностью различных ферментов и скоростью оттока продуктов гидролиза из запасующих тканей [23].

Исходя из анализа полученных данных, можно предположить, что в исследуемом интервале прорастания семян льна на фоне образования новых белков, сопровождающих рост проростков, не виден гидролитический распад белков, характеризующийся продолжительным (безвозвратным) снижением содержания белков и белкового азота. Соотношение белковых фракций в этот исследуемый период прорастания изменялось, как это показано на рис. 7.

Исходные семена характеризовались преобладающим содержанием глобулинов, и уже в первые сутки прорастания эта солерастворимая белковая фракция резко увеличивалась, а при всех колебаниях была наибольшей по сравнению с другими фракциями в исследуемый период. На рис. 8 представлены ИК-спектры белковых фракций пророщенных семян.

Протеиновые фракции пророщенных семян льна выделяли из растворов трихлоруксусной кислотой (ТХУК), которая является специфическим реагентом на белки. ТХУК необратимо осаждает белки, оставляя в растворе продукты их деградации – полипептиды.

Во всех белковых фракциях помимо основных классических полос Амид I и Амид II присутствуют полосы, соответствующие липидным и углеводным фрагментам. Классические дуплеты Амид I и Амид II в протеиновой области ИК-спектров ($1700\text{--}1500\text{ см}^{-1}$) у белковых фракций

пророщенных семян отличаются различной интенсивностью. В составе белковых фракций присутствуют различные липидные, поли- и олигосахаридные фрагменты: область $2950\text{--}2850$; 1748 ; $1300\text{--}1030\text{ см}^{-1}$. При этом спектр щелочерастворимой фракции отличается интенсивностью и формой полос.

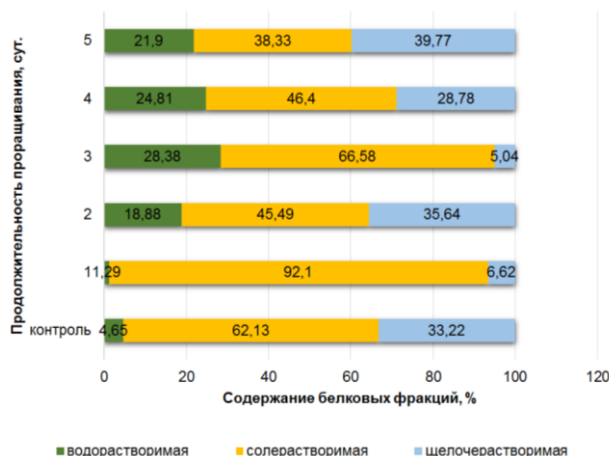


Рис. 7. Изменение фракционного состава белкового комплекса семян льна на ранних стадиях прорастания

Fig. 7. Changes in the fractional composition of the protein complex of flax seeds at the early stages of germination

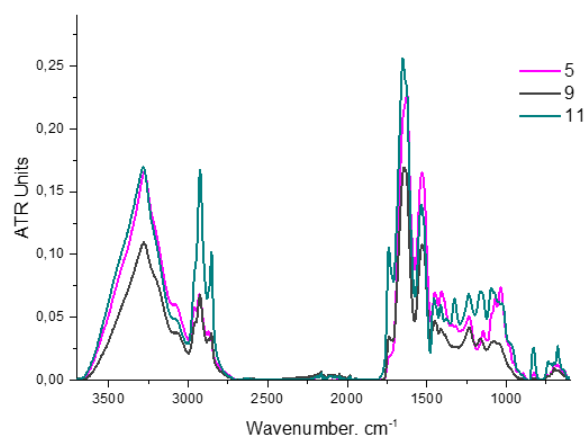


Рис. 8. ИК-спектры белковых фракций пророщенных семян льна:

5 – водорастворимая; 9 – солерастворимая; 11 – щелочерастворимая

Fig. 8. IR spectra of protein fractions of germinated flax seeds:

5 – water-soluble fraction; 9 – salt-soluble fraction; 11 – alkali-soluble fraction

С целью изучения изменений в полисахаридном составе семян льна в процессе прорастания определяли сумму полисахаридов (СумПС) и содержание в них высокомолекулярной фракции (ВМфр). Результаты исследований представлены в табл. 3. Полисахариды выделяли из водных экстрактов неразрушенных цельных семян льна (исходных и пророщенных) осаждением избытком изопропилового спирта.

