

Научная статья

УДК 544.2/544.7; 612.396.114:663:542

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-38-49>



## Самоагрегирующие свойства инулина в разбавленном растворе

Абубакр Саидкулович Насриддинов, Ашурбой Ильхомбойевич Ашуров,  
Шавкат Ёрович Холов, Икромджон Бомуродович Исмоилов,  
Сураё Рахматжоновна Усманова, Зайниддин Камарович Мухидинов

Институт химии им. В. И. Никитина Национальной академии наук Республики Таджикистан,  
г. Душанбе, Республика Таджикистан

Автор, ответственный за переписку: Мухидинов Зайниддин Камарович, [zainy@mail.ru](mailto:zainy@mail.ru)

**Аннотация.** Создание функциональных пищевых продуктов на основе инулинсодержащего растительного сырья позволит обеспечить население функциональным питанием диабетического характера. В связи с этим обоснование технологических параметров процесса получения инулина из клубней топинамбура (*Helianthus tuberosus* L.) путем определения его количественных характеристик является актуальным. В данной работе с целью обоснования технологических параметров процесса получения инулина из клубней топинамбура флэш-экстракционным и традиционным методами были установлены его качественные характеристики, а именно гидродинамические свойства и молекулярная масса в растворе. Результаты гидродинамических свойств и молекулярной массы образцов инулина топинамбура, полученные флэш-экстракционным методом при высокой температуре 105 °С за короткое и более длительное время, традиционным методом при температуре 75 °С в нейтральной среде, продемонстрировали самоагрегирующие свойства этого биополимера. Инулин, экстрагированный флэш-экстракционным способом, состоит из двух фракций: низкомолекулярного инулина и высокомолекулярного агрегата, который представляет собой комплекс полисахарида. Эти агрегаты могут формироваться как межмолекулярными, так и внутримолекулярными взаимодействиями различных фракций инулина в растворе. Как и следовало ожидать, их разделение невозможно обычными методами, при концентрировании на УФ-мембране формировался ряд субфракций, образовывалось большое количество агрегированного не растворимого в воде микрогеля. В то время как инулин, полученный традиционным способом, состоит из одной фракции, но имеет высокую степень полидисперсности. Показано, что для получения качественного инулина, предназначенного для пищевых и профилактических целей, предпочтительно использовать флэш-метод экстракции за короткое время.

**Ключевые слова:** топинамбур, инулин, флэш-экстракция, молекулярная масса, конформация, агрегация

**Для цитирования:** Насриддинов А. С., Ашуров А. И., Холов Ш. Ё., Исмоилов И. Б., Усманова С. Р., Мухидинов З. К. Самоагрегирующие свойства инулина в разбавленном растворе // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 1. С. 38–49. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-38-49>.

### PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

## Self-aggregating properties of inulin in a dilute solution

Abubakr S. Nasriddinov, Ashurboi I. Ashurov,  
Shavkat E. Kholov, Ikromdzhon B. Ismoilov,  
Surae R. Usmanova, Zainiddin K. Mukhidinov

V. I. Nikitin Institute of Chemistry, National Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan,  
Dushanbe, Republic of Tajikistan

Corresponding author: Zainiddin K. Mukhidinov, [zainy@mail.ru](mailto:zainy@mail.ru)

**Abstract.** The creation of functional food products based on inulin-containing vegetable raw materials can provide the population with functional diabetic nutrition. In this regard, investigation of the technological parameters of obtaining inulin from Jerusalem artichoke tubers (*Helianthus tuberosus* L.) and determination of its quantitative characteristics seem highly relevant. This study aims to determine the qualitative characteristics of inulin obtained from Jerusalem artichoke tubers by both flash extraction and conventional methods. Jerusalem artichoke inulin samples were obtained by the flash extraction method at a high temperature of 105 °C during both shorter and longer periods of time and by the conventional method at a temperature of 75 °C in a neutral medium. The hydrodynamic properties and molecular weight of the samples demonstrated the self-aggregating properties of this biopolymer. Inulin obtained by the flash extraction method consists of two fractions: low-molecular weight inulin and high-molecular weight aggregate represented by a polysaccharide complex. These aggregates can be formed both by inter- and intramolecular interactions of various inulin fractions in the solution. As expected, their isolation using conventional methods appeared impossible: the method of concentration yielded a number of subfractions on the UV membrane and a large amount of aggregated water-insoluble microgel. At the same time, inulin obtained by the conventional method consists of one fraction, although having a high degree of polydispersity. In order to obtain high-quality inulin intended for nutritional and prophylactic purposes, it is preferable to use the flash extraction method over short periods of time.

**Keywords:** Jerusalem artichoke, inulin, flash extraction, molecular weight, conformation, aggregation

**For citation:** Nasrididinov A. S., Ashurov A. I., Kholov Sh. E., Ismoilov I. B., Usmanova S. R., Mukhidinov Z. K. Self-aggregating properties of inulin in a dilute solution. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(1):38-49. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-38-49>.

## ВВЕДЕНИЕ

Инулин – это природный аналог инсулина растительного происхождения, запасной полисахарид, присутствующий во многих растениях, таких как корень цикория, пшеница, спаржа, лук, чеснок, клубни георгина и топинамбур (*Helianthus tuberosus* L.) [1]. Известно, что инулин представляет собой линейный полидисперсный фруктан (степень полимеризации (СП) – 2–60 и выше), состоящий из молекул фруктозы, связанных β (2→1)-связями с остатками D-глюкозы в конце цепи [2, 3]. В природе существует несколько типов инулина, которые различаются по степени полимеризации и молекулярной массе в зависимости от источника, времени сбора и условий обработки [1–6].

Содержание инулина в цикории и топинамбуре доходит до 20%, в корнях одуванчика, пастернаке, овсяном корне, клубнях георгина, луке-порее – до 15%, репчатом луке – 2–6%, спарже – 10–15%, девясиле – 9–12%, банане – 0,3–0,7%, пшеничной и рисовой муке – 1–4% [7, 8]. Источники инулина в последнее время вызывают все больший интерес, поскольку они являются возобновляемым сырьем для производства биоэтанола, фруктозного сиропа, одноклеточного белка и одноклеточного масла, получения фруктоолигосахаридов и других полезных продуктов [6]. Одним из перспективных видов сырья для этих целей являются корнеклубни топинамбура (*Helianthus tuberosus* L.) [9]. Одна из важных особенностей топинамбура – это его сбалансиро-

ванность по макро- и микроэлементному составу, он содержит большое количество магния, калия, фосфора, кальция, железа, цинка, что имеет существенное значение для больных сахарным диабетом [10].

