

УДК 615.322+581.192

СОДЕРЖАНИЕ И ДИНАМИКА ФРУКТОЗОСОДЕРЖАЩИХ УГЛЕВОДОВ У ВИДОВ СЕМЕЙСТВА CAMPANULACEAE JUSS. (КОЛОКОЛЬЧИКОВЫЕ)

© Е.С. Васфилова*, Т.А. Воробьева

Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, 202а, Екатеринбург, 620144,
Россия, euvas@mail.ru

Исследованы особенности накопления фруктозосодержащих углеводов (фруктанов) в подземных органах восьми видов сем. Campanulaceae Juss. Для 7 из 8 изученных видов показано высокое накопление фруктозосодержащих углеводов, в первую очередь с высокой степенью полимеризации – полифруктанов (от 35–40 до 50%). Это сопоставимо с содержанием фруктанов у видов сем. Asteraceae, наиболее богатых этими соединениями, либо превышает его. Количество полифруктанов у всех изученных видов было минимальным в период весеннего отрастания, а затем достоверно возрастало во время интенсивного роста и бутонизации. Таким образом, периоды активного роста и накопления фруктанов шли одновременно, а не разделялись во времени. Это резко отличает данные виды от изученных нами ранее представителей других семейств класса Двудольные (Magnoliopsida) – Asteraceae и Boraginaceae, у которых процессы роста и накопления фруктанов не совпадали во времени. Индекс полимеризации фруктанов у изученных видов сем. Campanulaceae весьма высок на протяжении всего вегетационного сезона. Во время плодоношения – начала отмирания надземной части он варьирует в пределах 0.85–1.0. Это отличает их от ранее изученных нами видов других семейств, у которых индекс полимеризации заметно снижался во время активного роста и бутонизации. Таким образом, виды сем. Campanulaceae представляют, по-видимому, большой теоретический и практический интерес как перспективные источники фруктозосодержащих углеводов.

Ключевые слова: *Campanula*, *Codonopsis*, *Platycodon grandiflorus*, фруктозосодержащие углеводы, инулин.

Для цитирования: Васфилова Е.С., Воробьева Т.А. Содержание и динамика фруктозосодержащих углеводов у видов семейства Campanulaceae Juss. (Колокольчиковые) // Химия растительного сырья. 2025. №3. С. 124–132. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250316406>.

Введение

Фруктозосодержащие углеводы (фруктаны) являются запасными питательными веществами примерно у 15% видов покрытосеменных растений [1, 2]. Помимо этого, они играют важную роль в жизни растений, выступают как антиоксиданты, осморегуляторы, стабилизаторы клеточных мембран и биологических макромолекул и повышают, в связи с этим, их устойчивость к стрессовым воздействиям окружающей среды [3, 4]. Эти соединения также активно используются в медицине, обладают широким спектром фармакологического действия (пребиотическим, иммуностимуляторющим, гипогликемическим и т.д.), используются для производства различных лекарственных препаратов, биологически активных добавок, функциональных продуктов питания [5, 6].

Фруктаны представляют собой полимерные соединения, построенные на основе молекул фруктозы; в небольшом количестве большинство фруктанов содержат также молекулы глюкозы. В связи с этим в научных публикациях используется термин «глюкофруктаны». Молекулы, содержащие от 1 до 10 мономеров, относят к олигофруктанам (низкомолекулярным фруктанам), а включающие более десяти мономеров – к полифруктанам (высокомолекулярным фруктанам).

В литературе есть данные о распространении видов, содержащих фруктаны, среди покрытосеменных растений. Так, G.A.F. Hendry [7] приводил список 10 крупных семейств (включающих более 50 родов), в которых присутствуют виды, накапливающие фруктаны; в их числе указано и сем. Campanulaceae. Доминирующими являются семейства Asteraceae (Compositae) и Poaceae (Gramineae) [8, 9]. О том, что

* Автор, с которым следует вести переписку.

фруктансодержащие виды характерны для сем. Campanulaceae, упоминают также С.Ж. Pollard, K.S. Amuti [10], M. Versluys et al. [11].

Среди видов сем. Campanulaceae широко используется *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf. в связи с особенностями его фитохимии и значительной биологической активностью [12]. Основными биологически активными компонентами сырья, определяющими его интенсивное использование, являются фруктаны [13]. Корни кодонопсиса (*Codonopsis Radix*) входят в Китайскую Фармакопею (Chinese Pharmacopoeia, изд. 2010 г.), используются в традиционной медицине при заболеваниях желудочно-кишечного тракта, гипертонии, обладают иммуностимулирующим и антиоксидантным действием [12, 14, 15].

В традиционной китайской медицине также широко применяется *Platycodon grandiflorus* (Jacq.) A.DC. Содержащиеся в его сырье фруктаны обладают пребиотической, иммуномодулирующей, противоопухолевой, гепатопротекторной, противодиабетической, антиоксидантной активностью [16, 17]. Подземные органы этого вида используются в пищу, применяются в ветеринарии, виноделии, косметике и др.

Многие виды рода *Campanula* L. обладают декоративными свойствами и используются в фитодизайне.

