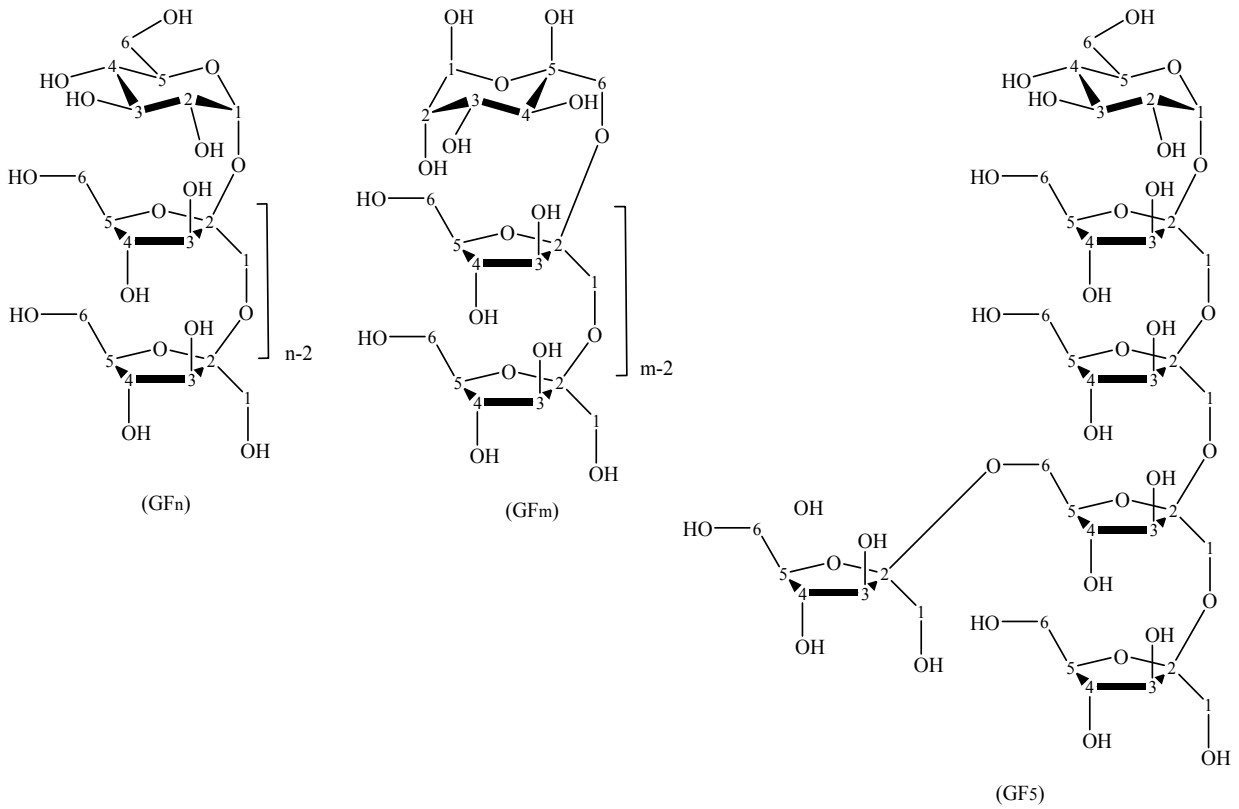
УДК 612.396.114:663:542

ИНУЛИН ИЗ ТОПИНАМБУРА: БИОСИНТЕЗ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ

В.Н. Леонтьев, В.В. Титок*, Д.А. Дубарь*, О.С. Игнатовец, В.Г. Лугин, Е.В. Феськова
Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Республика Беларусь
**Государственное научное учреждение «Центральный ботанический сад НАН Беларуси», Минск, Республика Беларусь*

Введение

Инулин $(C_6H_{10}O_5)n$ представляет собой полидисперсный по степени полимеризации фруктан, смесь олигомеров и полимеров фруктозы, который содержится во многих семействах растительного мира, охватывающих в общей сложности более 3600 видов [1]. Функционально, инулин является углеводным энергетическим резервом у многих растений. Структура указанного биополимера может быть представлена в виде формулы GFn (рисунок 1).