По оценкам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), сахарный диабет занимает одно из первых мест по смертности и остается одной из наиболее актуальных проблем клинической медицины. В настоящее время в мире сахарный диабет II типа диагностирован у 425 млн человек<sup>1</sup>, при этом имеется неуклонная тенденция к росту заболеваемости. Согласно оценкам экспертов ВОЗ, в 2019 г. диабет стал непосредственной причиной 1,5 млн случаев смерти. Прогнозируется, что к 2045 г. общая численность больных сахарным диабетом увеличится на 51% и составит 700 млн человек<sup>2</sup>.

В Таджикистане от диабета страдают более 242,6 тыс. человек. Количество случаев смерти, которые можно отнести к высокому содержанию сахара в крови, составляет 2 413 человек. Препараты, используемые при лечении диабета, представляют собой таблетки (пероральные противодиабетические средства) и инсулин.

Известно о профилактических свойствах инулинсодержащего сырья для больных диабетом II типа, продукты переработки этого сырья способны повысить иммунозащитные свойства организма человека [11–13]. Диетологами рекомендовано его ежедневное потребление в количестве от 1 до 10 г, в зависимости от географи-

<sup>1</sup>Диабет. Информационный бюллетень ВОЗ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/southeastasia/home/search/> 2018 (01.10.2021).

<sup>2</sup>Международная федерация диабета IDF [Электронный ресурс]. URL: [https://diabetesatlas.org/upload/resources/material/20201028\\_180116\\_Global-factsheet-final.pdf](https://diabetesatlas.org/upload/resources/material/20201028_180116_Global-factsheet-final.pdf) (12.10.2021).

ческих, демографических и других связанных параметров (возраст, пол, время года и т.д.) [12].

Уникальные физико-химические свойства инулина позволяют использовать его в пищевой и фармацевтической промышленности. Создание функциональных пищевых продуктов на основе инулинсодержащего растительного сырья позволит обеспечить население функциональным питанием диабетического характера. Важным аспектом при создании рецептуры функционального пищевого продукта является точно смоделированный ингредиентный состав с заданными физико-химическими показателями инулина в них [13–16].

При определении рациональных значений параметров процесса экстракции при производстве инулина основополагающими являются гидродинамические свойства и молекулярная масса. Например, при использовании в качестве заменителя жира высокомолекулярный инулин, смешанный с водой или водным раствором, образует гелевую сетку из частиц, в результате чего получается кремообразная структура с пастообразной консистенцией, которую можно легко добавлять в пищевые продукты для замены до 100% жира [16].

Для характеристики инулина был использован широкий спектр аналитических инструментов. Повышенное понимание химии и поведения полимера инулина привело к новому важному его применению в качестве средства доставки лекарств, иммуностимуляторов и адъюванта вакцины. Гели инулина важны для применения в различных областях, в настоящее время наиболее коммерчески значимым является производство продуктов питания, где он используется в качестве низкокалорийного наполнителя, заменяет жир, сахар и муку, обеспечивая при этом ценными пищевыми волокнами [17–19]. Гелеобразование инулина описывается как гель-частицы, в которых трехмерные сети образуют агрегированные коллоидные частицы инулина [17].

Возможно, наиболее полезным свойством инулина с медицинской точки зрения является его присутствие во множестве различных структур молекулярной упаковки (полиморфные или изоформные). Осаждение инулина этанолом дает  $\beta$ -форму, а в водном растворе при комнатной температуре или ниже он находится в форме  $\alpha$ -инулина [17, 18]. Теоретические исследования показывают, что допустимы многие формы. На практике было обнаружено, что как  $\alpha$ -, так и  $\beta$ -формы являются нестабильными конформациями. Структурные последствия существования таких изоформ представляют значительный интерес [18, 19].

Высокая молекулярная масса инулина топинамбура приближает его свойства к свойствам высокоэффективного инулина цикория, и он может быть использован для аналогичных целей в пищевой промышленности. Необходимость уве-

личения применения доступного и малоценного сырья побудила исследовать процессы экстракции, структуру и молекулярные параметры инулина для рекомендации его в качестве профилактического продукта для лечения сахарного диабета.

Цель данной работы – исследование поведения макромолекулы инулина, полученного двумя методами посредством анализа гидродинамических свойств и молекулярной массы в разбавленном растворе.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

Образцы инулина были получены из корнеклубней топинамбура сорта Сарват (выведенные учеными и специалистами Центра инновационного развития и новых технологий НАН Таджикистана) с влажностью 76%, флэш-методом (ФМ) в автоклаве при 95 и 105 °С (образцы Инулин 1 и Инулин 2) в течение 7 мин [20] и традиционным методом (Инулин ТМ) – экстракцией водой при температуре 75 °С в течение 60 мин. рН в обоих случаях был постоянным и равнялся 6,8. Далее экстракты были концентрированы на роторном испарителе при низком давлении, затем из раствора гидролизата осаждением этиловым спиртом выделяли полисахарид [12]. Экстракт Инулин 2 также был концентрирован на ультрафильтрационной мембране (УФ) УМП-50 (ЗАО НТЦ «Владипор», Россия) с целью разделения полисахаридов: низкомолекулярного инулина и высокомолекулярного пектина. Таким образом, Инулин 3 получен из концентрированного раствора после ультрафильтрации.

Для определения молекулярной массы и молекулярно-массового распределения (ММР) полисахарида готовили его раствор (2,0–5,0 мг/мл) в растворе подвижной фазы путем перемешивания при комнатной температуре (20 °С) в течение 12 ч. Подвижная фаза состояла из 50 мМ NaNO<sub>3</sub>, содержащей 0,01% NaN<sub>3</sub>. Растворы полисахаридов фильтровали через 0,45 мкм фильтр (Millex-HV, PVDF, Millipore Corp., Billerica, MA, США) перед тем, как вводить его в систему высокоэффективной эксклюзионной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) в сочетании с вискозиметрическим (Viscostar, Wyatt technology, США) и рефрактометрическим (Differential refractometer Waters 2410, США) детекторами. Система доставки растворителя состояла из вакуумного дегазатора, автосамплера (автоматического введения раствора образца) и насоса высокого давления. Объем ввода образца составлял 200 мкл, а скорость потока поддерживалась на уровне 0,8 мл/мин. Образец вводили трехкратно и в расчетах использовали среднее значение полидисперсности ( $M_w/M_n$ ,  $M_z/M_n$ ), среднечисловую молярную массу ( $M_n$ ), средневесовую молярную массу ( $M_w$ ), z-среднюю молярную массу ( $M_z$ ), характеристическую вязкость [ $\eta_w$ ] и гидродинами-

ческий радиус  $[R_h]$ . Для защиты рабочей колонки были последовательно включены две защитные колонки (TSK-GEL® PWXL 6,0 мм; IDx4,0 см; L, 12 мкм, Япония). Для разделения инулина и пектина использованы две последовательно соединенные хроматографические колонки PL-Aquagel OH-60 и одна PL-Aquagel OH-40 (Agilent Technologies, США). Они были откалиброваны с использованием ряда стандартных образцов Пуллулана (Showa Denko КК, Япония) с  $M_w$  788, 667, 404, 112, 47,3 и 22,8 кД соответственно. Температуру колонок поддерживали при 30 °С, они последовательно были подключены к основным детекторам системы ВЭЖХ. Процент выхода образца из колонки был получен из соотношения элюированной массы, найденной из интегрирования сигнала RI к введенной массе. Все сигналы от двух детекторов были проанализированы с помощью программного обеспечения ASTRA 5.3.4.13 (Wyatt Technology, США) [20]. Изменение коэффициента преломления в зависимости от концентрации полимера  $dn/dc$  в растворе 50 мМ  $NaNO_3$ , равное 0,132, было рассчитано согласно [21].