Таблица 3. Сумма полисахаридов и содержание высокомолекулярной фракции относительно суммы полисахаридов в исходных и пророщенных семенах льна

Table 3. Polysaccharides sum and the content of the high molecular weight fraction relative to the polysaccharides sum in the original and germinated flax seeds

Продолжительность проращивания, сут.	Сухой остаток водного экстракта*, %	СумПС, %	ВМфр, %
Контроль	1,18±0,06	2,95±0,15	55,50±2,77
2	1,35±0,07	5,07±0,25	64,37±3,22
3	1,44±0,07	6,30±0,31	64,81±3,24
4	1,49±0,07	7,90±0,40	47,83±2,39
5	1,80±0,09	9,18±0,46	41,97±2,10

*Водный экстракт цельных (неизмельченных) семян.

С увеличением продолжительности проращивания протекают гидролитические процессы, способствующие повышению содержания водорастворимых веществ, в том числе сахаров, за счет расщепления полисахаридов и снижения количества высокомолекулярной фракции в составе полисахаридов. Так, содержание водорастворимых веществ к концу исследуемого временного периода увеличилось на 52,5% (по сухому остатку водного экстракта). Исходя из данных, представленных в табл. 3, можно предположить, что активное расщепление полисахаридов начинается на 4-й день прорастания и в результате этого процесса к концу исследуемого временного интервала содержание высокомолекулярной фракции в них снижалось на 24,4%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование биохимического состава семян льна в процессе кратковременного проращивания, проведенное спектральными и стандартными химическими методами, показало периодичность в изменениях соотношения основных макронутриентов семян льна. По результатам проведенной работы сделаны также следующие выводы:

– совокупность данных по изменению общего содержания белка, белкового азота, белковых фракций позволяет предположить, что в исследуемый период проращивания основной гидролитический распад запасных белков, приводящий к безвозвратному снижению, прежде всего, содержания белков и белкового азота, не происходит или не заметен на фоне появления новых

белков у растущих проростков;

– изменения таких показателей, как содержание жира и кислотного числа, интенсивности пиков функциональных групп в области липидов, свидетельствуют об отсутствии на раннем этапе проращивания расщепления запасных липидов, что коррелирует с данными отечественных исследований;

– повышение экстрактивных веществ в водных растворах семян льна как цельных, так и измельченных указывает на накопление растворимых веществ;

– о повышении водорастворимых белковых соединений свидетельствуют данные по преобладанию водо- и солерастворимых белковых фракций, а также увеличение содержания белка в водорастворимых белополисахаридных (БПС) комплексах;

– анализ углеводной области ИК-спектров пророщенных семян льна, а также увеличение суммы водорастворимых полисахаридов и снижение в них высокомолекулярной фракции свидетельствуют об активном протекании гидролитического расщепления полисахаридов.

Таким образом, семена льна на раннем этапе проращивания содержат набор биологически активных веществ, обеспечивающий выход и прорастание проростка. Такие семена являются ценным ингредиентом для создания продуктов здорового питания с повышенным содержанием хорошо растворимых белков, свободных аминокислот и жирных кислот. Наличие указанных активных компонентов повышает питательную ценность и усвояемость целевой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браудо Е.Е., Даниленко А.Н., Дианова В.Т., Кроха Н.Г. Альтернативные подходы к получению растительных белковых продуктов В сб. ст.: Растительный белок: новые перспективы / под ред. Е.Е. Браудо. М.: Пищепромиздат, 2000. С. 6–23.
2. Самофалова Л.А., Симоненкова А.П., Сафронова О.В. Исследование структурообразования в экстрактах из прорастающих масличных семян по изменению функциональных свойств липидного комплекса // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. N 4. С. 120–122.
3. Чумикина Л.В., Арабова Л.И., Мартынова И.В., Колпакова В.В. Изменение белкового ком-

плекса семян тритикале при прорастании // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2005. N 2-3. С. 51–54.

