

Научная статья

УДК 544.2/544.7. 612.396.114:663:542

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-279-290>



Макромолекулярный состав инулина различного происхождения в концентрированном растворе

Ашурбой Илхомбойевич Ашуров*, Замира Умаралиевна Шерова*,
Абубакр Саидкулович Насриддинов*, Сураё Рахматжоновна Усманова*,
Хуршед Икром Икромии**, Зайниддин Камарович Мухидинов*

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

**Таджикский технологический университет, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Автор, ответственный за переписку: Мухидинов Зайниддин Камарович, zainy@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлены исследования молекулярно-массового распределения инулина разного происхождения с целью дальнейшего изучения механизма их самоорганизации в концентрированном растворе. Посредством доступного метода турбидиметрического титрования на основе интегральных и дифференциальных кривых молекулярно-массового распределения рассматривались следующие образцы инулина: коммерческого из топинамбура (А), экспериментального из топинамбура (В) и экспериментального из цикория (С). Обнаружено, что у образцов инулина А и В присутствуют 3 макромолекулярные фракции (изоформы), которые в отдельности имеют узкое молекулярно-массовое распределение. С увеличением концентрации инулина в растворе происходит самоорганизация макромолекул, что приводит к более мутному раствору в точке максимума и появлению новых изоформ. С увеличением концентрации полимера в инулине А наблюдается рост агрегатов для изоформы 3 и 5, в инулине В, наоборот, происходит растворение агрегатов и превращение изоформ из высокой в низкие молекулярные массы. В образце инулина С все 4 изоформы инулина выделяются отчетливо. По результатам исследования взаимодействия макромолекул в концентрированном растворе можно сделать вывод, что метод турбидиметрического титрования вполне может дополнить дорогостоящие методы определения молекулярно-массового распределения полимеров: высокоэффективную эксклюзионную жидкостную хроматографию, ультрацентрифугирование, светорассеивание и другие современные методы. Исследование свойств уникальных по структуре инулинов может значительно расширить спектр их применения.

Ключевые слова: инулин, изоформы, турбидиметрическое титрование, молекулярно-массовое распределение

Для цитирования: Ашуров А. И., Шерова З. У., Насриддинов А. С., Усманова С. Р., Икромии Х. И., Мухидинов З. К. Макромолекулярный состав инулина различного происхождения в концентрированном растворе // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 2. С. 279–290. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-279-290>.

Macromolecular composition of inulins of various origin in concentrated solution

Ashurboy I. Ashurov*, Zamira U. Sherova*, Abubakr S. Nasriddinov*,
Surayov R. Usmanova*, Khurshed I. Ikromi**, Zainiddin K. Muhidinov*

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

**Technological University of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan

Corresponding author: Zainiddin K. Muhidinov, zainy@mail.ru

Abstract. A research study into the molecular weight distribution of inulins of various origin was conducted to elucidate the mechanism of their self-organization in concentrated solutions. Using the conventional turbidimetric titration method based on integral and differential molecular weight distribution curves, the following inulin samples were examined: commercial girasol (A), experimental girasol (B) and experimental chicory (C). Inulin A and B samples were found to include three macromolecular fractions (isoforms), each exhibiting a narrow molecular weight distribution. An increase in inulin concentration in the solution leads to self-organization of macromolecules, resulting in a more turbid solution at the point of maximum and the appearance of new isoforms. An increase in polymer concentration in inulin A leads to an increase in the aggregates of isoforms 3 and 5. Conversely, in inulin B, aggregates dissolve making isoforms convert from high- to low molecular weights. In inulin C, all four inulin isoforms are clearly represented. An analysis of the interaction of macromolecules in a concentrated solution confirmed the applicability of turbidimetric titration for determining the molecular weight distribution of polymers, along with such costly procedures, as high-performance size exclusion liquid chromatography, ultracentrifugation and light scattering. Research into the properties of unique inulins may significantly expand the range of their practical application.

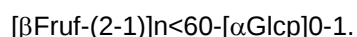
Keywords: inulin, isoforms, turbidimetric titration, molecular weight distribution

For citation: Ashurov A. I., Sherova Z. U., Nasriddinov A. S., Usmanova S. R., Ikromi Kh. I., Muhidinov Z. K. Macromolecular composition of inulins of various origin in concentrated solution. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(2):279-290. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-279-290>.

ВВЕДЕНИЕ

Известно о профилактических свойствах инулинсодержащего сырья для больных диабетом, такое сырье способно повысить иммунозащитные свойства организма человека [1–4]. Создание пищевых продуктов на основе инулинсодержащего растительного сырья позволит обеспечить население функциональным питанием диабетического характера.

Инулин – это природный полисахарид с уникальными физико-химическими свойствами, которые позволяют использовать его в пищевой и фармацевтической промышленности. Известно, что инулин представляет собой линейный полидисперсный фруктан, состоящий из молекул фруктозы, связанных β (2→1)-связями с остатками D-глюкозы в конце цепи¹ [5], что образуют смеси полисахаридов различной степени полимеризации (СП) – от 15 до примерно 60 [5]:



Полисахариды, содержащие фуранозильные

звенья, подвергаются кислотному катализируемому гидролизу намного легче, чем молекулы, содержащие пиранозильные звенья. С биологической точки зрения инулин является запасным полисахаридом, и его макромолекулы формируются на различных стадиях синтеза и, возможно, распада макромолекул в нативном виде. Другими факторами, связанными с изменением молекулярной массы инулина, являются его источник, условия выращивания, условия сбора и время хранения после сбора растений [4, 6].

Наибольшее содержание инулина обнаруживается в корнях таких растений семейства Asteraceae, как *Arctium* sp. (лопух), *Cichorium* sp. (цикорий), *Taraxacum* sp. (одуванчик), *Smilanthus* sp. (якон), *Inula* sp. (девясил) и др. В промышленных масштабах инулин получают из цикория, топинамбура и агавы [3]. Содержание инулина в цикории и топинамбуре достигает до 20–30%, в корнях одуванчика, пастернаке, овсяном корне, клубнях георгина, луке-порее – до 15%, репчатом луке – 2–6%, спарже – 10–15%, девясиле – 9–12%, и др. [3, 4, 7].