Содержание фруктанов в различных органах растений значительно меняется в течение вегетационного сезона. Во время весеннего отрастания надземных побегов обычно происходит гидролиз и соответствующая деполимеризация высокомолекулярных фруктанов в подземных органах. Это приводит к накоплению низкомолекулярных фруктанов, представляющих собой легко доступный источник энергии для дальнейшего роста и развития, так как они хорошо растворимы в воде, легко переходят из апопласта в ксилему, что обеспечивает определенное преимущество по сравнению с растениями, запасающими крахмал [18, 19]. Накопление фотоассимилятов в течение вегетационного периода, как правило, приводит к увеличению содержания высокомолекулярных фруктанов и их депонирования в подземных органах растений в качестве запасных питательных веществ [20, 21]. Однако сезонная динамика и интенсивность накопления фруктанов может существенно различаться у разных видов [18, 22, 23]. Сезонные изменения содержания олиго- и полифруктанов могут быть также одним из механизмов, обеспечивающих адаптацию растений к окружающей среде и защиту от ее неблагоприятных воздействий [18].

Изучение содержания и динамики фруктозосодержащих углеводов в растительном сырье в течение вегетационного сезона имеет значение для более полного представления о процессах их биосинтеза в зависимости от внутренних и внешних факторов. Кроме того, для видов, имеющих практическое применение, оно дает возможность выявить оптимальные сроки заготовки растительного сырья, наиболее богатого этими соединениями.

Цель данного исследования – изучение содержания и особенностей динамики низко- и высокомолекулярных фруктанов у ряда видов сем. Campanulaceae, распространенных в различных регионах. Некоторые из них довольно широко применяются в качестве лекарственных и декоративных растений.

Экспериментальная часть

Работа проводилась на базе коллекции лекарственных и пряно-ароматических растений Ботанического сада УрО РАН. Материал для анализа собирали в 2020–2024 гг. от растений, выращенных в открытом грунте, находившихся в генеративном возрастном периоде. Анализировали подземные органы растений. Изучены следующие виды сем. Campanulaceae: *Campanula glomerata* L. – колокольчик скученный, *C. latifolia* L. – к. широколистный, *C. persicifolia* L. – к. персиколистный, *C. punctata* Lam. – к. точечный, *C. rapunculoides* L. – к. рапунцелевидный, *C. trachelium* L. – к. крапиволистный, *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf. – колокольчик (кодонопсис) мелковолосистый, *Platycodon grandiflorus* (Jacq.) A.DC. – ширококолокольчик крупноцветковый. (Названия видов приведены по "Plants of the World Online" [24]). Для всех видов изучена сезонная динамика накопления фруктозосодержащих углеводов; сбор материала проводили в фенофазы отрастания надземных побегов, активного роста и бутонизации, массового цветения, плодоношения – начала отмирания надземной части.

Для каждого образца брали усредненную пробу от 5–7 особей, измельчали до частиц размером 7–10 мм, выдерживали в течение 30 мин. при температуре 100 °C для инактивации ферментов и предотвращения преждевременного гидролиза полифруктанов. Затем пробы досушивали до воздушно-сухой массы при 60 °C. Перед анализом сухой материал дополнительно измельчали и отбирали навески по 300 мг.

Для количественного определения фруктанов применяли методику Д.Н. Оленникова, Л.М. Танхәевой [25] с небольшими модификациями. Выделяли две фракции – низкомолекулярных фруктанов (GF_L) и

высокомолекулярных фруктанов (GF_H). Для выделения первой фракции проводили трехкратную экстракцию сырья 95% этиловым спиртом при 80 °C (в течение 30, 15, 15 мин), используя хорошую растворимость низкомолекулярных фруктанов в концентрированном этаноле, в отличие от высокомолекулярных фруктанов. Затем извлечение упаривали досуха и остаток растворяли в дистиллированной воде. Из оставшегося сырья трижды (по 60 мин) экстрагировали водой при 100 °C высокомолекулярные фруктаны. Для обеих фракций проводили гидролиз до фруктозы с помощью концентрированной хлористоводородной кислоты в течение 8 мин при 100 °C. Содержание фруктозы определяли на спектрофотометре SPECORD 50 «Analytik Jena» по реакции с резорцином. Анализы проводили в трех повторностях.

Содержание низко- и высокомолекулярных фруктанов рассчитывали в процентах на воздушно-сухую массу. Определяли также индекс полимеризации фруктанов, который рассчитывали по формуле $GF_H / (GF_L + GF_H)$.

Достоверность различий в содержании как низкомолекулярных, так и высокомолекулярных фруктанов в разные фенофазы для каждого изученного вида оценивали методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с использованием программы STATISTICA for Windows 10.0. Использовали также ранговый критерий Краскела-Уоллиса, представляющий собой непараметрическую альтернативу однофакторного дисперсионного анализа (позволяющий обрабатывать выборки малого объема, с неизвестным типом распределения). Различия признавали статистически достоверными, если они подтверждались и параметрическим, и непараметрическим методами.

Обсуждение результатов

Как показали наши исследования, почти для всех изученных видов данного семейства характерно очень высокое накопление в подземной части высокомолекулярных фруктанов (табл. 1). Самым большим содержанием этих соединений отличаются *Platycodon grandiflorus* (единственный вид монотипного рода), *Codonopsis pilosula*, *Campanula trachelium*: 43.2–51.0%. Последний вид имеет евроазиатский ареал, распространяется почти по всей Европе, в Малой Азии, на юге Западной Сибири. Два первых вида распространены в восточной и юго-восточной части Азиатского континента. Высокое содержание полифруктанов характерно для *Campanula punctata*, распространенного также в Восточной Азии, в частности, на Дальнем Востоке России, и евроазиатских видов *C. glomerata*, *C. latifolia*, *C. rapunculoides* (табл. 1). И даже у *Campanula persicifolia*, вида с наиболее низким содержанием высокомолекулярных фруктанов, их содержание в период плодоношения – начала отмирания надземной части составляет около 20%.