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные выхода продуктов процесса экстракции приведены в работе [12]. Основную часть продуктов экстракции составили водорастворимые вещества, выход которых достиг до 97% от всей массы корнеплода топинамбура при экстракции ФМ и почти 75% при традиционном методе (ТМ). Наибольший выход инулина получен ФМ-экстракцией при повышенных температурах 95 и 105 °С и давлении 1,5 атм, которые составили 19,21 и 16,2% соответственно. В то время при ТМ-экстракции выход инулина составил 8,5%.

Молекулярная масса инулина напрямую зависит от типа растения (топинамбур, цикорий, девясил и др.) и времени сбора [22].

На рис. 1. приведены кривые ММР образцов инулина, полученные различными методами и режимами экстракции. Как видно из хроматограммы и кривых ММР, у образцов, полученных при ФМ-экстракции, наблюдаются два пика. Первый небольшой пик, имеющий высокую  $M_w$ , элюируется при объеме 14,5 мл, затем основная фракция полисахарида – инулин – вымывается из хроматографической ЭЖХ колонки при объеме 19,5–21,0 мл.

Результаты анализа ВЭЖХ хроматограммы и кривых распределения ММР образцов инулина, изолированных ФМ и ТМ, а также гидродинамические параметры изученных образцов инулина были обработаны с помощью программы ASTRA 5.3.4.13 и приведены в таблице.

Как видно из анализа полученных результатов, экстрагированный ФМ полисахарид (Инулин 1, Инулин 2 и Инулин 3) элюируется двумя пиками (А и В). Хотя выход из ЭЖХ колонки первой фракции (пик А) для образцов Инулин 1, Инулин 2 и Инулин 3 небольшой (4,05, 7,59 и 6,83%), а их молекулярная масса очень высокая (1003,2 кД). В то время как выход второй фракции (основная фракция инулина) для Инулин 1 и Инулин 2 максимальный – 95,47 и 91,14%. Молекулярная масса этих фракций низкая – 2,89 и 2,7 кД соответственно для Инулин 1 и Инулин 2.

Для разделения фракции полисахаридов нами была применена мембранная фильтрация из полупроницаемых мембран УМП-50 (ЗАО НТЦ «Владипор», Россия) с пропускающей способностью 50 кД по белку (альбумин).

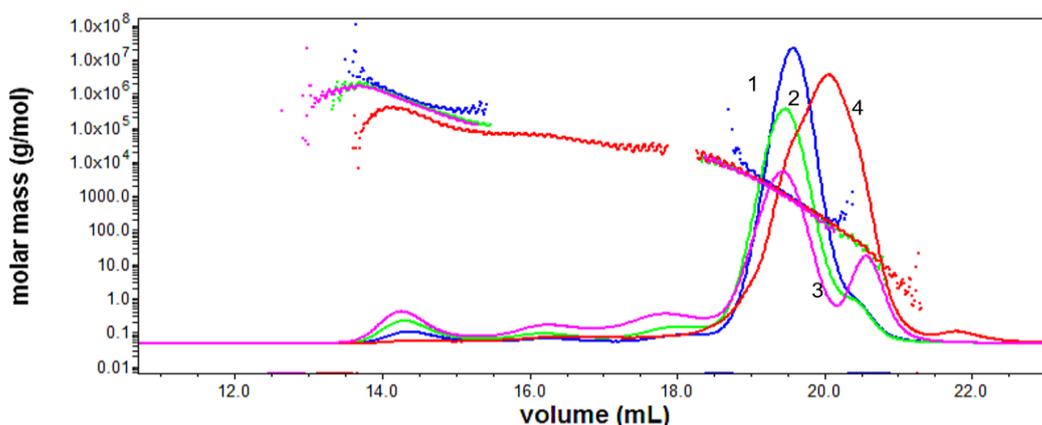


Рис. 1. ВЭЖХ хроматограммы и кривые молекулярно-массового распределения (ММР) экстрагированных из топинамбура полисахаридов, полученные с применением вискозиметрического в сочетании с рефрактометрическим детекторами:

(1) – Инулин 1; (2) – Инулин 2; (3) – Инулин 3; (4) – Инулин ТМ

Fig. 1. HPLC chromatogram and molecular weight distribution curves of extracted polysaccharides from Jerusalem artichoke obtained using viscometric detector in combination with refractometric detector:

(1) – Inulin 1; (2) – Inulin 2; (3) – Inulin 3; (4) – Inulin TM

Данные молекулярной массы и гидродинамические свойства образцов инулина, изолированных флэш-методом и традиционным методом

Molecular weight and hydrodynamic properties of inulin samples isolated by flash method and traditional method

Инулин	t °С экст.	Время экст., мин	R, %	MG, %	M <sub>w</sub> , кД (г/моль)	M <sub>w</sub> /M <sub>n</sub>	η <sub>w</sub> , мл/г	Rh(w), нм
Инулин 1 (А)	110	20	4,05	8,4	1173,90	1,36	49,8	17,6
Инулин 1 (В)			95,47		2,89	2,90	2,8	0,8
Инулин 2 (А)	100	20	7,59	15,2	1003,90	1,60	64,5	17,9
Инулин 2 (В)			91,14		2,70	7,90	3,7	0,9
Инулин 3 (А)	100	20	6,83	34,0	1025,40	1,50	70,1	18,6
Инулин 3 (В)			39,36		3,40	3,20	4,0	1,0
Инулин ТМ	80	30	85,2	9,1	1,49	69,8	1,3	0,5