¹Meyer D., Blaauhuoed J. P. Inulin. In: Handbook of hydrocolloids. Phillips G. O., Williams P. A. (eds.). Boca Raton, CRC Press, 2009. P. 829–849.

Инулин находит широкое применение в качестве биологически активной добавки к пище как пребиотик. Потребление инулина с пищей обеспечивает создание оптимальных условий для роста и развития нормальной микрофлоры кишечника, повышенную устойчивость пищеварительной системы к бактериальным и вирусным инфекциям [3, 8–10]. Цикорийевый инулин в количестве 10–12 г в сутки улучшает стул у людей, страдающих запорами, авторы объясняют этот эффект влиянием на кишечную микрофлору [10]. Источники инулина в последнее время вызывают все больший интерес, поскольку они являются возобновляемым сырьем для производства фруктозного сиропа, одноклеточного белка, олигосахаридов и других пребиотических продуктов.

Корень цикория (*Cichorium*) в основном состоит из инулина. Инулин-пребиотик способствует росту полезных кишечных бактерий, регулирует концентрацию сахара в крови, особенно у людей с диабетом, пищевые волокна цикория могут помочь облегчить запор и увеличить частоту стула [1–3, 7].

Технология экстракции инулина из корней цикория аналогична экстракции его из корнеклубней топинамбура [11] и сахарозы из сахарной свеклы. Классическая экстракция инулина осуществляется из цикория путем обработки горячей водой. Эта процедура обычно требует длительного времени экстракции (1,5–2 ч). Первый этап очистки применяется к экстракционному соку путем известковой обработки с помощью $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при высоком значении pH. Сырой сок дополнительно очищается с использованием катионных и анионных ионообменных смол для деминерализации и активированного угля для обесцвечивания. Затем сок пропускают через фильтр 0,2 мкм для стерилизации перед выпариванием и сушат [11–13].

В природе существует несколько типов инулина, которые различаются по степени полимеризации и молекулярной массе в зависимости от источника, времени сбора и условий обработки¹ [5, 6, 14].

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 β -форму, а в водном растворе при комнатной температуре или ниже он находится в форме α -инулина [14–16]. Теоретические исследования показывают, что допустимы многие формы инулина. На практике было обнаружено, что как α -, так и β -формы являются нестабильными конформациями в воде, так как вскоре превращаются в новую третью форму (γ), которая была в значительной степени нерастворима при температуре тела. Это свойство допускает ряд сильных биологических эффектов [13] у макромолекулы инулина. Четвертая изоформа инулина –

δ -форма [15], которая еще более активна, теперь идентифицирована. Все эти изоформы растворимы в концентрациях 10–15 масс.% при температуре ниже 75 °C, что позволяет легко очищать их для клинического использования с минимальной степенью гидролиза. Структурные последствия существования таких изоформ представляют значительный интерес [15, 17]. В воде инулин претерпевает обратное превращение из более растворимой в менее растворимую форму наподобие ретроградного крахмала [18].

Большое разнообразие применений, которыми обладают фруктаны, тесно связано с их структурным и конформационным разнообразием. Фруктаны с высоким значением DP характерны для артишока (DP от 32 до 42) [9]. Фруктаны с короткой цепью (DP<10) часто называют фруктоолигосахаридами (ФОС), тогда как полимеры с длинной цепью (DP>10) обычно именуется инулином [8].

Для определения конкретного коммерческого применения определенного фруктана необходимо глубокое понимание его структуры, размера и конформации. Например, ФОС низкой степени полимеризации могут использоваться в качестве некалорийных подсластителей, но в качестве загустителей больше подходят высокоразветвленные фруктаны с высокой молекулярной массой. Синтез, химические превращения, а также разрушение макромолекулы могут быть эффективно оценены по изменению их молярной массы [19].

Исследование свойств этих уникальных по структуре инулинов может значительно расширить спектр их применения. В литературе данные по молекулярно-массовому распределению (ММР) инулинов немногочисленные [14, 20]. В связи с этим представляют интерес исследования ММР инулинов разного происхождения из местного сырья с целью дальнейшего изучения механизма их самоорганизации в разбавленном и концентрированном растворах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования использовали три образца инулина: инулин А из топинамбура (Chongqing Joywin Natural Products Co Ltd., Китай), инулин В, полученный из корнеклубней топинамбура сорта Сарват, выращенного в Республике Таджикистан по методике [12], и инулин С, извлеченный водной экстракцией по классической методике [11] из корней цикория, произрастающего в г. Душанбе, Республика Таджикистан.

Предварительно растворитель (дистиллированную воду) и осадитель (этанол) очищали пропусканием через тонкопористую мембрану (0,2 мкм, PVDF, Millipore Corp., США).

В 1-м эксперименте в 0,5 г каждого инулина добавляли по 50 мл воды и перемешивали до полного растворения. Во 2-м эксперименте в 0,75 г каждого инулина добавляли по 50 мл воды

и также перемешивали до полного растворения.

Затем растворы центрифугировали при 6000 об/мин. После удаления механических примесей и осадка концентрации растворов составили 0,99% для инулина А; 0,95% – для инулина В 1 и 2-го эксперимента; 1,47, 1,43 и 1,45% для инулинов А, В, и С соответственно 2-го эксперимента. В кювету турбидиметра добавляли по 30 мл чистого раствора инулина, постепенно добавляли осадитель (95%-й спирт) и измеряли мутность в нефелометрических единицах (NTU).

Турбидиметрическое титрование проводили на лабораторном турбидиметре 2100 AN IS (НАСН, США) при температуре $20 \pm 0,3$ °С. Сначала осуществляли предварительное грубое титрование: 30 мл раствора инулина с концентрацией 0,96% помещали на магнитную мешалку Variomag (Thermo Scientific, США) и при перемешивании титровали раствором 96%-го спирта до появления еле заметного помутнения. Замеряли объем осадителя, израсходованного на грубое титрование.