4. Казёнова Н.К., Шнейдер Д.В., Казёнов И.В. Изменение химического состава зерновых продуктов при проращивании // Хлебопродукты. 2013. N 10. С. 55–57.

5. Velleneuve S., Power K.A., Guévremont E., Mondor M., Tsao R., Wanasundara J.P.D., et al. Effect of a shot-time germination process on the nutrient composition, microbial counts and bread-making potential of whole flaxseed // Journal of Food Processing and Preservation. 2014. Vol. 39. Issue 6. P. 1574–

1586. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12385>

6. Bau H.M., Villaume C., Méjean L. Effects of soybean (*Glycine max*) germination on biologically active components, nutritional values of seeds, and biological characteristics in rats // *Nahrung*. 2000. Vol. 44. Issue 1. P. 2–6. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3803\(20000101\)44:1<2::AID-FOOD2>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3803(20000101)44:1<2::AID-FOOD2>3.0.CO;2-9)

7. Pimenta A.V., Verediano T.A., Carneiro J.C.S., Costa N.M.B., Costa A.G.V. Bioaccessibility and bioavailability of calcium in sprouted brown and golden flaxseed // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 101. Issue 7. P. 2788–2798. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10908>

8. Kajla P., Sharma A., Sood D.R. Effect of germination on proximate principles, minerals and antinutrients of flaxseeds // *Asian Journal of Dairy and Food Research*. 2017. Vol. 36. Issue 1. 52–57. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.v36i01.7459>

9. Сафронова О.В., Самофалова Л.А., Бобков С.В. Биологическая модификация семян сои и получение целевых напитков // *Вестник ВГУИТ*. 2013. N 2. С. 195–199. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2013-2-195-199>

10. Доценко С.М., Бирик И.В., Любимова О.И., Гужель Ю.А. Кинетика биохимического процесса прорастания семян сои // *Вестник КрасГАУ*. 2016. N 1 (112). С. 66–74.

11. Сычев И.А., Калинкина О.В., Лаксаева Е.А. Биологическая активность растительных полисахаридов // *Российский медико-биологический вестник им. акад. И.П. Павлова*. 2009. Т. 17. N 4. С. 143–148.

12. Liu Y., Han C., Deng X., Liu D., Liu N., Yan Y. Integrated physiology and proteome analysis of embryo and endosperm highlights complex metabolic networks involved in seed germination in wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Journal of Plant Physiology*. 2018. Vol. 229. P. 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.06.011>

13. Yan D., Duermeier L., Leoveanu C., Nambara E. The functions of the endosperm during seed germination // *Plant and Cell Physiology*. 2014. Vol. 55. Issue 9. P. 1521–1533. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcu089>

14. Goyal A., Sharma V., Upadhyay N., Gill S.,

Sihag M. Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food // *Journal of Food Science and Technology*. 2014. Vol. 51. Issue 9. P. 1633–1653. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1247-9>

15. Gutte K.B., Sahoo A.K., Ranveer R.C. Bioactive Components of Flaxseed and its Health Benefits // *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*. 2015. Vol. 31. Issue 1. P. 42–51.

16. Parikh M., Maddaford T.G., Austria J.A., Aliani M., Natticadan T., Pierce G.N. Dietary flaxseed as a strategy for improving human health // *Nutrients*. 2019. Vol. 11. Issue 5. P. 1171. <https://doi.org/10.3390/nu11051171>

17. Миневич И.Э. Функциональная значимость семян льна и практика их использования в пищевых технологиях // *Health, Food & Biotechnology*. 2019. Т. 1. N 2. С. 97–120. <https://doi.org/10.36107/hfb.2019.i2.s224>

18. Kajla P., Sharma A., Sood D.R. Flaxseed-a potential functional food source // *Journal of Food Science and Technology*. 2015. Vol. 52. Issue 4. P. 1857–1871. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1293-y>

19. Дьяков А.Б. Физиология и экология льна: монография. Краснодар: Изд-во ВНИИМК, 2006. 214 с.