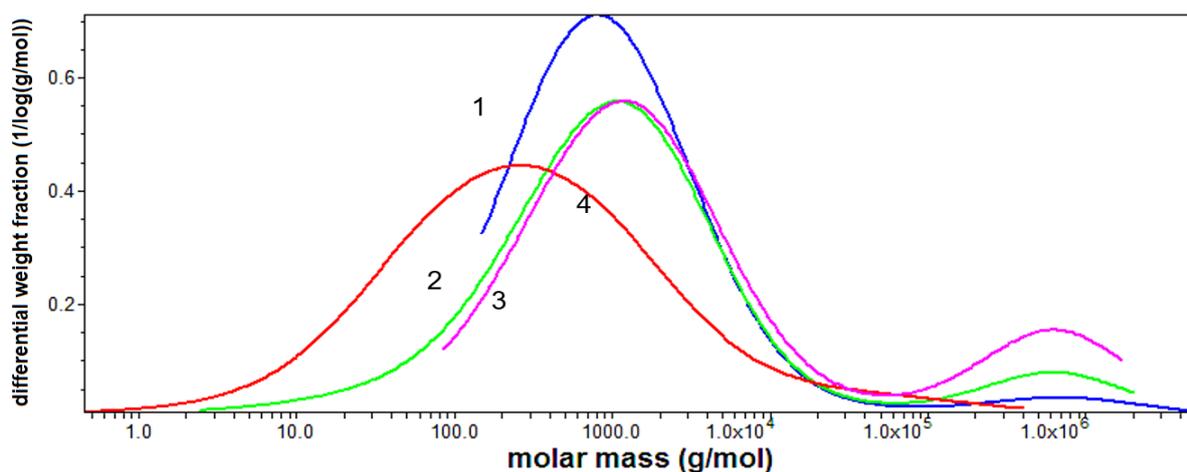
Инулин 2 после концентрирования на УФ-мембране (Инулин 3) показал такие же параметры, но обладал несколько высоким значением M<sub>w</sub>, причем выход второго пика заметно уменьшился (39,36%) из-за формирования ряда субфракций при концентрировании, которые элюировались (извлекались из колонки хроматографа) при объеме 16,2, 17,8 и 20,7 мл. Попытка разделить высокомолекулярную фракцию от низкомолекулярной не позволила достичь соответствующих результатов, наоборот, выход обеих фракций уменьшился, образовалось большое количество агрегированного микрогеля (24%).

Инулин, полученный ТМ, элюировался одним пиком со значением M<sub>w</sub> = 1,49 кД, но с высоким показателем полидисперсности, равной 69,8.

Дифференциальные кривые (зависимость логарифма массовой доли полисахарида от M<sub>w</sub>) изученных образцов ясно демонстрируют изменения в профиле распределения ММР в изученных образцах (рис. 2).

Как упоминалось во введении, СП инулина в значительной степени определяет его физико-химические характеристики. Авторами [8] представлен обзор СП различных типов инулина, который может служить источником информации.

Из данных таблицы также видно, что изменение гидродинамических свойств (характеристической вязкости ([η]) и гидродинамического радиуса Rh(w)) изученных полисахаридов (Инулин 1 и Инулин 2) аутентично изменениям M<sub>w</sub> и профилю ММР. Значения [η] и Rh(w) для Инулин 1 и Инулин 2 равны 2,8 мл/г; 0,8 нм и 3,7 мл/г; 0,9 нм соответственно.



**Рис. 2.** Дифференциальные кривые (зависимость логарифма массовой доли полисахарида от молекулярной массы) экстрагированных полисахаридов из корневой клубневой топинамбура сгенерированы с помощью программы ASTRA V5.3.4.20 (Wyatt Technology, США) и Breez (Waters, США): (1) – Инулин 1; (2) – Инулин 2; (3) – Инулин 3; (4) – Инулин ТМ

**Fig. 2.** Differential curves (mass fraction of the polysaccharide versus the molecular weight) of the polysaccharides extracted from Jerusalem artichoke generated by the ASTRA V5.3.4.20 (Wyatt Technology) and Breez (Waters) software: (1) – Inulin 1; (2) – Inulin 2; (3) – Inulin 3; (4) – Inulin TM

Здесь необходимо отметить изменение этих параметров для Инулин ТМ и УФ-концентрата (Инулин 3): значение  $M_w$ ,  $[\eta]$  и  $Rh(w)$  для этого образца выше, чем у исходного образца Инулин 2, хотя значение  $M_w$  остается почти одинаковым для высокомолекулярной фракции, равной 1025,4 кДа. Для образца Инулин ТМ все параметры были низкими. Хотя молярная масса, форма, размер и вязкостные свойства инулина с низкой и высокой степенью полимеризации были описаны в литературе [23–25], указанные значения характеристической вязкости  $[\eta]$  не соответствовали молекулярной конформации.

Согласно данным вышеприведенных исследований, инулин как с низкой (4,0–6,5 кДа), так и с высокой  $M_w$  (1000 кДа) показал высокие значения  $[\eta]$  в диапазоне 9,1–17,0 мл/г, что не соответствует компактной глобулярной форме инулина с высокой молярной массой [19]. Глобулярные полимеры (например, глобулярные белки) действительно проявляют довольно низкие и сопоставимые значения  $[\eta]$  менее чем 4,0 мл/г.

В работе [19] результат гидратации инулина в растворе был связан с характеристической

вязкостью  $[\eta]$  инулина, чтобы установить форму агрегатов биополимера в водном растворе с использованием сканирующего туннельного (СТМ) микроскопа и динамического светорассеивания (ДС). Критическая концентрация агрегации инулина как в водном органическом, так и в солевом растворах оценивалась флуориметрическим методом. В растворе диметилсульфоксида с помощью СТМ были обнаружены палочковидные гетерогенные агрегаты средней длины 174 нм и шириной 56 нм. Это была стержнеобразная геометрия агрегатов, которые давали более высокое значение  $[\eta]$ , чем глобулярные частицы, образующиеся в водном растворе. Показано, что инулин цикория со средней молекулярной массой 4,468 кДа может самоорганизовываться в водной среде, как и многие блочные и графт-сополимеры, демонстрирующие критическую концентрацию агрегации. Он образует мягкие глобулярные супрамолекулярные сборки в водной среде. Неагрегированные инулиновые мономеры также предполагают глобулярную геометрию [17–19].