Далее проводили точное титрование. Для этого в стаканчик наливали исходный раствор инулина, соответствующий приблизительно объему измерительной ячейки, ставили на магнитную мешалку и при непрерывном перемешивании добавляли определенное количество осадителя – 96%-й этанол. После каждой порции осадителя переливали содержимое стаканчика в стандартный герметичный сосуд, который помещали в измерительную ячейку турбидиметра, и определяли мутность в NTU. Отсчеты производили при добавлении осадителя до тех пор, пока мутность раствора не перестала изменяться. Обработка полученных данных проводилась по методике, описанной в работе [21].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 1 в качестве примера приведены данные турбидиметрического титрования растворов инулина и расчет параметров для построения интегральных и дифференциальных кривых молекулярно-массового распределения образцов инулина.

Как видно из рис. 1, кривая зависимости мутности раствора инулина от объемной доли осадителя (интегральная кривая турбидиметрического титрования) имеет пологую форму, что указывает на широкое ММР макромолекул инулина А. В то же время у интегральной кривой турбидиметрического титрования образцов как инулина А, так и инулина В (рис. 2) наблюдается 2 максимума, что указывает на бимодальное и широкое ММР макромолекул образцов инулина из топинамбура.

Таблица 1. Результаты турбидиметрического титрования раствора инулина А, C=0,99%

Table 1. Results of turbidimetric titration of inulin solution A, C=0.99%

V, мл	$Y=V/V_0-V$	ΔY	1-Y	T.NTU	$T_1=T-T_0$	$T_2=T_1/1-Y$	ΔT_2	$\Delta T_2/\Delta Y$
1	0,032		0,968	2,25	0,9	0,88		
2	0,063	0,030	0,938	2,05	0,7	0,69	-0,19	-6,117
5	0,143	0,080	0,857	1,65	0,3	0,29	-0,40	-4,999
7	0,189	0,046	0,811	1,76	0,4	0,44	0,15	3,288
9	0,231	0,042	0,769	1,45	0,1	0,07	-0,38	-9,115
11	0,268	0,038	0,732	1,50	0,1	0,14	0,07	1,910
13	0,302	0,034	0,698	1,60	0,2	0,29	0,15	4,408
14	0,318	0,016	0,682	1,82	0,4	0,62	0,33	20,770
15	0,333	0,031	0,667	1,67	0,3	0,41	0,12	3,816
17	0,362	0,028	0,638	1,48	0,1	0,13	-0,28	-9,858
19	0,388	0,026	0,612	1,62	0,2	0,36	0,23	8,982
24	0,444	0,057	0,556	2,20	0,8	1,44	1,08	19,063
26	0,464	0,020	0,536	2,90	1,5	2,80	1,36	68,544
28	0,483	0,018	0,517	2,44	1,0	2,01	-0,79	-42,729
30	0,500	0,017	0,500	2,47	1,1	2,14	0,13	7,501
35	0,538	0,038	0,462	2,67	1,3	2,75	0,61	15,903
40	0,571	0,033	0,429	3,08	1,7	3,92	1,17	35,439
45	0,600	0,029	0,400	4,40	3,0	7,50	3,58	125,300

Примечание. V – объем добавленного осадителя; T – мутность раствора полимера; T_0 – мутность прозрачного раствора полимера, равная 1,55 NTU; V_0 – начальный объем раствора полимера, равный 35,23 мл; y – объемная доля осадителя; T_1 – мутность, обусловленная выделенным полимером; T_2 – мутность с поправкой на разбавление раствора.

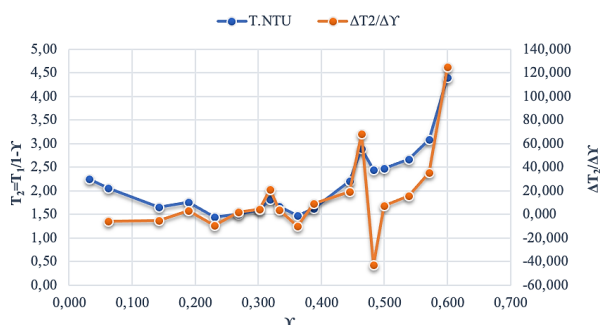


Рис. 1. Интегральная (T_2) и дифференциальная ($\Delta T_2/\Delta Y$) кривые турбидиметрического титрования раствора инулина А (концентрация инулина 0,99%)

Fig. 1. Integral (T_2) and differential ($\Delta T_2/\Delta Y$) curves of turbidimetric titration of inulin A solution (inulin concentration 0.99%)

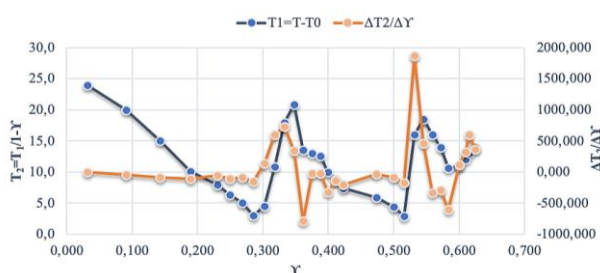


Рис. 2. Интегральная (T_2) и дифференциальная ($\Delta T_2/\Delta Y$) кривые турбидиметрического титрования раствора инулина В (концентрация инулина 0,95%)

Fig. 2. Integral (T_2) and differential ($\Delta T_2/\Delta Y$) curves of turbidimetric titration of inulin B solution (inulin concentration 0.95%)

По дифференциальным кривым турбидиметрического титрования образцов инулина А (см. рис. 1) и В (см. рис. 2) можно выявить, что у 2-х образцов инулина присутствуют 3 макромолекулярных фракции (изоформы), которые в отдельности имеют узкое ММР.

Поскольку в обоих образцах инулина наблюдались небольшие пики в профиле кривых дифференциального турбидиметрического титрования (далее – кривые ММР), было принято решение увеличить концентрацию инулина в исходном растворе.

Из профиля кривых ММР инулинов, представленных на рис. 3 и 4, четко видно 4 пика, указывающих на образование 4-х молекулярных изоформ макромолекулы инулина с увеличением его концентрации.

На основании анализа кривых ММР можно предположить, что первый небольшой пик происходит при объемной доле осадителя 0,15–0,20, во всех образцах инулин относится к высокомолекулярной фракции полисахарида и, скорее всего, принадлежит к пектину.