Ранее мы уже отмечали, что у *Platycodon grandiflorus*, *Codonopsis pilosula*, *Campanula rapunculoides*, *C. latifolia* содержание в подземных органах высокомолекулярных фруктанов достоверно больше, чем у богатых фруктанами видов сем. Asteraceae (*Cichorium intybus* L., *Echinacea pallida* (Nutt.) Nutt., *Petasites hybridus* (L.) G. Gaertn., B. Mey. & Scherb., *Tussilago farfara* L.) и сем. Boraginaceae Juss. (*Lithospermum officinale* L.); оно сопоставимо с их содержанием у *Sympyrum officinale* L. – другого вида сем. Boraginaceae [26, 27]. У всех изученных нами видов сем. Campanulaceae, за исключением *Campanula persicifolia*, количество этих соединений близко к их содержанию у видов сем. Asteraceae, наиболее богатых фруктанами, по литературным данным: *Helianthus tuberosus* L., *Taraxacum officinale* F.H.Wigg. *Inula helenium* L. [8. 28–33] (табл. 2). Следует отметить, что концентрация высокомолекулярных фруктанов у вышеупомянутых видов Campanulaceae заметно превышает, по нашим данным [26], их содержание в корнях *Cichorium intybus* L., который в европейских странах широко используется как источник полифруктанов [34].

Изучение сезонной динамики накопления полифруктанов показало, что их количество у всех видов было минимальным в период весеннего отрастания побегов: 0.5–19.5%, но у *Platycodon grandiflorus* даже в этой фенофазе содержалось $32.1 \pm 0.9\%$ полифруктанов. Затем количество этих соединений сильно, статистически достоверно возрастало во время их интенсивного роста и бутонизации (рис. 1). Вероятно, рост и развитие растений в этот период не были связаны с гидролизом полифруктанов в подземных органах, а обеспечивались за счет значительного синтеза низкомолекулярных углеводов в ходе активной фотосинтетической деятельности. Это также способствовало полимеризации избытка олигофруктанов.

Таким образом, накопление фруктанов у видов Campanulaceae шло одновременно с периодом активного роста, данные процессы не разделялись во времени. Это резко отличает данные виды Campanulaceae от изученных нами ранее некоторых представителей других семейств класса Двудольные (Magnoliopsida) – Asteraceae и Boraginaceae. У последних наблюдалась противоположная направленность процессов роста и

накопления фруктанов: отмечалось сильное сокращение количества высокомолекулярных фруктанов от начала отрастания (28.0–39.3%) ко времени активного роста – до 0–27.7%. [27]. Подобная закономерность характерна также для изученных нами видов рода *Allium* L. луковично-корневищной жизненной формы (сем. Amaryllidaceae). У видов семейств Asteraceae, Boraginaceae, Amaryllidaceae такая динамика, очевидно, связана с активной деполимеризацией полифруктанов (у них наблюдалось резкое падение индекса полимеризации в период активного роста растений) и расходованием образовавшихся олигофруктанов на формирование надземных побегов. По мнению W. Van den Ende [9], разделение во времени процессов роста и накопления фруктанов характерно для видов класса Двудольные. Что же касается видов сем. Campanulaceae (также входящего в класс Двудольные), то у них, вероятно, частичная деполимеризация полифруктанов происходила еще до начала отрастания надземных побегов, т.е. заметно раньше, чем у изученных видов Asteraceae, Boraginaceae, Amaryllidaceae, у которых деполимеризация начиналась уже после отрастания и продолжалась до фенофазы бутонизации включительно.

У *Campanula rapunculoides*, *Codonopsis pilosula* и *Platycodon grandiflorus* наблюдалось дальнейшее постепенное увеличение содержания полифруктанов от фенофазы активного роста – бутонизации вплоть до плодоношения и начала отмирания надземной части (рис. 1). У *Campanula glomerata*, *C. persicifolia*, *C. punctata* и *C. trachelium* содержание полифруктанов не различалось статистически достоверно между фазой активного роста – бутонизации и фазой цветения, но значительно возрастало в период плодоношения. В подземных органах *C. latifolia* динамика была иной: максимальное количество полифруктанов отмечалось во время активного роста и бутонизации, а затем их содержание снижалось во время цветения и далее в фазе плодоношения (рис. 1). В целом, максимальное содержание полифруктанов в подземных органах *C. latifolia* было примерно на том же уровне, что и у остальных видов (кроме *Campanula persicifolia*, наименее богатого полифруктанами).

Таблица 1. Содержание фруктанов в подземных органах видов сем. Campanulaceae в периоды их максимального накопления (2020–2024 гг.)

Вид	Низкомолекулярные фруктаны (GF _L), %	Высокомолекулярные фруктаны (GF _H), %	Сумма фруктанов, %	Индекс полимеризации фруктанов (ИП)
Период накопления	Отрастание	Плодоношение – начало отмирания надземной части		
<i>Campanula glomerata</i> L.	2.1±0.2	38.6±0.1 – 46.1±0.6	38.6–53.6	0.86–1.0
<i>Campanula latifolia</i> L.	7.8±0.4 – 9.4±0.6*	38.0±0.5 – 41.9±0.2*	47.4–49.7*	0.91–1.0
<i>Campanula persicifolia</i> L.	3.1±0.3	19.8±0.7	23.2	0.85
<i>Campanula punctata</i> Lam.	12.1±0.5	40.8±0.2	45.6	0.90
<i>Campanula rapunculoides</i> L.	14.5±0.3 – 19.3±0.4	35.5±0.3 – 44.1±0.2	38.1–50.2	0.88–0.93
<i>Campanula trachelium</i> L.	17.5±0.6	43.2±0.3 – 44.6±0.7	46.2–46.6	0.90–0.93
<i>Codonopsis pilosula</i> (Franch.) Nannf.	2.7±0.2	43.2±0.8 – 44.2±0.3	43.2–44.2	1.0
<i>Platycodon grandiflorus</i> (Jacq.) A.DC.	13.3±0.2	40.4±1.1 – 51.0±1.1	41.7–54.8	0.93–0.99

* У *Campanula latifolia* максимальное содержание этих соединений наблюдалось во время активного роста – бутонизации.