G - глюкозная единица, F – фруктозная единица, n,m – число фруктозных единиц
Рисунок 1 – Химическая структура полидисперсных фруктанов

Основной G – тример в составе инулина – это 1-кестоза, т.е. сахароза, к которой посредством β(2→1) связи присоединена фруктозная единица. Последующие фруктозные единицы присоединены аналогичными связями. Инулин также содержит небольшие количества фруктанов, в которых глюкозное звено отсутствует (F_m). Обзор различных литературных источников позволяет сделать вывод, что степень полимеризации растительного инулина варьируется от 2 до 100, при этом длина цепи и дисперсность зависят от вида растения, его вегетационного периода и климатических условий [2]. Так, в инулине, выделенном из цикория, степень полимеризации изменяется в пределах от 2 до 60, причем большая часть молекул углевода имеет степень полимеризации 20. Что касается

полифруктанов, выделенных из топинамбура, то есть сведения, что 3-5% их фракций имеют степень полимеризации до 85 единиц [2]. Данный факт указывает на преимущество инулина топинамбура по сравнению с другими растительными источниками, поскольку полимер имеет более длинную молекулярную цепочку, в которую можно "вшивать" различные химические структуры с фармацевтическими свойствами.

Общеизвестно, что инулин является достаточно распространённым в природе полисахаридом. Многие фрукты и овощи, широко потребляемые в современном питании, содержат большое количество инулина (таблица 1).

Таблица 1 – Содержание инулина в растительных источниках [3]

Источник	Содержание сухих веществ,%	Содержание инулина,%
Клубни топинамбура	19–23	14–19
Корень цикория	20–25	15–20
Корень одуванчика	50–55	12–15
Чеснок	40–45	9–16
Лук-порей	15–20	3–10
Репчатый лук	6–12	2–6
Ячмень	не определено	0,5–1,5
Рожь	88–90	0,5–1,0
Банан	24–26	0,3–0,7

Однако промышленное значение имеют лишь те источники, которые позволяют получать инулин с самой низкой себестоимостью и по простой технологии. Производство данного фруктанта для пищевых целей было начато в Германии в 1927 г. Ряд немецких заводов получали инулин из цикория, причем способ производства был аналогичен производству сахара из сахарной свеклы. В настоящее время на мировом рынке присутствует в основном инулин, выделенный из корня цикория (производители - Голландия, Бельгия). Однако все больший удельный вес по объемам производства в мире занимает инулин, выделенный из клубней топинамбура (производитель – Китай). Это связано с тем, что топинамбур достаточно легко культивируется, растение не страдает никакими сельскохозяйственными заболеваниями, в отличие от цикория. Поэтому при возделывании топинамбура не используются пестициды, а удобрения минимальны, что в результате позволяет получать экологически чистое сырье.

Попытки исследовать биологические свойства инулина начались еще в 19 веке и продолжаются до настоящего времени. Одним из направлений исследований является применение инулина в качестве добавки при производстве диабетических продуктов питания. Установлено, что углевод хорошо переваривается и усваивается больными сахарным диабетом в больших дозах и на протяжении длительного времени, при этом он не влияет на уровень глюкозы и инсулина в крови. Включение в рацион инулина оказывает такие положительные эффекты как понижение уровня pH в кишечнике, образование летучих жирных кислот и др. [4]. Кроме того, инулин является низкокалорийным углеводом, что может быть использовано в питании пациентов, стремящихся ограничить потребление калорий. Важнейшей областью исследований является изучение влияния данного фруктана на состав и активность кишечной флоры. Отмечено, что инулин и олигофруктоза

избирательно поддерживают рост бифидобактерий кишечника, являясь для них питательной средой. Таким образом, инулин может быть использован в рецептурах молочных, кондитерских, хлебобулочных и других пищевых продуктов в качестве добавки, улучшающей вкусовые и дтетические свойства. Однако, как показал обзор литературы, большинство исследований проводилось для изучения биологических свойств инулина из корня цикория [5-8]. Промышленный потенциал топинамбура только в последние два десятилетия стал объектом изучения ученых Китая, России, США и др. Интерес к данной культуре вызван не только высокой продуктивностью и возможностью многоцелевого использования, но и тем, что к настоящему времени в некоторых странах уже разработаны технологии производства из надземной массы и клубней топинамбура фитопрепаратов, биологических активных добавок, продуктов функционального питания, биокорректоров, биоэтанола и другой продукции. Многие виды такой продукции сегодня оцениваются, как импортозамещающие и экспортно-ориентированные, что имеет принципиальное значение для развития экономики Республики Беларусь. Помимо инулина, в клубнях топинамбура содержатся витамины, незаменимые аминокислоты, минеральные элементы, пектин, и другие ценные компоненты.

Говоря о свойствах инулина топинамбура, необходимо учитывать реакции, протекающие в клетках растений и лежащие в основе его биосинтеза. Исходным соединением в биосинтезе инулина является сахароза (рисунок 3), что объясняет присутствие одного остатка глюкозы в полимере.