На рис. 5 представлены результаты турбидиметрического титрования раствора инулина С при повышенной концентрации (1,45%). Этот образец получен из цикория посредством водной

экстракции по классической методике. В данном образце проявляются только 2 пика в области низкомолекулярных фракций инулина. При этом последняя фракция показала очень высокое значение мутности, на порядок превышающее показатель мутности инулинов А и В.

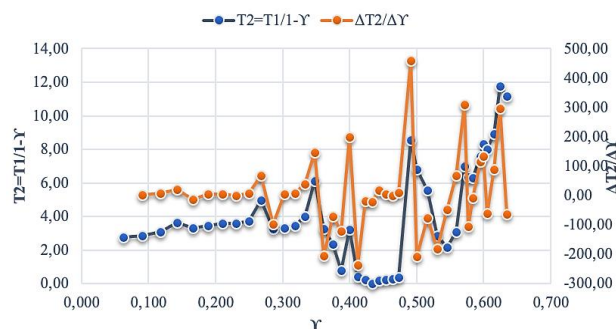


Рис. 3. Интегральная (T_2) и дифференциальная ($\Delta T_2/\Delta Y$) кривые турбидиметрического титрования раствора инулина А (концентрация инулина 1,47%)

Fig. 3. Integral (T_2) and differential ($\Delta T_2/\Delta Y$) curves of turbidimetric titration of inulin A solution (inulin concentration 1.47%)

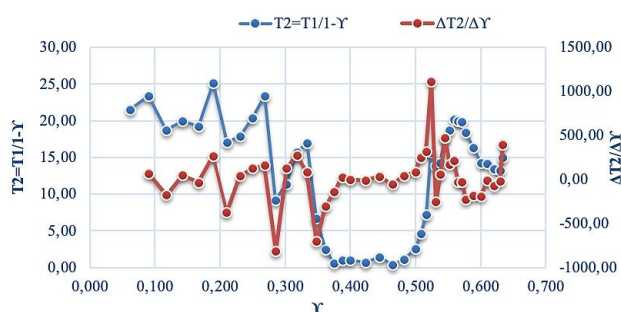


Рис. 4. Интегральная (T_2) и дифференциальная ($\Delta T_2/\Delta Y$) кривые турбидиметрического титрования раствора инулина В (концентрация инулина 1,43%)

Fig. 4. Integral (T_2) and differential ($\Delta T_2/\Delta Y$) curves of turbidimetric titration of inulin B solution (inulin concentration 1.43%)

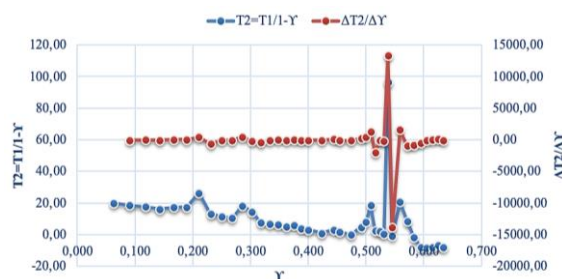


Рис. 5. Интегральная (T_2) и дифференциальная ($\Delta T_2/\Delta Y$) кривые турбидиметрического титрования раствора инулина С (концентрация инулина 1,45%)

Fig. 5. Integral (T_2) and differential ($\Delta T_2/\Delta Y$) curves of turbidimetric titration of inulin C solution (inulin concentration 1.45%)

Для более точной оценки изменения мутности в зависимости от объемной доли осадителя мы привели значения остальных максимумов (кроме начального пика) на кривых турбидиметрического титрования инулина А и В при 2-х изученных концентрациях (табл. 2–4).

Как и ожидалось, в корреляции с увеличением концентрации происходит самоорганизация макромолекул, что приводит к более мутному раствору в точке максимума (см. рис. 3, табл. 2) и появлению новых изоформ. Кроме того, было обнаружено, что полученные агрегаты более коллоидные (по значению $\Delta T_2/\Delta Y$) при более высокой начальной концентрации раствора, что также влияет на конечную морфологию макромолекулы.

Однако из анализа значений параметров в зависимости от объемной доли осадителя для инулина В наблюдается иная картина. С увеличением концентрации происходит уменьшение мутности вблизи максимумов (см. пик 3 и 5), значение T_2 заметно уменьшается для пиков 3 и 5 (20,9–17,3 NTU и 34,0–16,5 NTU соответственно). Это говорит о том, что если с увеличением концентрации полимера в инулине А происходит рост агрегатов для изоформ (пиков) 3 и 5, то в инулине В этот процесс осуществляется в обратном направлении, т.е. растворение агрегатов

и превращение изоформ с высокой молярной массой в таковых с низкими молекулярными массами.

Как видно из значения параметров мутности (см. табл. 4), в образце инулина С все 4 изоформы инулина четко выделяются, особенно превышает значение параметров мутности последняя низкомолекулярная фракция инулина – для инулина А в 40 и инулина В в 10 раз.

Изоформы инулина составляют возрастающую серию в последовательности β – α – γ – δ , в которой более низкие изоформы превращаются в более высокие при определенных температурах, и все высшие изоформы могут быть возвращены в более низкие путем полного растворения и перекристаллизации. В данном случае последовательность изоформ (β – α – γ – δ) соответствует максимумам 2–5 в обратном порядке (т.е. 5–4–3–2) в кривые ММР изученных образцов инулина.

Фруктаны смешанной структуры с высокой степенью разветвленности обеспечивают высокую растворимость в водной среде и не осаждаются при низких температурах в воде, в отличие от растворов инулина, которые нестабильны и выпадают в осадок [22].