Таблица 2. Содержание фруктанов в подземных органах видов сем. Asteraceae, наиболее богатых этими соединениями (по литературным данным)

Вид	Низкомолекулярные фруктаны (GF _L), %	Высокомолекулярные фруктаны (GF _H), %	Сумма фруктанов, %	Источник
<i>Arctium lappa</i> L.	28.6	30.6 24.35–34.12*		28 30
<i>Helianthus tuberosus</i> L.			55.6–55.9 (556–559 г/кг)	33
<i>Inula helenium</i> L.	10.5	45.1 19.8–43.6*		28 29
<i>Inula magnifica</i> Lipsky	23.5	21.6		28
<i>Smallanthus (Polymnia) uvedalia</i> (L.) Mack.	6.6–11.0	12.5–64.3 15.27–33.42*		28
<i>Taraxacum</i> sect. <i>Taraxacum</i> F.H.Wigg. (<i>Taraxacum officinale</i> F.H.Wigg.)			47.72–59.62*	31 32

* в абсолютно-сухом сырье

Изучение накопления низкомолекулярных фруктанов показало, что у *Campanula glomerata* и *C. persicifolia* их содержание невысокое и слабо колеблется на протяжении всего сезона вегетации (от 2.1 до 7.5%). У *Codonopsis pilosula* эти соединения обнаружены также в небольших количествах и только при отрастании (2.7%). У *Campanula latifolia* содержание олигофруктанов достоверно увеличивалось в период активного роста генеративных побегов и бутонизации (7.8–9.4%), при цветении падало почти до нуля, а затем немножко возрастало при плодоношении (рис. 2).

Наиболее значительное количество низкомолекулярных фруктанов отмечалось у *Campanula punctata*, *C. rapunculoides*, *C. trachelium*, *Platycodon grandiflorus*, особенно во время весеннего отрастания: 12.1–19.3% (табл. 1). В фенофазах цветения и плодоношения количество олигофруктанов заметно снижалось – до 2.0–6.1% (рис. 2).

В связи с намного более значительным накоплением высокомолекулярных фруктанов, по сравнению с низкомолекулярными, индекс полимеризации фруктанов у изученных видов Campanulaceae весьма высок. Уже в фазе активного роста и бутонизации он достигал высокого уровня, варьируя у разных видов от 0.64 до 0.96–1.0 (у наименее богатого фруктанами *Campanula persicifolia* он составлял в этой фенофазе 0.53). Наиболее высок данный показатель в период плодоношения – начала отмирания надземной части: от 0.85 до 1.0 (табл. 1, рис. 3). Таким образом, уже в период активного роста и бутонизации наблюдалась интенсивная полимеризация фруктанов, в отличие от изученных нами видов сем. Asteraceae и рода *Allium* L. луковично-корневищной жизненной формы, у которых в этот период происходила интенсивная деполимеризация и индекс полимеризации снижался до 0–0.57.

Полученные в ходе данного исследования результаты представляют интерес и для практических целей. Так, виды *Codonopsis pilosula* и *Platycodon grandiflorus*, как уже упоминалось, широко используются в медицине. Очевидно, заготовку подземных органов этих видов в качестве лекарственного растительного сырья наиболее целесообразно проводить в конце вегетационного периода, когда накопление фруктозосодержащих углеводов очень значительно. Немалый интерес для использования в медицине представляют и другие виды Campanulaceae, накапливающие большое количество фруктанов: *Campanula glomerata*, *C. latifolia*, *C. punctata*, *C. rapunculoides*, *C. trachelium*.

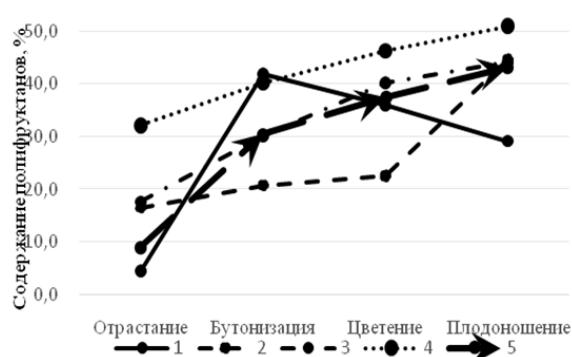


Рис. 1. Сезонная динамика накопления полифруктанов у некоторых видов сем. Campanulaceae. 1 – *Campanula latifolia*, 2 – *C. trachelium*, 3 – *C. rapunculoides*, 4 – *Platycodon grandiflorus*, 5 – *Codonopsis pilosula*

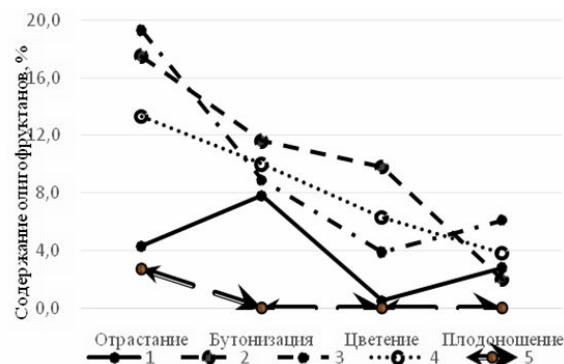


Рис. 2. Сезонная динамика накопления олигофруктанов у некоторых видов сем. Campanulaceae. 1 – *Campanula latifolia*, 2 – *C. trachelium*, 3 – *C. rapunculoides*, 4 – *Platycodon grandiflorus*, 5 – *Codonopsis pilosula*