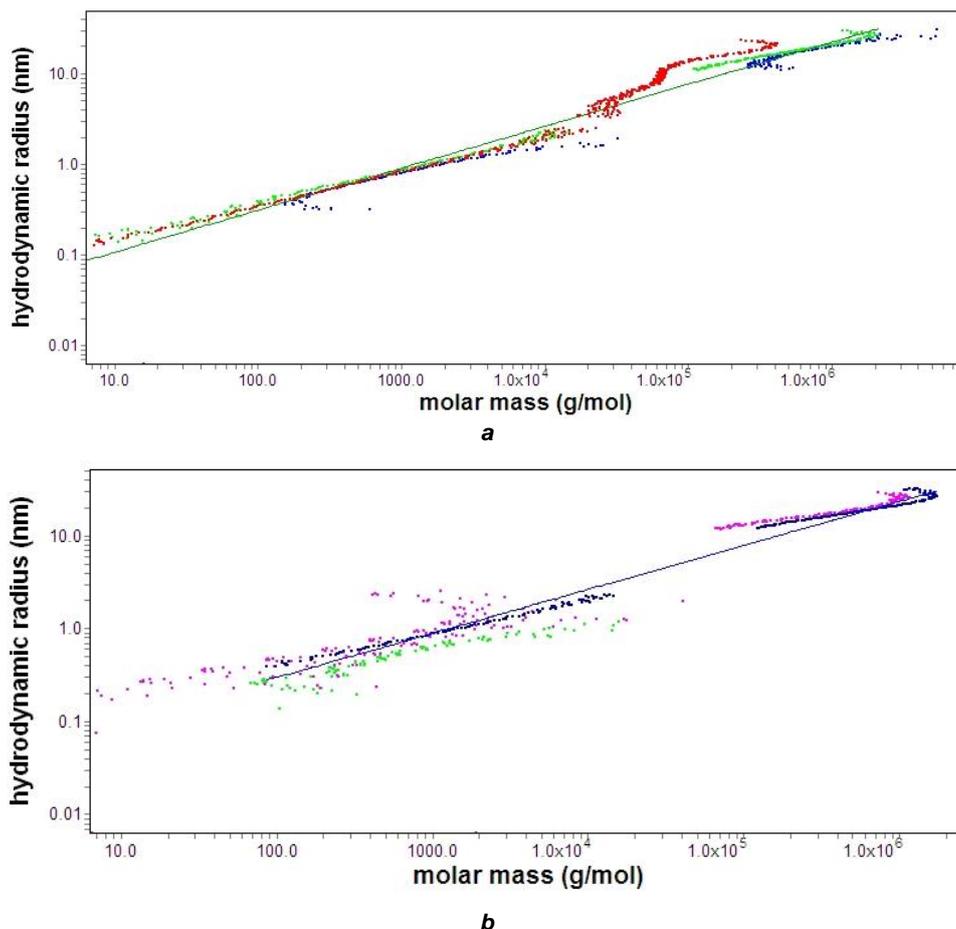


Рис. 3. Зависимость гидродинамического радиуса от молекулярной массы (конформационный график) для: а – Инулин 2 ( $b = 0,46$ ); б – Инулин 3 ( $b = 0,47$ )

Fig. 3. Hydrodynamic radius versus molecular weight (conformational Plot) for: а – Inulin 2 ( $b = 0.46$ ); б – Inulin 3 ( $b = 0.47$ )

На рис. 3. представлены конформационные графики, произведенные с помощью программы ASTRA (Wyatt Technology, США), для образцов Инулин 2 и его концентрированной формы Инулин 3. Величина коэффициента **b**, определяющая конформацию макромолекулы в растворе [26], найденная из наклона кривой зависимости гидродинамического радиуса и  $M_w$ , имеет одинаково низкие значения для обоих образцов. Найденные средние значения коэффициента **b** для смеси экстрагированного инулина показывают на конформацию случайных клубков с вытянутой формой ввиду их высокой агрегации, на что указывают высокие значения агрегированного микрогеля (см. таблицу).

А. D. French [27] рассчитал теоретически допустимые конформации для инулина в растворе и пришел к выводу, что допустимые конформации аналогичны конформации декстрана. Конечно, указанные конформации – это просто разрешенные конформации, основанные на определенных предположениях. Он также отметил, что существует множество факторов, влияющих на предпочтительную структуру олигосахаридов. Авторы [28] также обнаружили множество возможных конформаций для инулина на своих моделях, включая зигзагообразную конформацию с углом  $\omega$  на  $180^\circ$ , которая оставалась стабильной в их моделировании. Следовательно, проявление множества возможных конформаций показывает молекулярную гибкость инулина.

В нескольких работах описано поведение широкого спектра конформации инулина в растворе [17]. Приводится, что спиральная конформация возможна для олигофруктозы с СП 5. Эта конформация, однако, невозможна для инулинов с более высокой  $M_w$  из-за стерического препятствия [17].

Инулин также богат гидроксильными группами, которые способны принимать участие в супрамолекулярных взаимодействиях, в частности через водородные связи. Эти взаимодействия могут быть как межмолекулярными, так и внутримолекулярными, хотя моделирование структуры инулина на основе рентгеноструктурного анализа твердой формы предполагает, что кристаллический инулин имеет только межмолекулярные водородные связи между цепями. В этом контексте гелеобразование инулина описывается как гель-частицы, в которых трехмерные сети образуют агрегированные коллоидные частицы инулина [17].

Из полученных нами результатов (дифференциальные кривые ММР (см. рис. 2) и конформационный график) кажется вероятным, что некоторая значительная самоорганизация начинается с низкомолекулярных фракций инулина, которые, как предполагается, благоприятствуют циклической или спиральной конформации [29]. Было показано [17, 29], что олигомеры с СП 6–8

имеют организованные, хотя и менее четко определенные конформации, и это изменение в структуре отвечает за необычную последовательность хроматографического элюирования в этом диапазоне СП. Олигомеры инулина с СП 9 и выше образуют регулярную спиральную структуру, которая, как утверждается, является как пяти- так и шестикратной спиралью [17, 29]. Правосторонняя шестигранная спиральная структура сейчас стала общепринятой. Спиральные структуры каждой цепи могут объединяться в ряд изоформ, природа которых зависит от кинетики и термодинамики образования [17].

В целом, исходя из полученных данных и данных других авторов, можно сделать следующие выводы: 1) результаты гидродинамических свойств и молекулярной массы образцов инулина топинамбура, полученного ФМ, как при высокой температуре  $105^\circ\text{C}$  за короткое время и ТМ, так и при низкой температуре  $75^\circ\text{C}$ , но более длительное время, демонстрировали самоагрегирующие свойства этого биополимера, при этом исключаются процессы деградации (гидролиза), так как процесс экстракции проводился при нейтральных условиях ( $\text{pH} = 6,8$ ); 2) инулин, экстрагированный ФМ, состоит из двух фракций: низкомолекулярный инулин и высокомолекулярный агрегат, который представляет собой комплекс полисахарида. Как и следовало ожидать, невозможно их разделить обычными методами, при концентрировании на УФ-мембране формировался ряд субфракций, причем образовывалось большое количество агрегированного, не растворимого в воде микрогеля.

Необходимо продолжить дальнейшее исследование его конфигурационных свойств в неводных и смешанных растворителях, а также провести препаративное разделение субфракций инулина для детальной идентификации их структуры, что способствует его широкому применению на практике.