Таблица 2. Значения параметров турбидиметрического титрования основных пиков инулина А, взятых из интегральных и дифференциальных кривых при 2-х концентрациях (в %)

Table 2. Turbidimetric titration parameters of the main peaks of inulin A taken from the integral and differential curves at 2 concentrations (in %)

Параметры ТДТ	Пик 2		Пик 3		Пик 4		Пик 5	
	0,99	1,47	0,99	1,47	0,99	1,47	0,99	1,47
γ	0,33	0,348	–	0,40	0,46	0,49	–	0,57
T_2	2,80	6,13	–	3,23	2,80	8,56	–	6,48
$\Delta T_2/\Delta Y$	20,8	147,0	–	200,0	68,5	459,0	–	308,0

Таблица 3. Значения параметров турбидиметрического титрования основных пиков инулина В, взятых из интегральных и дифференциальных кривых при 2-х концентрациях (в %)

Table 3. Turbidimetric titration parameters of the main peaks of inulin B taken from integral and differential curves at two concentrations (in %)

Параметры ТДТ	Пик 2		Пик 3		Пик 4		Пик 5	
	0,95	1,43	0,95	1,43	0,95	1,43	0,95	1,43
γ	–	0,27	0,35	0,38	–	–	0,53	0,52
T_2	–	23,3	20,9	17,3	–	–	34,0	16,5
$\Delta T_2/\Delta Y$	–	162	726,0	275,0	–	–	1865,0	1108,0

Таблица 4. Значения параметров турбидиметрического титрования основных пиков инулина С, взятых из интегральных и дифференциальных кривых при 2-х концентрациях (в %)

Table 4. Turbidimetric titration parameters of the main peaks of inulin C taken from the integral and differential curves at 2 concentrations (in %)

Параметры ТДТ	Пик 2	Пик 3	Пик 4	Пик 5
γ	0,22	0,28	0,51	0,54
T_2	26,4	19,4	18,5	96,2
$\Delta T_2/\Delta Y$	414,0	449,0	2020	13280,0

Таким образом, новые структуры образуются за счет обратимого связывания посредством водородных связей спиртовых групп, а не ковалентными связями, и более высокие изоформы имеют более высокое среднее значение молярной массы [23].

В предыдущей работе [20] были исследованы гидродинамические свойства и молекулярные массы 2-х образцов инулина топинамбура (полученные сравнительными методами: флэш-экстракционным методом (ФМ) при высокой температуре за короткое и более длительное время при традиционном методе (ТМ) в нейтральной среде) в разбавленном растворе.

Из результатов анализа ММР методом высокоэффективной эксклюзионной жидкостной хроматографии (ВЭЭЖХ) был сделан вывод о самоагрегирующих свойствах этого биополимера [20]. Как показали профили кривых ВЭЭЖХ образца инулина В, в очень разбавленном растворе (0,002%) присутствуют 2 изоформы: низкомолекулярный инулин и высокомолекулярный агрегат, представляющие собой изоформы γ и δ . При их разделении на УФ-мембране в растворе ретентата формировались, скорее всего, и другие изоформы (α и β), причем образовывалось большое количество высокоагрегированных нерастворимых в воде микрогелей. В то время как инулин, полученный ТМ способом, показал себя как макромолекула с одной изоформой, но с высокой степенью полидисперсности.

Существуют большие различия в молекулярных конформациях инулина для самых коротких олигомеров с СП ниже 9 и выше 20. Олигомеры с СП меньше 9 имеют организованные, хотя и менее четко определенные конформации. Олигомеры инулина с СП 9 и выше образуют регулярную спиральную структуру в виде 5 и 6-кратной спирали. Спиральные структуры каждой цепи могут объединяться в ряд изоформ, природа которых зависит от кинетики и термодинамики образования [14].

В работе [24] показана четкая разница между распределением молекулярных размеров 2-х фракций, полученных пропусканием раствора инулина через ультрафильтрационную мембрану. Среднечисловая (M_n) и средневесовая (M_w) молекулярные массы фракции пермеата составляли 3000 и 3221 Да соответственно. Эти значения для раствора ретентата были равны $M_n=4255$, $M_w=4629$. Средние значения СП составляли 18,4 и 26,1 соответственно для 1 и 2-й фракций.

В последнее время повышенное внимание ученых уделяется вопросам самоорганизации полисахаридов и белков [25, 26]. Эти системы нашли применение для разделения и удаления токсинов и бактерий, для распознавания опухолевых клеток и доставки инсулина, чувствительного к глюкозе [27].

Свойства самоорганизации натуральных и синтетических полимеров стремительно развиваются. Однако природные полимеры, полученные из нативных или модифицированных полисахаридов, такие как целлюлоза, хитозан, глюканы, камеди, пектины и крахмал, привлекают особое внимание в качестве сырья при производстве самоорганизующихся полимерных композиционных (СОПК) материалов, имеющих несколько форм: пленки, гидрогели, мицеллы и наночастицы [25–28]. Простота управления архитектурой СОПК материалов, а также их высокая доступность, низкая стоимость и экологичность были основными положительными моментами их использования для различных приложений. Тем не менее, с учетом их изобилия в природе углеводы остаются незамеченными молекулами в материаловедении, а их исключительные структурные свойства все еще не используются в полной мере.

Инулин, как и другие полисахариды, также богат гидроксильными группами, которые способны принимать участие в супрамолекулярных взаимодействиях, в частности через водородные связи. 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 [14, 24]. Поэтому мы исследовали инулин из различных источников в качестве полимера с промежуточной степенью полимеризации и лучшей растворимостью в воде.

Авторами [24] было 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 геометрию¹ [24].

Таким образом, инулин, неразветвленный олигосахарид с молекулярной массой от 1200 до 120 000 Да (СП 2–60 и выше), был исследован на предмет его склонности к самоорганизации в разбавленном и концентрированном растворах путем определения его ММР методами ВЭЭЖХ [20] и турбидиметрического титрования. 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 3-мерные сети образуют агрегированные коллоидные частицы инулина [5].

ВЫВОДЫ

На основе интегральных и дифференциальных кривых ММР образцов инулина (коммерческого из топинамбура (А) и двух экспериментальных – из топинамбура (В) и из цикория (С)) обнаружено, что у образцов инулина А и В присутствуют 3 макромолекулярные фракции (изоформы), которые в отдельности имеют узкое ММР. Показано, что с увеличением концентрации инулина в растворе происходит самоорганизация макромолекул, что приводит к более мутному раствору в точке максимума и появлению новых изоформ. С увеличением концентрации полимера в инулине А наблюдается рост агрегатов для изоформы 3 и 5, в инулине В, наоборот, происходит растворение агрегатов и превращение изоформ из высокой в низкие молекулярные массы. В образце инулина С все 4 изоформы инулина выделяются отчетливо.