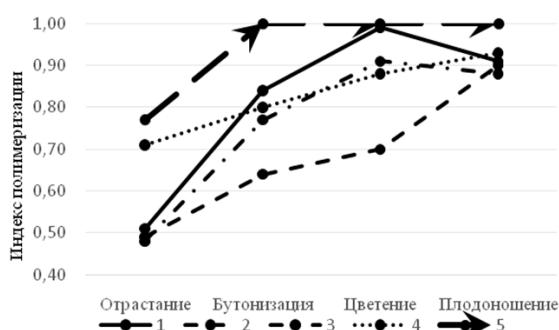


Рис. 3. Изменение индекса полимеризации фруктанов в течение вегетационного периода у некоторых видов сем. Campanulaceae. 1 – *Campanula latifolia*, 2 – *C. trachelium*, 3 – *C. rapunculoides*, 4 – *Platycodon grandiflorus*, 5 – *Codonopsis pilosula*

Следует отметить, что изученные нами виды легко культивируются, некоторые из них (*Campanula glomerata*, *C. latifolia*, *C. trachelium*) довольно широко распространены на территории нашей страны. Это создает условия для обеспечения сырьевой базы, необходимой для практического использования видов в качестве источников фруктозосодержащих углеводов.

Заключение

Для видов сем. Campanulaceae – *Campanula glomerata* L., *C. latifolia* L., *C. punctata* Lam., *C. rapunculoides* L., *C. trachelium* L., *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf., *Platycodon grandiflorus* (Jacq.) A.DC. – характерно очень значительное накопление в подземных органах фруктозосодержащих углеводов, в первую очередь с высокой степенью полимеризации – полифруктанов (от 35–40 до 50% в пересчете на воздушно-сухую массу). Такое количество сопоставимо с содержанием фруктанов у видов сем. Asteraceae и Boraginaceae, наиболее богатых этими соединениями, либо превышает его. Но и у *C. persicifolia* количество фруктанов также достаточно высокое, около 20%. Возможно, способность к накоплению значительных количеств фруктозосодержащих углеводов является особенностью видов сем. Колокольчиковые.

Количество полифруктанов у всех изученных видов было минимальным в период весеннего отрастания побегов: 0.5–19.5% (у *Platycodon grandiflorus* – 32.1%). Затем оно достоверно возрастало во время интенсивного роста и бутонизации, составляя 26.3–43.0% (у *C. persicifolia* – 5.6%). Таким образом, периоды активного роста и накопления фруктанов шли одновременно, а не разделялись во времени. Это резко отличает виды сем. Campanulaceae от изученных нами ранее представителей других семейств класса Двудольные (Magnoliopsida) – Asteraceae и Boraginaceae, у которых наблюдалась противоположная направленность процессов роста и накопления фруктанов.

Количество низкомолекулярных фруктанов наиболее высоко у *Campanula punctata*, *C. rapunculoides*, *C. trachelium*, *Platycodon grandiflorus*, особенно во время весеннего отрастания: 12.1–19.3%. Во время цветения и плодоношения их содержание заметно снижается.

Индекс полимеризации фруктанов у изученных видов весьма высок на протяжении всего вегетационного сезона, а во время плодоношения – начала отмирания надземной части варьирует в пределах 0.85–1.0. Это отличает их от ранее изученных видов сем. Asteraceae, у которых он резко снижается во время активного роста и бутонизации.

Таким образом, виды сем. Campanulaceae представляют, по-видимому, большой теоретический и практический интерес как перспективные источники фруктозосодержащих углеводов.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада Уральского отделения РАН по теме «Фенотипическое и генетическое разнообразие флоры и растительности Северной Евразии, изучение адаптации интродуцированных растений природной и культурной флоры, с учетом возможных рисков для экосистем» (номер госрегистрации 123112700111-4) и на базе УНУ «Коллекция растений открытого и за-крытого грунта Ботанического сада УрО РАН», рег. номер 673947.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Hendry G.A.F. Evolutionary origins and natural functions of fructans – a climatological, biogeographic and mechanistic appraisal // New Phytologist. 1993. Vol. 123, no. 1. Pp. 3–14. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb04525.x>.
2. Versluis M., Kirte O., Öner E.T., Van den Ende W. The fructan syndrome: Evolutionary aspects and common themes among plants and microbes // Plant Cell Environ. 2018. Vol. 41. Pp. 16–38. <https://doi.org/10.1111/pce.13070>.
3. Márquez-López R.E., Uc-Chuc M.A., Loyola-Vargas V.M., Santiago-García P.A., López M.G. Fructosyltransferases in Plants: Structure, Function and Application: A review // Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. 2023. Vol. 6. Article 100343. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100343>.
4. Pommerréig B., Ludewig F., Cvetkovic J., Trentmann O., Klemens P.A.W., Neuhaus H.E. In Concert: Orchestrated Changes in Carbohydrate Homeostasis Are Critical for Plant Abiotic Stress Tolerance // Plant Cell Physiol. 2018. Vol. 59 (7). Pp. 1290–1299. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcy037>.