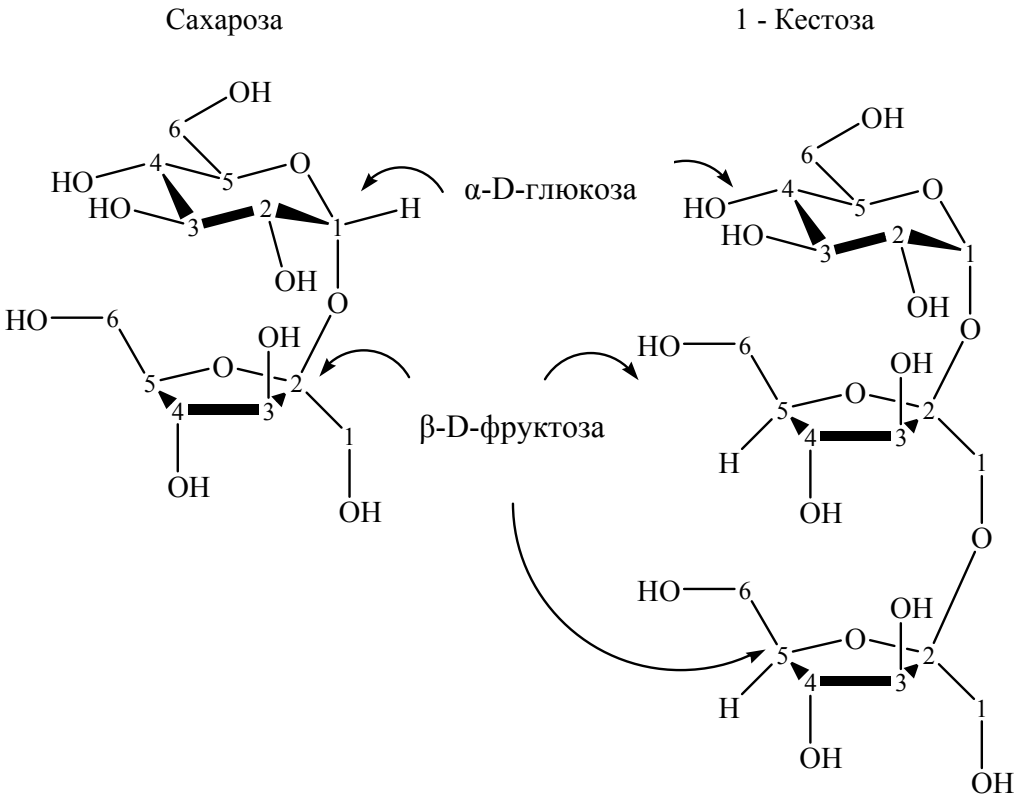


Рисунок 2 – Начальная стадия биосинтеза инулина в клетках растений

Данный полисахарид, согласно современной модели, синтезируется в клубнях топинамбура в два этапа. На первом этапе под воздействием сахароза-сахароза-фруктозилтрансферазы (1-SST) из двух молекул сахарозы образуется глюкоза и 1-кестоза (трисахарид, состоящий из одного остатка глюкозы и двух остатков фруктозы). На втором этапе фермент фруктан-фруктан-фруктозилтрансфераза (1-FFT) переносит остаток фруктозы от 1-кестозы (или более крупных фруктанов) к сахарозе или другим фруктанам. В результате

повторения второго этапа n количества раз образуется инулин со степенью полимеризации n+1 [9]. Таким образом, элементами биохимического состава, непосредственно участвующими в синтезе инулина, влияющими на его накопление и продуктивность биомассы, является концентрация сахарозы в клетках клубней и активность 1-SST и 1-FFT. Причем большая концентрация сахарозы является необходимым условием для более быстрого накопления инулина.

Результаты и обсуждение

Коллекция топинамбура ботанического сада насчитывает более 24-х сортообразцов топинамбура и постоянно расширяется. В коллекции представлены сорта различной селекции – российской, белорусской, украинской, французской и немецкой. Часть сортов и образцов получена по делектусу, часть – привезена из заграницы и в результате экспедиций по территории Беларуси. Среди представленных в коллекции сортов топинамбура был проведен отбор наиболее перспективных по технологичности возделывания и уборки, продуктивности клубней и содержанию сухих веществ. Для изучения и определения содержания биологически активных соединений отобраны 11 сортов: Диетический, Violet de Rennes, Бланк Брекос, Гигант, Сиреники 2, Киевский белый, Находка, Интерес, Скороспелка, Канадский и Французский.