Таким образом, данное исследование подтверждает имеющиеся в литературе гипотезы о поведении инулина в растворе с увеличением его концентрации, а именно возможность формировать агрегаты различного молекулярного веса, причем показано, что с ростом концентрации инулина в растворе могут образовываться микрогели. Анализ приведенных данных показы-

вает, что действительно существует золотая середина в структурной организации олигосахаридов. Фракции меньшего размера инулина образуют четко определенные супрамолекулярные сборки, в то время как большие фракции собираются в аморфные агрегаты – микрогели. Эти данные будут полезными при разработке и получении материалов в области нанотехнологий и материаловедения. Дальнейшие исследования по разработке композиционных материалов и наночастиц на основе инулина могут быть использованы в качестве новой системы доставки лекарств или других представляющих интерес молекул. Мы надеемся, что эта работа послужит концептуальной ступенькой на пути к превращению полисахаридов в важный класс структурированных материалов для применения в био- и нанотехнологии.

Кроме того, полученные данные показывают, что при исследовании взаимодействия макромолекул в концентрированном растворе метод турбидиметрического титрования вполне может дополнить такие дорогостоящие методы определения ММР полимеров, как ВЭЖХ, ультрацентрифугирование, светорассеивание и другие современные методы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wan X., Guo H., Liang Y., Zhou C., Liu Z., Li K., et al. The physiological functions and pharmaceutical applications of inulin: a review // *Carbohydrate Polymers*. 2020. Vol. 246. P. 116589. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116589>.
2. Afinjuomo F., Abdella S., Youssef S. H., Song Y., Garg S. Inulin and its application in drug delivery // *Pharmaceuticals*. 2021. Vol. 14. P. 855. <https://doi.org/10.3390/ph14090855>.
3. Сербяева Э. Р., Якупова А. Б., Марасумова Ю. Р., Фархутдинова К. А., Ахметова Г. Р., Кулуев Б. Р. Инулин: природные источники, особенности метаболизма в растениях и практическое применение // *Биомика*. 2020. Т. 12. N. 1. С. 57–79. <https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmc.2020-5>.
4. Carlson J. L., Erickson J. M., Lloyd B. B., Slavin J. L. Health effects and sources of prebiotic dietary fiber // *Current Developments in Nutrition*. 2018. Vol. 2, no. 3. P. 1–8. <https://doi.org/10.1093/cdn/nzy005/>.
5. BeMiller J. N. Inulin and konjac glucomannan. In: *Carbohydrate chemistry for food scientists*. Woodhead, 2019. P. 253–259. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812069-9.00010-8>.
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. Saeed M., Abd El-Hack M. E., Alagawany M., Arain M. A., Arif M., Mirza M. A., et al. Chicory (*Cichorium intybus*) herb: chemical composition, pharmacology, nutritional and healthily applications // *International Journal of Pharmacology*. 2017. Vol. 13, no. 4. P. 351–360. <https://doi.org/10.3923/ijp.2017.351.360>.
8. Dobrange E., Peshev D., Loedolff B., Van den Ende W. Fructans as immunomodulatory and antiviral agents: the case of *Echinacea* // *Biomolecules*. 2019. Vol. 9, no. 10. P. 615. <https://doi.org/10.3390/biom.9100615>.
9. Zeaiter Z., Regonesi M. E., Cavini S., Labra M., Sello G., Di Gennaro P. Extraction and characterization of inulin-type fructans from artichoke wastes and their effect on the growth of intestinal bacteria associated with health // *BioMed Research International*. 2019. Article ID 1083952. <https://doi.org/10.1155/2019/1083952>.
10. Watson A. W., Houghton D., Avery P. J., Stewart C., Vaughan E. E., Meyer P. D., et al. Changes in stool frequency following chicory inulin consumption, and effects on stool consistency, quality of life and composition of gut microbiota // *Food Hydrocolloid*. 2019. Vol. 96. P. 688–698. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.06.006>.
11. Franck A. Technological functionality of inulin and oligofructose // *British Journal of Nutrition*. 2002. Vol. 87. P. 287–291. <https://doi.org/10.1079/BJNBJN/2002550>.
12. Ашуров А. И., Джонмуродов А. С., Мухидинов З. К., Усманова С. Р., Партоев К. Интенсификация процесса получения полисахаридов из корнеклубней топинамбура // *Вестник Таджик-*

ского национального университета. Серия естественных наук. 2019. N 3. С. 208–214.

13. Gerschenson L. N., Rojas A. M., Fissore E. N. Fructose, oligofructans, and inulin. Chapter 3. In: Nutraceutical and functional food components. Galanakis Ch. M. (ed.). Waltham, MA, Elsevier Inc., 2017. P. 39–101.

14. 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.

15. Ronkart S. N., Deroanne C., Paquot M., Fougnes C., Blecker C. S. Impact of the crystallisation pathway of inulin on its mono-hydrate to hemi-hydrate thermal transition // *Food Chemistry*. 2010. Vol. 119, no. 1. P. 317–322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.035>.

16. Silva D. G., Cooper P. D., Petrovsky N. Inulin-derived adjuvants efficiently promote both Th1 and Th2 immune responses // *Immunology and Cell Biology*. 2004. Vol. 82, no. 6. P. 611–616. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1711.2004.01290.x>.

17. Dan A., Ghosh S., Moulik S. P. Physico-chemical studies on the biopolymer inulin: a critical evaluation of its self-aggregation, aggregate-morphology, interaction with water, and thermal stability // *Biopolymers*. 2009. Vol. 91, no. 9. P. 687–699. <https://doi.org/10.1002/bip.21199>.

18. Cooper P. D., Carter M. Anti-complementary action of polymorphic “solubility forms” of particulate inulin // *Molecular Immunology*. 1986. Vol. 23, no. 8. P. 895–901. [https://doi.org/10.1016/0161-5890\(86\)90075-1](https://doi.org/10.1016/0161-5890(86)90075-1).