20. Herchi W., Bahashwan S., Sebei K., Ben Saleh H., Kallel H., Boukhchina S. Effects of germination on chemical composition and antioxidant activity of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil // *Grasas y Aceites*. 2015. Vol. 66. Issue 1. P. e057. <https://doi.org/10.3989/gya.0463141>

21. Wanasundara P.K.J.P.D., Wanasundara U.N., Shahidi F. Changes in flax (*Linum usitatissimum* L.) seed lipids during germination // *Journal of The American Oil Chemists Society*. 1999. Vol. 76. P. 41–48.

22. Bewley J.D. Seed germination and dormancy // *The Plant Cell*. 1997. Vol. 9. Issue 7. P. 1055–1066. <https://doi.org/10.1105/tpc.9.7.1055>

23. Awatif SA, Elozeiri AA. Metabolic processes during seed germination. In: Jimenes-Lopez JC (ed.) *Advances in Seed Biology*. UK: IntechOpen; 2017. P. 141–166. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70653>

REFERENCES

1. Braudo EE, Danilenko AN, Dianova VT, Krokhina NG Alternative approaches to obtaining plant protein products. In: Braudo EE (ed.) *Vegetable protein: new perspectives*. Moscow: Pishchepromizdat; 2000. P. 6–23. (In Russian)

2. Samofalova LA, Simonenkova AP, Safronova OV. Investigation of structure formation in extracts from germinating oil seeds by changing the functional properties of the lipid complex. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Technological University*. 2017;20(4):120–122. (In Russian)

3. Chumikina LV, Arabova LI, Martynova IV, Kolpakova VV. Changes in the protein complex of triticale seeds during germination. *Izvestiya vysshikh*

uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya = News of institutes of higher education. Food Technology. 2005;2-3:51–54. (In Russian)

4. Kazennova NK, Shneider DV, Kazennov IV. Changes in the chemical composition of grain products during germination. *Khleboпродукты*. 2013;10:55–57. (In Russian)

5. Velleneuve S, Power KA, Guévremont E, Mondor M, Tsao R, Wanasundara JPD, et al. Effect of a short-time germination process on the nutrient composition, microbial counts and bread-making potential of whole flaxseed. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2014;39(6):1574–1586. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12385>

6. Bau HM, Villaume C, Méjean L. Effects of soybean (*Glycine max*) germination on biologically active components, nutritional values of seeds, and biological characteristics in rats. *Nahrung*. 2000;44(1):2–6. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3803\(20000101\)44:1<2::AID-FOOD2>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3803(20000101)44:1<2::AID-FOOD2>3.0.CO;2-9)
7. Pimenta AV, Verediano TA, Carneiro JCS, Costa NMB, Costa AGV. Bioaccessibility and bioavailability of calcium in sprouted brown and golden flaxseed. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;101(7):2788–2798. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10908>
8. Kajla P, Sharma A, Sood DR. Effect of germination on proximate principles, minerals and antinutrients of flaxseeds. *Asian Journal of Dairy and Food Research*. 2017;36(1):52–57. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.v36i01.7459>
9. Safronova OV, Samofalova LA, Bobkov SV. Biological modification of soybean seeds and obtaining targeted drinks. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii = Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2013;2:195–199. (In Russian) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2013-2-195-199>
10. Dotsenko SM, Bibik IV, Lyubimova OI, Guzhel' YA. Kinetics of biochemical processes of germination of soybean seeds. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = The Bulletin of KrasGAU*. 2016;1:66–74. (In Russian)
11. Sytchev IA, Kalinkina OV, Lacksaeva EA. Biological activity of the vegetable polysaccharides. *Rossiiskii mediko-biologicheskii vestnik im. akad. I.P. Pavlova = I.P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*. 2009;17(4):143–148. (In Russian)
12. Liu Y, Han C, Deng X, Liu D, Liu N, Yan Y. Integrated physiology and proteome analysis of embryo and endosperm highlights complex metabolic networks involved in seed germination in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Physiology*. 2018;229:63–76. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.06.011>
13. Yan D, Duermeyer L, Leoveanu C, Nambara E. The functions of the endosperm during seed germination. *Plant and Cell Physiology*. 2014;55(9):1521–1533. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcu089>
14. Goyal A, Sharma V, Upadhyay N, Gill S, Sihag M. Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food. *Journal of Food Science and Technology*. 2014;51(9):1633–1653. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1247-9>
15. Gutte KB, Sahoo AK, Ranveer RC. Bioactive Components of Flaxseed and its Health Benefit. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*. 2015;31(1):42–51.
16. Parikh M, Maddaford TG, Austria JA, Aliani M, Natticadan T, Pierce GN. Dietary flaxseed as a strategy for improving human health. *Nutrients*. 2019;11(5):1171. <https://doi.org/10.3390/nu11051171>
17. Minevich IE. Functional significance of flax seeds and practice of their use in food technologies. *Health, Food & Biotechnology*. 2019;1(2):97–120. (In Russian) <https://doi.org/10.36107/hfb.2019.i2.s224>
18. Kajla P, Sharma A, Sood DR. Flaxseed-a potential functional food source. *Journal of Food Science and Technology*. 2015;52(4):1857–1871. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1293-y>
19. D'yakov AB. *Flax physiology and ecology*. Krasnodar: Izdatel'stvo VNIIMK; 2006. 214 p. (In Russian)
20. Herchi W, Bahashwan S, Sebei K, Ben Saleh H, Kallel H, Boukhchina S. Effects of germination on chemical composition and antioxidant activity of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil. *Grasas y Aceites*. 2015;66(1):e057. <https://doi.org/10.3989/gya.0463141>
21. Wanasundara PKJPD, Wanasundara UN, Shahidi F. Changes in flax (*Linum usitatissimum* L.) seed lipids during germination. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1999;76:41–48.
22. Bewley JD. Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*. 1997;9(7):1055–1066. <https://doi.org/10.1105/tpc.9.7.1055>
23. Awatif SA, Elozeiri AA. Metabolic processes during seed germination. In: Jimenes-Lopez JC (ed.) *Advances in Seed Biology*. UK: IntechOpen. 2017. P. 141–166. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70653>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Миневич Ирина Эдуардовна,
к.т.н., ведущий научный сотрудник,
Федеральный научный центр лубяных культур,
170041, г. Тверь, Комсомольский пр-т, 17/56,
Российская Федерация,
✉ e-mail: irina_minevich@mail.ru