Таблица 2 - Высота растений, продуктивность надземной массы и клубней коллекционных сортов топинамбура

Сорт	Средняя высота на конец вегетации, м	Средняя масса надземной части растения, кг	Количество клубней с 5 растений, шт.	Средний урожай клубней с растения, кг	Урожай клубней в сыром весе, ц/га
Диетический	2,56±0,04	1,266±0,22	76	0,508±0,22	290,28
Violet de Rennes	2,46±0,06	1,036±0,10	68	0,446±0,20	254,86
Бланк Брекос	1,89±0,07	0,268±0,03	215	1,646±0,35	940,57
Гигант	2,77±0,06	1,158±0,09	208	1,738±1,29	993,15
Сиреники-2	2,60±0,06	1,030±0,16	272	1,538±0,47	878,86
Киевский белый	2,69±0,06	1,226±0,33	252	2,140±,22	1 222,86
Находка	1,95±0,09	1,312±0,10	236	1,752±1,38	1 001,14
Интерес	3,08±0,05	1,310±0,17	170	1,140±0,06	651,43
Скороспелка	2,44±0,06	1,180±0,20	125	0,828±0,24	473,14
Канадский	2,94±,16	1,530±0,37	160	1,300±0,42	742,86

Средняя высота растений отдельных сортов достигала трех метров (сорт Интерес), по продуктивности надземной биомассы выделился сорт Канадский – средняя высота растений составила 2,94 метра, а средняя масса растений – более 1,5 килограммов. Наибольшую урожайность клубней показали сорта Киевский белый – 1223 ц/га и Находка – 1001 ц/га. Статистический анализ полученных данных показал, что наиболее стабильный показатель – высота растений, а урожайность надземной биомассы и клубней являются вариабельными. Стандартное отклонение по высоте растений по выборке составило от 1,62% у сорта Интерес до 5,44% у сорта Канадский. Наименее вариабельным сортом по показателю «надземная биомасса» является сорт Находка (7,62%) а наиболее вариабельным – сорт Киевский белый (26,92%). По урожайности клубней с растения все сорта, за исключением сорта Интерес (5,26%), показали высокий уровень вариабельности – от 21,26% у сорта Бланк Брекос, до 74,22% у сорта Гигант. Анализ полученных данных показал, что наиболее стабильным сортом топинамбура для получения устойчивых урожаев клубней является сорт Интерес.

Для определения наиболее удобной и точной методики количественного определения инулина в клубнях топинамбура нами были проанализированы литературные источники по современным методам анализа растительных полисахаридов. В результате был адаптирован метод термогравиметрии для микроанализа содержание инулина в высушенных клубнях топинамбура. Термогравиметрический анализ образцов клубней топинамбура проводили на термоанализаторе TA-4000 (Mettler Toledo STARe System, Швейцария). Исследование образцов проводили в интервале 25-700°С при скорости нагревания 5°С/мин. Результаты компонентного состава клубней топинамбура исследуемых сортов представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Содержание влаги и сухого остатка в свежих клубнях, инулина и зольного остатка в пересчете на сухое вещество в сортах топинамбура

Сорт	Влага, %	Сухой остаток, %	Инулин в пересчете на сухое вещество, %	Зольный остаток в пересчете на сухое вещество, %
Диетический	78,29±0,45	21,71±0, 14	35,42±0,31	6,11±0,11
Violet de	79,53±0,21	20,47±0,20	34,45±0,19	8,20±0,17
Бланк Брекос	77,95±0,32	22,05±0,17	36,30±0,42	3,74±0,10
Гигант	78,10±0,34	21,90±0,19	35,87±0,26	7,35±0,20
Сиреники-2	76,56±0,41	23,44±0,11	58,61±0,78	9,21±0,23
Киевский	77,44±0,29	22,56±0,29	35,06±0,39	5,47±0,15
Находка	79,14±0,33	20,86±0,23	35,24±0,18	5,06±0,13
Интерес	79,23±0,40	20,77±0,25	33,75±0,26	7,24±0,24
Скороспелка	78,65±0,52	21,35±0,19	33,49±0,32	6,14±0,14
Канадский	77,85±0,37	22,15±0,14	33,79±0,16	6,14±0,18
Французский	76,45±0,35	23,55±0,28	34,47±0,36	7,18±0,28

Сравнительный анализ ТГА-ДСК-кривых изученных сортов топинамбура показал примерно одинаковое процентное содержание влаги (76,45-79,53%) и сухого остатка (20,47-23,55%) в свежих клубнях топинамбура. Содержание инулина в лиофилизированных клубнях также не сильно отличалось (33,49-36,30%) за исключением сорта Сиреники-2 (58,61), а количество зольного остатка в клубнях варьировалось от 3,74 до 9,21%. Ранее, нами было определено содержание микроэлементов в зольном остатке клубней топинамбура исследуемых сортов [10]. Таким образом, сорта Сиреники-2 и Violet de Rennes можно рекомендовать для получения различных типов добавок с высоким содержанием инулина.