## **ВЫВОДЫ**

Таким образом, данное исследование продемонстрировало новые результаты по структурным и молекулярным параметрам инулина из клубней топинамбура, выдвигалась гипотеза о структурном формировании инулина в водном растворе. Как уже отмечалось ранее, инулин, экстрагированный при высокой температуре и за короткое время флэш-методом, состоит из двух фракций: низкомолекулярный инулин и высокомолекулярный агрегат, который представляет собой комплекс полисахарида. Показано, что для получения качественного инулина, предназначенного для пищевых и профилактических целей, предпочтительно использовать флэш-метод экстракции за короткое время, чем традиционный метод за длительное время.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Anderson-Dekkers I., Nouwens-Roest M., Brigitte P., Vaughan E. Inulin. In: Handbook of Hydrocolloids. Third ed. Chapter 17. Amsterdam: Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 2021. P. 537–562. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820104-6.00015-2>.
2. Kontogiorgos V. Stabilisers. Inulin. In: Encyclopedia of Dairy Sciences. Third ed. NY: Academic Press, 2022. Vol. 2. P. 689–694. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00321-4>.
3. BeMiller J. N. Inulin and Konjac Glucomannan. In: Carbohydrate Chemistry for Food Scientists. Amsterdam: Elsevier Inc., AACC International, 2019. P. 253–259. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812069-9.00010-8>.
4. Kozhukhova M. A., Nazarenko M. N., Barkhatova T. V., Khripko I. A. Obtaining and identification of inulin from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) tubers // Foods and Raw Materials. 2015. Vol. 3, no. 2. P. 13–22. <https://doi.org/10.12737/13115>.
5. Chiavaro E., Vittadini E., Corradini C. Physicochemical characterization and stability of inulin gels // European Food Research and Technology. 2007. Vol. 225. P. 85–94. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0385-y>.
6. Mensink M. A., Frijlink H. W., van der Voort Maarschalk K., Hinrichs W. L. J. Inulin, a flexible oligosaccharide I: Review of its physicochemical characteristics // Carbohydrate Polymers. 2015. Vol. 130. P. 405–419. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.05.026>.
7. Mudgil D., Barak S. Classification, Technological Properties, and Sustainable Sources. In: Dietary Fiber: Properties, Recovery, and Applications. Chapter 2. NY: Academic Press, 2019. P. 27–58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816495-2.00002-2>.
8. Манукян Л. С., Кочикян В. Т., Андреасян Н. А., Афян К. Б., Балаян А. М. Выделение инулина из различного растительного сырья // Биологический журнал Армении. 2014. N 4. С. 71–75.
9. Ma X. Y., Zhang L. H., Shao H. B., Xu G., Zhang F., Ni F. T., et al. Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*), a medicinal salt-resistant plant has high adaptability and multiple-use values // Journal of Medicinal Plants Research. 2011. Vol. 5, no. 8. P. 1272–1279.
10. Ашуров А. И., Джонмуродов А. С., Мухидинов З. К., Усманова С. Р., Партоев К. Интенсификация процесса получения полисахаридов из корнеклубней топинамбура // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. 2019. N 3. С. 208–214.
11. Shoaib M., Shehzada A., Omar M., Rakha A., Raza H., Sharif H. R., et al. Inulin: properties, health benefits, and food applications // Carbohydrate Polymers. 2016. Vol. 147. P. 444–454. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.020>.
12. Colwell J. A. Type II diabetes, pre-diabetes, and the metabolic syndrome // The Journal of the American Medical Association. 2011. Vol. 306, no. 2. P. 215–238. <https://doi.org/10.1001/jama.2011.970>.
13. Jackson P. P. J., Wijeyesekera A., Theis S., Harsseelaar J., Rastall R. A. Food for thought! Inulin-type fructans: does the food matrix matter? // Journal of Functional Foods. 2022. Vol. 90. P. 104987. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.104987>.
14. Шаненко Е. Ф., Силаева М. А., Ермолаева Г. А. Топинамбур – сырье профилактического питания // Вопросы питания. 2016. Т. 85. N S2. С. 219.
15. Amjadi S., Almasi H., Hamishehkar H., Khaledabad M. A., Lim L.-T. Cationic inulin as a new surface decoration hydrocolloid for improving the stability of liposomal nanocarriers // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2022. Vol. 213. P. 112401. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112401>.
16. Franck A. Technological functionality of inulin and oligofructose // British Journal of Nutrition. 2002. Vol. 87, no. S2. P. 287–291. <https://doi.org/10.1079/BJN/2002550>.
17. Barclay T., Ginic-Markovic M., Cooper P., Petrovsky N. Inulin – a versatile polysaccharide with multiple pharmaceutical and food chemical uses // Journal of Excipients and Food Chemicals. 2010. Vol. 1, no. 3. P. 27–50.
18. Ronkart S. N., Deroanne C., Paquot M., Fougnes C., Blecker C. S. Impact of the crystallization pathway of inulin on its mono-hydrate to hemihydrate thermal transition // Food Chemistry. 2010. Vol. 119, no. 1. P. 317–322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.035>.
19. Dan A., Ghosh S., Moulik S. P. Physicochemical studies on the biopolymer inulin: a critical evaluation of its self-aggregation, aggregation-morphology, interaction with water, and thermal stability // Biopolymers. 2009. Vol. 91, no. 9. P. 687–699. <https://doi.org/10.1002/bip.21199>.
20. Muhidinov Z. K., Teshaev Kh., Jonmurodov A., Khalikov D., Fishman M. Physico-chemical characterization of pectic polysaccharides from various sources obtained by steam assisted flash extraction (SAFE) // Macromolecular Symposia. 2012. Vol. 317-318, no. 1. P. 142–148. <https://doi.org/10.1002/masy.201100108>.
21. Muhidinov Z. K., Bobokalonov J. T., Ismoilov I. B., Strahan G. D., Chau H. K., Hotchkiss A. T., et al. Characterization of two types of polysaccharides from *Eremurus hissaricus* roots growing in Tajikistan // Food Hydrocolloids. 2020. Vol. 105. P. 105768. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105768>.
22. Li W., Zhang J., Yu C., Li Q., Dong F., Wang G., et al. Extraction, degree of polymerization determination and prebiotic effect evaluation of inulin from Jerusalem artichoke // Carbohydrate Polymers. 2015. Vol. 121. P. 315–319. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.12.055>.
23. López-Molina D., Navarro-Martínez M. D., Melgarejo F. R., Hiner A. N. P., Chazarra S., Rodríguez-López J. N. Molecular properties and prebiotic effect of inulin obtained from artichoke

(*Cynara scolymus* L.) // *Phytochemistry*. 2005. Vol. 66, no. 12. P. 1476–1484. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2005.04.003>.

24. Kitamura S., Hirano T., Takeo K., Mimura M., Kajiwara K., Stokke B. T., et al. Conformation of (2→1)-β-d-fructan in aqueous solution // *International Journal of Biological Macromolecules*. 1994. Vol. 16, no. 6. P. 313–317. [https://doi.org/10.1016/0141-8130\(94\)90062-0](https://doi.org/10.1016/0141-8130(94)90062-0).

25. Wolff D., Czaplá S., Heyer A. G., Radosta S., Mischnick P., Springer J. Globular shape of high molar mass inulin revealed by static light scattering and viscometry // *Polymer*. 2000. Vol. 41, no. 22. P. 8009–8016. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00168-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00168-3).