Нечипоренко Алла Павловна,
д.х.н., профессор,
Национальный исследовательский
университет информационных технологий,
механики и оптики,
197101, г. Санкт-Петербург,
Кронверкский пр-т, 49,

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina E. Minevich,
Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher,
Federal Scientific Center for Fiber Crops,
17/56, Komsomolskii Ave., Tver, 170041,
Russian Federation,
✉ e-mail: irina_minevich@mail.ru

Alla P. Nechiporenko,
Dr. Sci. (Chemistry), Professor,
National Research University of Information
Technologies, Mechanics and Optics,
49, Kronverkskii Ave., St. Petersburg, 197101,
Russian Federation,
e-mail: allanech2512@yandex.ru

Российская Федерация,
e-mail: allanech2512@yandex.ru

Гончарова Агата Анатольевна

младший научный сотрудник,
Федеральный научный центр лубяных культур,
170041, г. Тверь, Комсомольский пр-т, 17/56,
Российская Федерация,
e-mail: a.goncharova@fncl.k.ru

Ситникова Вера Евгеньевна,

к.х.н., старший преподаватель,
Национальный исследовательский
университет информационных технологий,
механики и оптики,
197101, г. Санкт-Петербург,
Кронверкский пр-т, 49,
Российская Федерация,
e-mail: kresenka@gmail.com

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили оконча-
тельный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 21.05.2021.
Одобрена после рецензирования 15.07.2021.
Принята к публикации 30.08.2021.*

Agatha A. Goncharova

Junior Researcher,
Federal Scientific Center for Fiber Crops,
17/56, Komsomolskii Ave., Tver, 170041,
Russian Federation,
e-mail: a.goncharova@fncl.k.ru

Vera E. Sitnikova,

Cand. Sci. (Chemistry), Senior Lecturer,
National research University of Information
Technologies, Mechanics and Optics,
49, Kronverkskii Ave., St. Petersburg, 197101,
Russian Federation,
e-mail: kresenka@gmail.com

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests re-
garding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

*The article was submitted 21.05.2021.
Approved after reviewing 15.07.2021.
Accepted for publication 30.08.2021.*