5. Кайшев В.Г., Лукин Н.Д., Серегин С.Н., Корниенко А.В. Рынок инулина в России: возможности развития сырьевой базы и необходимые ресурсы для создания современного отечественного производства // Пищевая промышленность. 2018. Т. 5. С. 8–17.
6. Man S., Liu T., Yao Y., Lu Y., Ma L., Lu F. Friend or foe? The roles of inulin-type fructans // Carbohydrate Polymers. 2021. Vol. 252. Article 117155. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117155>.
7. Hendry G.A.F. The ecological significance of fructan in a contemporary flora // New Phytol. 1987. Vol. 106 (s1). Pp. 201–216. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1987.tb04690.x>.
8. Pollock C.J. Fructans and the metabolism of sucrose in vascular plants // New Phytol. 1986. Vol. 104 (1). Pp. 1–24. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1986.tb00629.x>.
9. Van den Ende W. Multifunctional fructans and raffinose family oligosaccharides // Front. Plant Sci. 2013. Vol. 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00247>.
10. Pollard C.J., Amuti K.S. Fructose oligosaccharides: Possible markers of phylogenetic relationships among dicotyledonous plant families // Biochem. Syst. Ecol. 1981. Vol. 9 (1). Pp. 69–78. [https://doi.org/10.1016/0305-1978\(81\)90062-4](https://doi.org/10.1016/0305-1978(81)90062-4).
11. Versluys M., Kirte O., Öner E.T., Van den Ende W. The fructan syndrome: Evolutionary aspects and common themes among plants and microbes // Plant Cell Environ. 2018. Vol. 41. Pp. 16–38. <https://doi.org/10.1111/pce.13070>.
12. He J.-Y., Ma N., Zhu S., Komatsu K., Li Z.-Y., Fu W.-M. The genus *Codonopsis* (Campanulaceae): a review of phytochemistry, bioactivity and quality control // J. Nat. Med. 2015. Vol. 69. Pp. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11418-014-0861-9>.
13. Zou Y.-F., Zhang Y.-Y., Zhu Z.-K. et al. Characterization of inulin-type fructans from two species of *Radix Codonopsis* and their oxidative defense activation and prebiotic activities // J. Sci. Food Agric. 2021. Vol. 101, no. 6. Pp. 2491–2499. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10875>.
14. Li J., Wang T., Zhu Z., Yang F., Cao L., Gao J. Structure Features and Anti-Gastric Ulcer Effects of Inulin-Type Fructan CP-A from the Roots of *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf. // Molecules. 2017. Vol. 22. 2258. <https://doi.org/10.3390/molecules22122258>.
15. Li J., Zhang X., Cao L., Ji J., Gao J. Three Inulin-Type Fructans from *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf. Roots and Their Prebiotic Activity on *Bifidobacterium longum* // Molecules. 2018. Vol. 23. 3123. <https://doi.org/10.3390/molecules23123123>.
16. Zhang L., Wang Y., Yang D., Zhang C., Zhang N., Li M., Liu Y. *Platycodon grandiflorus* – An Ethnopharmacological, phytochemical and pharmacological review // Journal of Ethnopharmacology. 2015. Vol. 164. Pp. 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.01.052>.
17. Pang D.-J., Huang C., Chen M.-L., Chen Y.-L., Fu Y.-P., Paulsen B.S., Rise F., Zhang B.-Z., Chen Z.-L., Jia R.-Y., Li L.-X., Song X., Feng B., Ni X.-Q., Yin Z.-Q., Zou Y.-F. Characterization of Inulin-Type Fructan from *Platycodon grandiflorus* and Study on Its Prebiotic and Immunomodulating Activity // Molecules. 2019. Vol. 24. 1199. <https://doi.org/10.3390/molecules24071199>.
18. Wilson R.G., Kachman S.D., Martin A.R. Seasonal changes in glucose, fructose, sucrose, and fructans in the roots of dandelion // Weed Science. 2001. Vol. 49, no. 2. Pp. 150–155. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2001\)049\[0150:SCIGFS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2001)049[0150:SCIGFS]2.0.CO;2).
19. Stolze A., Wanke A., van Deenen N., Geyer R., Prüfer D., Schuze Gronover C. Development of rubber-enriched dandelion varieties by metabolic engineering of the inulin pathway // Plant Biotechnology Journal. 2017. Vol. 15, no. 6. Pp. 740–753. <https://doi.org/10.1111/pbi.12672>.
20. Marx S.P., Nösberger J., Frehner M. Seasonal variation of fructan- β -fructosidase (FEH) activity and characterization of a β -(2-1)-linkage specific FEH from tubers of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) // New phytologist. 1997. Vol. 135, no. 2. Pp. 267–277. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00641.x>.
21. dos Santos C.S., Abraão C.F., de Moraes M.G. Fructan dynamics in the underground organs of *Chresta exsucca* (Asteraceae), a dry season flowering species // Acta Botanica Brasilica. 2018. Vol. 32, no. 1. Pp. 70–79. <https://doi.org/10.1590/0102-33062017abb0214>.
22. Van den Ende W., Mintiens A., Speleers H., Onuoha A.A., Van Laere A. The metabolism of fructans in roots of *Cichorium intybus* during growth, storage and forcing // New phytologist. 1996. Vol. 132, no. 4. Pp. 555–563. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1996.tb01874.x>.
23. Дьякова Н.А., Сливкин А.И., Гапонов С.П., Михайловская И.Ю. Изучение динамики изменения содержания инулина в корнях лопуха большого (*Arctium lappa* L.) и одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* Webb.) в процессе вегетации // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2016. №4. С. 133–136.
24. Plants of the World Online (POWO). Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org>.
25. Оленников Д.Н., Танхаева Л.М. Исследование колориметрической реакции инулина с резорцином в зависимости от условий ее проведения // Химия растительного сырья. 2008. №1. С. 87–93.
26. Васфилова Е.С., Воробьева Т.А. Перспективные растительные источники фруктозосодержащих углеводов // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56, №4. С. 363–374. <https://doi.org/10.31857/S0033994620040081>.
27. Васфилова Е.С., Воробьева Т.А. Динамика накопления фруктозосодержащих углеводов в подземных органах растений различных семейств // Химия растительного сырья. 2022. №1. С. 71–80. <https://doi.org/10.14258/jcprmt.20220110140>.
28. Багаутдинова Р.И., Федосеева Г.П., Оконешникова Т.Ф. Фруктозосодержащие углеводы растений разных семейств – локализация и состав // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2001. Т. 2, №5. С. 13–16.