26. Podzimek S. Light scattering, size exclusion chromatography and asymmetric flow field flow fractionation powerful tools for the characterization of

polymers, protein and nanoparticles. New Jersey: Hoboken Publisher, 2011. P. 333. <https://doi.org/10.1002/9780470877975>.

27. French A. D. Accessible conformations of the B-D-(2–1)-and-(2–6)-linked D-fructans inulin and levan // *Carbohydrate Research*. 1988. Vol. 176, no. 1. P. 17–30.

28. Vereyken I. J., van Kuik J. A., Evers T. H., Rijken P. J., de Kruijff B. Structural requirements of the fructan–lipid interaction // *Biophysical Journal*. 2003. Vol. 84, no. 5. P. 3147–3154. [https://doi.org/10.1016/s0006-3495\(03\)70039-3](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(03)70039-3).

29. Timmermans J. W., Slaghek T. M., Iizuka M., Van den Ende W., De Roover J., van Laere A. Isolation and structural analysis of new fructans produced by chicory // *Journal of Carbohydrate Chemistry*. 2001. Vol. 20, no. 5. P. 375–395. <https://doi.org/10.1081/CAR-100105711>.

## REFERENCES

1. Anderson-Dekkers I., Nouwens-Roest M., Brigitte P., Vaughan E. Inulin. In: *Handbook of Hydrocolloids*. Third ed. Chapter 17. Amsterdam: Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition; 2021, p. 537-562. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820104-6.00015-2>.

2. Kontogiorgos V. Stabilisers. Inulin. In: *Encyclopedia of Dairy Sciences*. Third ed. NY: Academic Press; 2022, vol. 2, p. 689-694. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00321-4>.

3. BeMiller J. N. Inulin and Konjac Glucomannan. In: *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*. Amsterdam: Elsevier Inc., AACC International; 2019, p. 253-259. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812069-9.00010-8>.

4. Kozhukhova M. A., Nazarenko M. N., Barkhatova T. V., Khripko I. A. Obtaining and identification of inulin from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) tubers. *Foods and Raw Materials*. 2015;3(2):13-22. <https://doi.org/10.12737/13115>.

5. Chiavaro E., Vittadini E., Corradini C. Physicochemical characterization and stability of inulin gels. *European Food Research and Technology*. 2007; 225:85-94. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0385-y>.

6. Mensink M. A., Frijlink H. W., van der Voort Maarschalk K., Hinrichs W. L. J. Inulin, a flexible oligosaccharide I: Review of its physicochemical characteristics. *Carbohydrate Polymers*. 2015;130:405-419. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.05.026>.

7. Mudgil D., Barak S. Classification, Technological Properties, and Sustainable Sources. In: *Dietary Fiber: Properties, Recovery, and Applications*. Chapter 2. NY: Academic Press; 2019, p. 27-58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816495-2.00002-2>.

8. Manukyan L. S., Kochikyan V. T., Andreasyan N. A., Afyan K. B., Balayan A. M. Isolation of inulin from various plant materials. *Biologicheskii zhurnal Armenii*. 2014;(4):71-75. (In Russian).

9. Ma X. Y., Zhang L. H., Shao H. B., Xu G., Zhang F., Ni F. T., et al. Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*), a medicinal salt-resistant plant has high adaptability and multiple-use values. *Journal of Medicinal Plants Research*. 2011;5(8):1272-1279.

10. Ashurov A. I., Dzhonmurodov A. S., Mukhidinov Z. K., Usmanova S. R., Partoev K. The intensification of the process for the polysaccharides extraction from Jerusalem artichoke. *Vestnik Tadzhikskogo natsional'nogo universiteta. Seriya estestvennykh nauk = Bulletin of the Tajik National University. Series of natural sciences*. 2019;3:208-214. (In Russian).

11. Shoaib M., Shehzada A., Omair M., Rakha A., Raza H., Sharif H. R., et al. Inulin: properties, health benefits, and food applications. *Carbohydrate Polymers*. 2016;147:444-454. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.020>.

12. Colwell J. A. Type II diabetes, pre-diabetes, and the metabolic syndrome. *The Journal of the American Medical Association*. 2011;306(2):215-238. <https://doi.org/10.1001/jama.2011.970>.

13. Jackson P. P. J., Wijeyesekera A., Theis S., Harsseelaar J., Rastall R. A. Food for thought! Inulin-type fructans: does the food matrix matter? *Journal of Functional Foods*. 2022;90:104987. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.104987>.

14. Shanenko E. F., Silaeva M. A., Ermolaeva G. A. Jerusalem artichoke – raw materials for preventive nutrition. *Voprosy pitaniya = Problems of Nutrition*. 2016;85(S2):219. (In Russian).

15. Amjadi S., Almasi H., Hamishehkar H., Khaledabad M. A., Lim L.-T. Cationic inulin as a new surface decoration hydrocolloid for improving the stability of liposomal nanocarriers. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2022;213:112401. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112401>.

16. Franck A. Technological functionality of inulin and oligofructose. *British Journal of Nutrition*. 2002;87(S2):287-291. <https://doi.org/10.1079/BJN/2002550>.

17. Barclay T., Ginic-Markovic M., Cooper P., Petrovsky N. Inulin – a versatile polysaccharide with

multiple pharmaceutical and food chemical uses. *Journal of Excipients and Food Chemicals*. 2010;1(3):27-50.

18. Ronkart S. N., Deroanne C., Paquot M., Fournies C., Blecker C. S. Impact of the crystallization pathway of inulin on its mono-hydrate to hemihydrate thermal transition. *Food Chemistry*. 2010; 119(1):317-322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.035>.

19. Dan A., Ghosh S., Moulik S. P. Physico-chemical studies on the biopolymer inulin: a critical evaluation of its self-aggregation, aggregation-morphology, interaction with water, and thermal stability. *Biopolymers*. 2009;91(9):687-699. <https://doi.org/10.1002/bip.21199>.

20. Muhidinov Z. K., Teshayev Kh., Jonmurodov A., Khalikov D., Fishman M. Physico-chemical characterization of pectic polysaccharides from various sources obtained by steam assisted flash extraction (SAFE). *Macromolecular Symposia*. 2012;317-318(1):142-148. <https://doi.org/10.1002/masy.201100108>.

21. Muhidinov Z. K., Bobokalonov J. T., Ismoilov I. B., Strahan G. D., Chau H. K., Hotchkiss A. T., et al. Characterization of two types of polysaccharides from *Eremurus hissaricus* roots growing in Tajikistan. *Food Hydrocolloids*. 2020;105:105768. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105768>.

22. Li W., Zhang J., Yu C., Li Q., Dong F., Wang G., et al. Extraction, degree of polymerization determination and prebiotic effect evaluation of inulin from *Jerusalem artichoke*. *Carbohydrate Polymers*. 2015;121:315-319. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.12.055>.