Выводы

Топинамбур, как источник инулина, в последние десятилетия выходит на лидирующие позиции в мировом производстве, создавая конкуренцию цикорию и другим культурам. В тоже время, топинамбур является неприхотливым в плане возделывания растением, практически не требует применения пестицидов, что положительно сказывается на стоимости и качестве произведенных из него продуктов. Технология производства инулина из топинамбура привлекательна еще тем, что в этой культуре, в отличие от цикория, содержатся еще и пектиновые вещества. Поэтому, учитывая рентабельность производства, нужно отметить, что топинамбур представляет больший экономический интерес для Республики Беларусь. С этой точки зрения, необходима разработка комплексной технологии переработки и извлечения всех ценных компонентов клубней и наземной части топинамбура. В настоящее время, российские ученые ведут активные исследования в данной области и предлагают постадийный процесс переработки клубней топинамбура – на первой стадии можно получать инулин экстракцией из горячего водного раствора, затем в остатке

выделяются пектиновые вещества, содержание которых составляет 1,5 процента сырой массы – больше, чем в некоторых сортах яблок [11]. На последней стадии получается клетчатка и пищевые волокна. Поскольку процесс переработки топинамбура протекает в три стадии, пищевые волокна получаются очищенными от минеральных веществ и имеют очень полезные свойства, в отличие от волокон из отрубей и зерновых культур.

Таким образом, биологический потенциал топинамбура может быть использован в фармацевтической и пищевой промышленности для производства пищевых добавок, биокорректоров, лекарственных средств и других видов продукции.

Список литературы

1. Inulin – a versatile polysaccharide with multiple pharmaceutical and food chemical uses / T. Barclay [et al.] // J. Excipients and Food Chem. – 2010. – Vol. 3, № 1. – P. 27–50.

2. French, A.D. Chemical and physical properties of fructans / A.D. French // Journal Of Plant Physiology. – 1989. – Vol. 134. – P. 125–136.

3. Inulin and oligofructose in the western diet / J. Van Loo [et al.] // Food Science and Nutrition. – 1995. – Vol. 35, № 6. – P. 525–552.

4. Roberfroid, M. Proprietes et interet nutritional de l´inuline et de l´ oligofructose / M. Roberfroid // Nouvelles de la science et des technologies. – 1991. – Vol. 9, № 1. – P. 51–54.

5. Stevens, C.V. Chemical Modification of Inulin, a Valuable Renewable Resource, and Its Industrial Applications / C.V. Stevens, A. Meriggi. K. Booten // Biomacromolecules. – 2001. – Vol. 2. – P. 1–16.

6. Dan, A. Physicochemical Studies on the Biopolymer Inulin: A Critical Evaluation of Its Self-Aggregation, Aggregate-Morphology, Interaction with Water, and Thermal Stability / A. Dan, S. Ghosh, S.P. Moulik // Biopolymers. – 2009. – Vol. 91. – P. 687–699.

7. Fuchs, A. Potentials for Non-Food Utilization of Fructose and Inulin / A. Fuchs // Starch-Starke.- 1987. – Vol. 39. – P. 335–343.

8. Roberfroid, M.B. Introducing Inulin-Type Fructans / M.B. Roberfroid // British Journal Of Nutrition. – 2005. – Vol. 93. – P. 13–25. 93.

9. Purification and Characterization of the Enzymes of Fructan Biosynthesis in Tubers of Helianthus tuberosus Colombia (II. Purification of Sucrose:Sucrose 1-Fructosyltransferase and Reconstitution of Fructan Synthesis in Vitro with Purified Sucrose:Sucrose 1-Fructosyltransferase and Fructan:Fructan 1-Fructosyltransferase) / A.J. Koops [et al.] // Plant Physiology. – 1996. – Vol. 110. – P. 1167-1175.

10. Биологический потенциал топинамбура как исходного сырья для пищевой и фармацевтической промышленности // Титок В.В. и др., / Труды БГТУ. – 2014. – № 4: Химия, технология орган. в-в и биотехнология. – С. 187-193.

11. Кочнев, Н.К. Топинамбур – биоэнергетическая культура XXI века / Н.К. Кочнев, М.В. Калиничева. – М.: Арес, 2002. – 76 с.