29. Оленников Д.Н., Танхаева Л.М., Чехирова, Г.В., Петров Е.В. Методика количественного определения суммарного содержания полифруктанов в корневицах и корнях девясила высокого (*Inula helenium*) // Химия растительного сырья. 2008. №1. С. 95–99.
30. Оленников Д.Н., Танхаева Л.М. Методика количественного определения суммарного содержания полифруктанов в корнях лопуха (*Arctium spp.*) // Химия растительного сырья. 2010. №1. С. 115–120.
31. Танхаева Л.М., Оленников Д.Н. Методика количественного определения суммарного содержания полифруктанов в корнях одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* Wigg.) // Химия растительного сырья. 2010. №2. С. 85–89.
32. Евдокимова О.В. К вопросу о стандартизации одуванчика корней // Вопросы обеспечения качества лекарственных средств. 2017. №4 (18). С. 8–13.
33. Bizzarri M., Delledonne M., Ferrarini A., Tononi P., Zago E., Vittori D., Damiani F., Paolocci F. Whole-Transcriptome Analysis Unveils the Synchronized Activities of Genes for Fructans in Developing Tubers of the Jerusalem Artichoke // *Front. Plant Sci.* 2020. Vol. 11. 101. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00101>.
34. Roberfroid M.B. Inulin – type fructans: functional food ingredients // *Journal of Nutrition*. 2007. Vol. 137, no. 11. Pp. 2493–2502.

Поступила в редакцию 29 ноября 2024 г.

После переработки 6 декабря 2024 г.

Принята к публикации 2 марта 2025 г.

Vasfilova E.S., Vorob'eva T.A.* CONTENT AND DYNAMICS OF FRUCTOSE-CONTAINING CARBOHYDRATES IN SPECIES OF THE CAMPANULACEAE JUSS.

Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 8 Marta st., 202a, Yekaterinburg, 620144, Russia, euvas@mail.ru

The peculiarities of accumulation of fructose-containing carbohydrates (fructans) in underground organs of eight Campanulaceae species were investigated. For 7 from the 8 studied species, high accumulation of fructose-containing carbohydrates was shown, primarily with a high degree of polymerization – polyfructans (from 35–40 to 50%). It is comparable with the fructans content in species of the Asteraceae, the richest in these compounds, or exceeds it. The amount of polyfructans in all studied species was minimal during the regrowth period, and then increased significantly during intensive growth and budding. Thus, the periods of active growth and fructans accumulation occurred simultaneously, and were not separated in time. This sharply distinguishes these species from representatives of other families of the class Magnoliopsida, studied by us earlier – Asteraceae and Boraginaceae, in which the processes of growth and fructans accumulation did not coincide in time. The fructan polymerization index in the studied Campanulaceae species is quite high throughout the growing season. During fruiting – the beginning of the dying off of the aboveground part, it varies within the range of 0.85 – 1.0. This distinguishes them from the previously studied species of other families, in which polymerization index significantly decreased during active growth and budding. Thus, Campanulaceae species are apparently of considerable theoretical and practical interest as promising sources of fructose-containing carbohydrates.

Keywords: *Campanula, Codonopsis, Platycodon grandifloras*, fructose-containing carbohydrates, inulin.

For citing: Vasfilova E.S., Vorob'eva T.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 3, pp. 124–132. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250316406>.

References

1. Hendry G.A.F. *New Phytologist*, 1993, vol. 123, no. 1, pp. 3–14. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb04525.x>.
2. Versluis M., Kirte O., Öner E.T., Van den Ende W. *Plant Cell Environ.*, 2018, vol. 41, pp. 16–38. <https://doi.org/10.1111/pee.13070>.
3. Márquez-López R.E., Uc-Chuc M.A., Loyola-Vargas V.M., Santiago-García P.A., López M.G. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2023, vol. 6, article 100343. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100343>.
4. Pommerréig B., Ludewig F., Cvetkovic J., Trentmann O., Klemens P.A.W., Neuhaus H.E. *Plant Cell Physiol.*, 2018, vol. 59 (7), pp. 1290–1299. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcy037>.
5. Kayshev V.G., Lukin N.D., Seregin S.N., Korniyenko A.V. *Pishchevaya promyshlennost'*, 2018, vol. 5, pp. 8–17. (in Russ.).
6. Man S., Liu T., Yao Y., Lu Y., Ma L., Lu F. *Carbohydrate Polymers*, 2021, vol. 252, article 117155. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117155>.
7. Hendry G.A.F. *New Phytol.*, 1987, vol. 106 (s1), pp. 201–216. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1987.tb04690.x>.

* Corresponding author.