19. Shimizu N., Abea A. Characterization of fructans by size-exclusion chromatography: a review. In: *Agricultural research updates*. Vol. 29. Gorawala P., Mandhatri S. (eds.). Nova Science Publishers Inc., 2020. P. 210–236.

20. Насриддинов А. С., Ашуров А. И., Холлов 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>.

21. Штанчаев А. Ш., Насриддинов А. С., Тешаев Х. И., Мухидинов З. К., Халиков Д. Х. Турбидиметрическое титрование зеина кукурузной муки // *Доклады Академии наук Республики Таджикистан*. 2007. Т. 50. N 9–10. С. 748–752.

22. Praznik W., Loppert R., Huber A. Analysis and molecular composition of fructans from different plant sources. In: *Recent advances in fructooligosaccharides research*. Shiomi N., Benkeblia N., Onodera S. (eds.). Kerala, Research Signpost, 2007. P. 93–117.

23. Evans M., Gallagher J. A., Ratcliffe I., Williams P. A. Determination of the degree of polymerisation of fructans from ryegrass and chicory using MALDI-TOF mass spectrometry and gel permeation chromatography coupled to multiangle laser light scattering // *Food Hydrocolloids*. 2016. Vol. 53. P. 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.015>.

24. Arnon Z. A., Grabarics M., Kreiser T., Raveh A., Pagel K., Gazit E. Inulin nanostructures: the sweet-spot of carbohydrate self-assembly // *BioRxiv*. 2021. <https://doi.org/10.1101/2021.07.13.451276>.

25. Gao C., Chen G. Exploring and controlling the polymorphism in supramolecular assemblies of carbohydrates and proteins // *Accounts of Chemical Research*. 2020. Vol. 53, no. 4. P. 740–751. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.9b00552>.

26. Ma Z., Zhu X. X. Copolymers containing carbohydrates and other biomolecules: design, synthesis and applications // *Journal of Materials Chemistry B*. 2019. Vol. 7, no. 9. P. 1361–1378. <https://doi.org/10.1039/C8TB03162B>.

27. Valencia G. A., Zare E. N., Makvandi P., Gutiérrez T. J. Self-assembled carbohydrate polymers for food applications: a review // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2019. Vol. 18, no. 6. P. 2009–2024. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12499>.

28. Gim S., Zhu Y., Seeberger P. H., Delbianco M. Carbohydrate-based nanomaterials for biomedical applications // *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*. 2019. Vol. 11, no. 5. P. 1558. <https://doi.org/10.1002/wnan.1558>.

REFERENCES

1. Wan X., Guo H., Liang Y., Zhou C., Liu Z., Li K., et al. The physiological functions and pharmaceutical applications of inulin: a review. *Carbohydrate Polymers*. 2020;246:116589. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116589>.

2. Afinjuomo F., Abdella S., Youssef S. H., Song Y., Garg S. Inulin and its application in drug delivery. *Pharmaceuticals*. 2021;14:855. <https://doi.org/10.3390/ph14090855>.

3. Serbaeva E. R., Yakupova A. B., Magasumova Yu. R., Farkhutdinova K. A., Akhmetova G. R., Kuluev B. R. Inulin: natural sources, features of metabolism in plants and practical application. *Biomika = Biomics*. 2020;12(1):57–79. (In Russian). <https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2020-5>.

4. Carlson J. L., Erickson J. M., Lloyd B. B., Slavin J. L. Health effects and sources of prebiotic dietary fiber. *Current Developments in Nutrition*. 2018;2(3):1–8. <https://doi.org/10.1093/cdn/nzy005/>.

5. BeMiller J. N. Inulin and konjac glucomannan. In: *Carbohydrate chemistry for food scientists*. Woodhead; 2019, p. 253–259. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812069-9.00010-8>.