23. Lopez-Molina D., Navarro-Martínez M. D., Melgarejo F. R., Hiner A. N. P., Chazarra S., Rodríguez-López J. N. Molecular properties and

prebiotic effect of inulin obtained from artichoke (*Cynara scolymus* L.). *Phytochemistry*. 2005;66 (12):1476-1484. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2005.04.003>.

24. Kitamura S., Hirano T., Takeo K., Mimura M., Kajiwara K., Stokke B. T., et al. Conformation of (2→1)-β-d-fructan in aqueous solution. *International Journal of Biological Macromolecules*. 1994;16(6):313-317. [https://doi.org/10.1016/0141-8130\(94\)90062-0](https://doi.org/10.1016/0141-8130(94)90062-0).

25. Wolff D., Czaplá S., Heyer A. G., Radosta S., Mischnick P., Springer J. Globular shape of high molar mass inulin revealed by static light scattering and viscometry. *Polymer*. 2000;41(22):8009-8016. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00168-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00168-3).

26. Podzimek S. *Light scattering, size exclusion chromatography and asymmetric flow field flow fractionation powerful tools for the characterization of polymers, protein and nanoparticles*. New Jersey: Hoboken Publisher; 2011, p. 333. <https://doi.org/10.1002/9780470877975>.

27. French A. D. Accessible conformations of the B-D-(2→1)-and-(2→6)-linked D-fructans inulin and levan. *Carbohydrate Research*. 1988;176(1):17-30.

28. Vereyken I. J., van Kuik J. A., Evers T. H., Rijken P. J., de Kruijff B. Structural requirements of the fructan-lipid interaction. *Biophysical Journal*. 2003;84(5):3147-3154. [https://doi.org/10.1016/s0006-3495\(03\)70039-3](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(03)70039-3).

29. Timmermans J. W., Slaghek T. M., Iizuka M., Van den Ende W., De Roover J., van Laere A. Isolation and structural analysis of new fructans produced by chicory. *Journal of Carbohydrate Chemistry*. 2001; 20(5):375-395. <https://doi.org/10.1081/CAR-100105711>.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **А. С. Насриддинов,**

к.х.н., докторант,  
Институт химии им. В. И. Никитина  
Национальной Академии наук  
Республики Таджикистан,  
734065, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2,  
Республика Таджикистан,  
abubakr2583@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9897-2451>

##### **А. И. Ашуров,**

научный сотрудник,  
Институт химии им. В. И. Никитина  
Национальной Академии наук  
Республики Таджикистан,  
734065, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2,  
Республика Таджикистан,  
ashurboy\_1593@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4881-6944>

##### **Ш. Ё. Холов,**

к.т.н., ведущий научный сотрудник  
лаборатории химии высокомолекулярных  
соединений,

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Abubakr S. Nasriddinov,**

Cand. Sci. (Chemistry), Doctoral Student,  
V. I. Nikitin Institute of Chemistry,  
National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2, Aini St., 734063, Dushanbe, Tajikistan,  
abubakr2583@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9897-2451>

##### **Ashurboi I. Ashurov,**

Researcher,  
V. I. Nikitin Institute of Chemistry,  
National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2, Aini St., 734063, Dushanbe, Tajikistan,  
ashurboy\_1593@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4881-6944>

##### **Shavkat E. Kholov,**

Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher,  
V. I. Nikitin Institute of Chemistry,  
National Academy of Sciences of Tajikistan,

Институт химии им. В. И. Никитина  
Национальной Академии наук  
Республики Таджикистан,  
734065, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2,  
Республика Таджикистан,  
shavkat.kholov@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-5601-3255>

**И. Б. Исмоилов,**  
соискатель кандидатской степени  
при лаборатории химии высокомолекулярных  
соединений,  
Институт химии им. В. И. Никитина  
Национальной Академии наук  
Республики Таджикистан,  
734065, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2,  
Республика Таджикистан,  
ikromjon.bomurodi92@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4068-0739>

**С. Р. Усманова,**  
к.х.н., ведущий научный сотрудник  
лаборатории химии высокомолекулярных  
соединений,  
Институт химии им. В. И. Никитина  
Национальной Академии наук  
Республики Таджикистан,  
734065, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2,  
Республика Таджикистан,  
surayo.usmanova@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-4254-7699>

**З. К. Мухидинов,**  
д.х.н., профессор, главный научный сотрудник  
лаборатории химии высокомолекулярных  
соединений,  
Институт химии им. В. И. Никитина  
Национальной Академии наук  
Республики Таджикистан,  
734065, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2,  
Республика Таджикистан,  
zainy@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0023-2229>

#### **Вклад авторов**

А. С. Насриддинов – научное руководство;  
проведение экспериментов; обработка  
полученных данных.  
А. И. Ашуров – проведение экспериментов;  
обработка полученных данных.  
Ш. Ё. Холов – проведение экспериментов;  
обработка полученных данных.  
И. Б. Исмоилов – проведение экспериментов;  
обработка полученных данных.  
С. Р. Усманова – концепция исследования;  
доработка текста; итоговые выводы.  
З. К. Мухидинов – научное руководство;  
концепция исследования; развитие  
методологии; итоговые выводы.

299/2, Aini St., 734063, Dushanbe, Tajikistan,  
shavkat.kholov@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-5601-3255>

**Ikromdzhon B. Ismoilov,**  
Researcher,  
V. I. Nikitin Institute of Chemistry,  
National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2, Aini St., 734063, Dushanbe, Tajikistan,  
ikromjon.bomurodi92@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4068-0739>

**Suray R. Usmanova,**  
Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher,  
V. I. Nikitin Institute of Chemistry,  
National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2, Aini St., 734063, Dushanbe, Tajikistan,  
surayo.usmanova@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-4254-7699>

**Zainiddin K. Mukhidinov,**  
Dr. Sci. (Chemistry), Professor,  
Chief Researcher,  
V. I. Nikitin Institute of Chemistry,  
National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2, Aini St., 734063, Dushanbe, Tajikistan,  
zainy@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0023-2229>

#### **Contribution of the authors**

Abubakr S. Nasriddinov – scientific guidance;  
conducting experiments; data processing.  
Ashurboi I. Ashurov – conducting experiments;  
data processing.  
Shavkat E. Kholov – conducting experiments;  
data processing.  
Ikromdzhon B. Ismoilov – conducting  
experiments; data processing.  
Suray R. Usmanova – conceptual studies;  
text revision; final conclusions.  
Zainiddin K. Mukhidinov – scientific management;  
conceptual studies; development methodology;  
final conclusions.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 18.10.2021.  
Одобрена после рецензирования 15.02.2022.  
Принята к публикации 28.02.2022.*

**Conflict interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

*The article was submitted 18.10.2021.  
Approved after reviewing 15.02.2022.  
Accepted for publication 28.02.2022.*