8. Pollock C.J. *New Phytol.*, 1986, vol. 104 (1), pp. 1–24. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1986.tb00629.x>.
9. Van den Ende W. *Front. Plant Sci.*, 2013, vol. 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00247>.
10. Pollard C.J., Amuti K.S. *Biochem. Syst. Ecol.*, 1981, vol. 9 (1), pp. 69–78. [https://doi.org/10.1016/0305-1978\(81\)90062-4](https://doi.org/10.1016/0305-1978(81)90062-4).
11. Versluis M., Kirte O., Öner E.T., Van den Ende W. *Plant Cell Environ.*, 2018, vol. 41, pp. 16–38. <https://doi.org/10.1111/pce.13070>.
12. He J.-Y., Ma N., Zhu S., Komatsu K., Li Z.-Y., Fu W.-M. *J. Nat. Med.*, 2015, vol. 69, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11418-014-0861-9>.
13. Zou Y.-F., Zhang Y.-Y., Zhu Z.-K. et al. *J. Sci. Food Agric.*, 2021, vol. 101, no. 6, pp. 2491–2499. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10875>.
14. Li J., Wang T., Zhu Z., Yang F., Cao L., Gao J. *Molecules*, 2017, vol. 22, 2258. <https://doi.org/10.3390/molecules22122258>.
15. Li J., Zhang X., Cao L., Ji J., Gao J. *Molecules*, 2018, vol. 23, 3123. <https://doi.org/10.3390/molecules23123123>.
16. Zhang L., Wang Y., Yang D., Zhang C., Zhang N., Li M., Liu Y. *Journal of Ethnopharmacology*, 2015, vol. 164, pp. 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.01.052>.
17. Pang D.-J., Huang C., Chen M.-L., Chen Y.-L., Fu Y.-P., Paulsen B.S., Rise F., Zhang B.-Z., Chen Z.-L., Jia R.-Y., Li L.-X., Song X., Feng B., Ni X.-Q., Yin Z.-Q., Zou Y.-F. *Molecules*, 2019, vol. 24, 1199. <https://doi.org/10.3390/molecules24071199>.
18. Wilson R.G., Kachman S.D., Martin A.R. *Weed Science*, 2001, vol. 49, no. 2, pp. 150–155. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2001\)049\[0150:SCIGFS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2001)049[0150:SCIGFS]2.0.CO;2).
19. Stolze A., Wanke A., van Deenen N., Geyer R., Prüfer D., Schuze Gronover C. *Plant Biotechnology Journal*, 2017, vol. 15, no. 6, pp. 740–753. <https://doi.org/10.1111/pbi.12672>.
20. Marx S.P., Nösberger J., Frehner M. *New phytologist*, 1997, vol. 135, no. 2, pp. 267–277. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00641.x>.
21. dos Santos C.S., Abraão C.F., de Moraes M.G. *Acta Botanica Brasilica*, 2018, vol. 32, no. 1, pp. 70–79. <https://doi.org/10.1590/0102-33062017abb0214>.
22. Van den Ende W., Mintiens A., Speleers H., Onuoha A.A., Van Laere A. *New phytologist*, 1996, vol. 132, no. 4, pp. 555–563. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1996.tb01874.x>.
23. D'yakova N.A., Slivkin A.I., Gaponov S.P., Mikhaylovskaya I.Yu. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*, 2016, no. 4, pp. 133–136. (in Russ.).
24. *Plants of the World Online (POWO)*. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org>.
25. Olennikov D.N., Tankhayeva L.M. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2008, no. 1, pp. 87–93. (in Russ.).
26. Vasfilova Ye.S., Vorob'yeva T.A. *Rastitel'nyye resursy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 363–374. <https://doi.org/10.31857/S0033994620040081>. (in Russ.).
27. Vasfilova Ye.S., Vorob'yeva T.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2022, no. 1, pp. 71–80. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220110140>. (in Russ.).
28. Bagautdinova R.I., Fedoseyeva G.P., Okoneshnikova T.F. *Khimiya i kompyuternoye modelirovaniye. Butlerovskiy soobshcheniya*, 2001, vol. 2, no. 5, pp. 13–16. (in Russ.).
29. Olennikov D.N., Tankhayeva L.M., Chekhirova, G.V., Petrov Ye.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2008, no. 1, pp. 95–99. (in Russ.).
30. Olennikov D.N., Tankhayeva L.M. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2010, no. 1, pp. 115–120. (in Russ.).
31. Tankhayeva L.M., Olennikov D.N. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2010, no. 2, pp. 85–89. (in Russ.).
32. Yevdokimova O.V. *Voprosy obespecheniya kachestva lekarstvennykh sredstv*, 2017, no. 4 (18), pp. 8–13. (in Russ.).
33. Bizzarri M., Delledonne M., Ferrarini A., Tononi P., Zago E., Vittori D., Damiani F., Paolocci F. *Front. Plant Sci.*, 2020, vol. 11, 101. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00101>.
34. Roberfroid M.B. *Journal of Nutrition*, 2007, vol. 137, no. 11, pp. 2493–2502.

Received November 29, 2024

Revised December 6, 2024

Accepted March 2, 2025

Сведения об авторах

Васфилова Евгения Самуиловна – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории интродукции травянистых растений, euvas@mail.ru

Воробьева Татьяна Андреевна – ведущий инженер лаборатории интродукции травянистых растений, aroma.botsad@mail.ru

Information about authors

Vasfilova Evgeniya Samuilovna – candidate of biological sciences, associate professor, senior researcher of the laboratory of introduction of herbaceous plants, euvas@mail.ru

Vorob'yeva Tatyana Andreevna – leading engineer of the laboratory of introduction of herbaceous plants, aroma.botsad@mail.ru