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. Saeed M., Abd El-Hack M. E., Alagawany M., Arain M. A., Arif M., Mirza M. A., et al. Chicory (*Cichorium intybus*) herb: chemical composition, pharmacology, nutritional and healthily applications. *International Journal of Pharmacology*. 2017;13(4):351-360. <https://doi.org/10.3923/ijp.2017.351.360>.
8. Dobrange E., Peshev D., Loedolff B., Van den Ende W. Fructans as immunomodulatory and antiviral agents: the case of *Echinacea*. *Biomolecules*. 2019;9(10):615. <https://doi.org/10.3390/biom.9100615>.
9. Zeaiter Z., Regonesi M. E., Cavini S., Labra M., Sello G., Di Gennaro P. Extraction and characterization of inulin-type fructans from artichoke wastes and their effect on the growth of intestinal bacteria associated with health. *BioMed Research International*. 2019. Article ID 1083952. <https://doi.org/10.1155/2019/1083952>.
10. Watson A. W., Houghton D., Avery P. J., Stewart C., Vaughan E. E., Meyer P. D., et al. Changes in stool frequency following chicory inulin consumption, and effects on stool consistency, quality of life and composition of gut microbiota. *Food Hydrocolloid*. 2019;96:688-698. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.06.006>.
11. Franck A. Technological functionality of inulin and oligofructose. *British Journal of Nutrition*. 2002;87:287-291. <https://doi.org/10.1079/BJNBJN/2002550>.
12. Ashurov A. I., Dzhonmuradov A. S., Mukhidinov Z. K., Usmanova S. R., Partoev K. P. The intensification of the process for the polysaccharides extraction from jerusalem artichoke. *Vestnik Tadzhi-skogo natsional'nogo universiteta. Seriya estestvennykh nauk = Bulletin of the Tajik National University. Series of Natural Sciences*. 2019;(3):208-214.
13. Gerschenson L. N., Rojas A. M., Fissore E. N. Fructose, oligofructans, and inulin. Chapter 3. In: *Nutraceutical and functional food components*. Galanakis Ch. M. (ed.). Waltham, MA, Elsevier Inc.; 2017, p. 39–101.
14. 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.
15. Ronkart S. N., Deroanne C., Paquot M., Fougny C., Blecker C. S. Impact of the crystallisation pathway of inulin on its mono-hydrate to hemi-hydrate thermal transition. *Food Chemistry*. 2010;119(1):317-322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.035>.
16. Silva D. G., Cooper P. D., Petrovsky N. Inulin-derived adjuvants efficiently promote both Th1 and Th2 immune responses. *Immunology and Cell Biology*. 2004;82(6):611-616. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1711.2004.01290.x>.
17. Dan A., Ghosh S., Moulik S. P. Physico-chemical studies on the biopolymer inulin: a critical evaluation of its self-aggregation, aggregate-morphology, interaction with water, and thermal stability. *Biopolymers*. 2009;91(9):687-699. <https://doi.org/10.1002/bip.21199>.
18. Cooper P. D., Carter M. Anti-complementary action of polymorphic “solubility forms” of particulate inulin. *Molecular Immunology*. 1986;23(8):895-901. [https://doi.org/10.1016/0161-5890\(86\)90075-1](https://doi.org/10.1016/0161-5890(86)90075-1).
19. Shimizu N., Abea A. Characterization of fructans by size-exclusion chromatography: a review. In: *Agricultural research updates*. Vol. 29. Gorawala P., Mandhatri S. (eds.). Nova Science Publishers Inc.; 2020, p. 210-236.
20. Nasriddinov A. S., Ashurov A. I., Kholov S. 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>.
21. Shtanchaev A. Sh., Nasriddinov A. S., Tshaev Kh. I., Muhidinov Z. K., Khalikov D. Kh. Turbidimetric titration of corn zein. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan*. 2007;50(9-10):748-752.
22. Praznik W., Loppert R., Huber A. Analysis and molecular composition of fructans from different plant sources. In: *Recent advances in fructooligosaccharides research*. Shiomi N., Benkeblia N., Onodera S. (eds.). Kerala, Research Signpost; 2007, p. 93-117.
23. Evans M., Gallagher J. A., Ratcliffe I., Williams P. A. Determination of the degree of polymerisation of fructans from ryegrass and chicory using MALDI-TOF mass spectrometry and gel permeation chromatography coupled to multiangle laser light scattering. *Food Hydrocolloids*. 2016;53:155-162. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.015>.
24. Arnon Z. A., Grabarics M., Kreiser T., Raveh A., Pagel K., Gazit E. Inulin nanostructures: the sweet-spot of carbohydrate self-assembly. *BioRxiv*. 2021. <https://doi.org/10.1101/2021.07.13.451276>.
25. Gao C., Chen G. Exploring and controlling the polymorphism in supramolecular assemblies of carbohydrates and proteins. *Accounts of Chemical Research*. 2020;53(4):740-751. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.9b00552>.
26. Ma Z., Zhu X. X. Copolymers containing carbohydrates and other biomolecules: design, synthesis and applications. *Journal of Materials Chemistry B*. 2019;7(9):1361-1378. <https://doi.org/10.1039/C8TB03162B>.
27. Valencia G. A., Zare E. N., Makvandi P., Gutiérrez T. J. Self-assembled carbohydrate polymers for food applications: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2019;18(6):2009-2024. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12499>.
28. Gim S., Zhu Y., Seeberger P. H., Delbianco M. Carbohydrate-based nanomaterials for biomedical applications. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*. 2019;11(5):1558. <https://doi.org/10.1002/wnan.1558>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

А. И. Ашуров,
научный сотрудник,
Институт химии им. В. И. Никитина
Национальной Академии наук Республики
Таджикистан,
734065, г. Душанбе, ул. Айна, 299/2,
Республика Таджикистан,
ashurboy_1593@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4881-6944>

З. У. Шерова,
докторант лаборатории химии
высокомолекулярных соединений,
Институт химии им. В. И. Никитина
Национальной Академии наук Республики
Таджикистан,
734065, г. Душанбе, ул. Айна, 299/2,
Республика Таджикистан,
sh.zamira_95@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0387-6297>

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

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. Айна, 299/2,
Республика Таджикистан,
surayo.usmanova@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4254-7699>

Х. И. Икромӣ,
к.х.н., ведущий научный сотрудник,
Таджикский технологический университет,
734061, г. Душанбе, ул. Н. Карабоева, 63/6,
Республика Таджикистан,
x_teshaev@yahoo.com
<https://orcid.org/0000-0001-8845-1778>

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,

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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>

Zamira U. Sherova,
Doctoral Student,
Laboratory of Chemistry of Biopolymers,
V. I. Nikitin Institute of Chemistry,
National Academy of Sciences of Tajikistan,
299/2, Aini St., 734063, Dushanbe, Tajikistan,
sh.zamira_95@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0387-6297>

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>

Surayo 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>

Khurshed I. Ikromi,
Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher,
Technological University of Tajikistan,
63/6, Karabaev St., 734061, Dushanbe,
Tajikistan,
x_teshaev@yahoo.com
<https://orcid.org/0000-0001-8845-1778>

Zainiddin K. Muhidinov,
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

734065, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2,
Республика Таджикистан,
zainy@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0023-2229>

<https://orcid.org/0000-0002-0023-2229>

Вклад авторов

А. И. Ашуров – проведение экспериментов;
обработка полученных данных.
З. У. Шерова – проведение экспериментов;
обработка полученных данных.
А. С. Насриддинов – научное руководство;
обработка полученных данных.
С. Р. Усманова – концепция исследования;
доработка текста.
Х. И. Икромӣ – концепция исследования.
З. К. Мухидинов – научное руководство;
концепция исследования; развитие
методологии; итоговые выводы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

*Поступила в редакцию 13.01.2022.
Одобрена после рецензирования 16.05.2022.
Принята к публикации 30.05.2022.*

Contribution of the authors

Ashurboi I. Ashurov – methodology, investigation;
data interpretation.
Zamira U. Sherova – methodology, investigation;
data interpretation.
Abubakr S. Nasriddinov – supervision;
investigation; data interpretation.
Surayo R. Usmanova – formal analysis,
text writing and editing.
Khurshed I. Ikromi – formal analysis
and investigation.
Zainiddin K. Muhidinov – supervision,
conceptualization, methodology; text writing,
reviewing and editing.

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.*

Information about the article

*The article was submitted 13.01.2022.
Approved after reviewing 16.05.2022.
Accepted for publication 30.05.2022.*