DOI: 10.14258/jcprm.20260418311

УДК 615.322+581.192

ФРУКТОЗОСОДЕРЖАЩИЕ УГЛЕВОДЫ В НАДЗЕМНЫХ ОРГАНАХ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ КЛАССА ДВУДОЛЬНЫЕ (MAGNOLIOPSIDA)

© ***Е.С. Васфилова*, Т.А. Воробьева***

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

Фруктозосодержащие углеводы (фруктаны) встречаются преимущественно в подземных органах растений, где они являются источником запасных питательных веществ. У ряда видов класса Однодольные они обнаружены и в надземных органах, где выполняют ряд других функций; однако для представителей класса Двудольные таких данных мало. Нами изучено содержание фруктанов в период цветения в надземных органах (листьях, осях соцветий, чашелистиках, венчиках цветков) у 12 видов класса Двудольные (из семейств Asteraceae, Boraginaceae, Campanulaceae), в значительных количествах накапливающих фруктаны и в подземной части. Ряд видов сем. Campanulaceae содержали в листьях, расположенных на стеблях и находящихся в пределах соцветий, а также и в осях соцветий низкомолекулярные соединения (олигофруктаны). Максимальное их содержание наблюдалось в цветках всех изученных видов, что, вероятно, связано с их ролью в осморегуляции. Особенно высоким оно было у видов сем. Campanulaceae – от 4.2 до 19.8%. Наибольшее содержание олигофруктанов во всех изученных надземных органах характерно для *Campanula punctata*; немного уступает ей *Platycodon grandiflorus*. Для каждого отдельного вида наблюдался градиент содержания олигофруктанов от листьев к осям соцветий, чашелистикам (для некоторых видов) и далее к цветкам. Очевидно, это связано с процессом их транспортировки из мест синтеза (листьев) по осям соцветий к цветкам. Высокомолекулярные фруктаны отсутствовали в венчиках цветков и листьях, но небольшое количество их обнаружено в осях соцветий и чашелистиках.

Ключевые слова: фруктозосодержащие углеводы, фруктаны, надземные органы растений, Двудольные, Asteraceae, Boraginaceae, Campanulaceae.

Для цитирования: Васфилова Е.С., Воробьева Т.А. Фруктозосодержащие углеводы в надземных органах некоторых видов класса Двудольные (Magnoliopsida) // Химия растительного сырья. 2026. №4. Online First. https://doi.org/10.14258/jcprm.20260418311.

Введение

Фруктозосодержащие углеводы (фруктаны) обнаружены примерно у 15% видов покрытосеменных растений [1]. Это полимерные соединения, мономером которых является фруктоза; большинство фруктанов в небольшом количестве содержат также молекулы глюкозы. Поэтому в научных публикациях используется также термин «глюкофруктаны».

Фруктаны, в первую очередь, являются источником запасных питательных веществ у многолетних растений для возобновления роста в период весеннего отрастания [2]. Однако виды класса Однодольные (Liliopsida. Monocotyledones) могут накапливать фруктаны (как правило, низкомолекулярные, т.е. олигофруктаны) и в надземных органах (листьях, стеблях, соцветиях). У ряда растений из сем. Poaceae и Amaryllidaceae, относящихся к классу Однодольные, содержание фруктанов в листьях в период активного роста растений может быть весьма значительным: от 2 до 15% и даже до 22% [3, 4].

Что касается видов класса Двудольные (Magnoliopsida. Dicotyledones), то они, как отмечает W. Van den Ende [5], обычно накапливают фруктаны в подземных органах (корнях, клубнях), а в надземных органах у них, по данным Д.Н. Оленникова. Н.И. Кащенко [2], содержание этих соединений невелико: 1–4%. Данные для ряда видов сем. Сложноцветные (Compositae. Asteraceae) показывают, что фруктаны могут присутствовать и в надземных стеблях, в то время как в листьях их уровень очень низок или они вообще не обнаруживаются. Так, один из наиболее известных видов, содержащий большое количество фруктанов – топинамбур (иерусалимский артишок. *Helianthus tuberosus* L.), накапливает эти соединения только в клубнях и стеблях

* Автор, с которым следует вести переписку.

[6]. A.A. Dosio et al. [7] отмечают, что у подсолнечника (*Helianthus annuus* L.). значительное количество сахаров, в том числе фруктанов с уровнем полимеризации от 3 до 15, накапливается в соцветии, но только при выращивании в условиях высокой освещенности. Эти же авторы отмечают, что фруктоза в таких условиях содержится и в верхней части стебля, причем ее концентрация там значительно превышает таковую в других его частях. Вероятно, это связано с движением ассимилятов туда, где высока потребность в них (т.е. к соцветию). Высокомолекулярные фруктаны были обнаружены только в соцветии, но авторы предполагают, что другие органы растения, главным образом стебель, также могут обладать способностью их синтезировать.

По данным T.M. Silva et al. [8], фруктаны найдены во всех органах *Dimerostemma vestitum* S.F.Blake (Asteraceae), но в листьях содержалось минимальное их количество, по сравнению с подземными органами, причем это были только фруктоза и низкомолекулярные фруктаны. В надземных стеблях фруктанов также было немного. По мнению авторов, в этих органах фруктаны могут играть роль не запасных веществ, а участвуют в защите клеточных мембран и способствуют осмотической регуляции в условиях водного дефицита.

Zeaiter et al. [9] отмечали, что у артишока посевного (*Cynara scolymus* L., Asteraceae) прицветники и стебли содержали до 70% фруктанов (в пересчете на сухую массу), со средней степенью полимеризации 32–42, т.е. высокомолекулярных. Содержание в стеблях более чем в пять раз превышало их количество в листьях.

G. Rusak, N. Pleše [10] обнаружили кристаллы инулина в стеблях растений *Centaurea rupestris* L. (Asteraceae), но при этом они отсутствовали в тканях листьев. Авторы связывали это с произрастанием растений в особо сухих местах в условиях средиземноморского климата.

По данным R. Vergauwen et al. [11], большое количество олигофруктанов (и особенно фруктозы) присутствовало в раскрывшихся цветках *Campanula rapunculoides* L., что обусловлено их ролью в регуляции осмотического потенциала и в метаболических процессах во время цветения; накопление фруктанов имеет большое значение для обеспечения роста и созревания семян.

Таким образом, изучение накопления фруктанов в надземных органах, в частности, соцветиях и стеблях растений класса Двудольные может представлять интерес для понимания особенностей распределения и функционирования этих соединений в организме растения. Кроме того, выявление новых возможных источников сырья, богатого фруктозосодержащими углеводами, имеет значение в связи с их разнообразными фармакологическими свойствами: выраженным пребиотическим действием этих биологически активных соединений, способных нормализовать состав кишечной микрофлоры [12, 13]; иммуномодулирующим [14–16], гипогликемическим [17, 18], гиполипидемическим [17, 19], противоопухолевым [20, 21], антиоксидантным [15, 22] действием, способностью влиять на абсорбцию кальция [23, 24] и т.д. Следует учесть, что стебли растений, как правило, являются отходами при производстве пищевых продуктов или лекарственных средств и никак не используются. В то же время они составляют значительную часть общей биомассы растений и их применение для получения ценных биологически активных соединений представляет коммерческий интерес [7]. Кроме того, заготовка надземных частей намного проще, чем подземных органов, и при этом не приводит к уничтожению растений, способствуя более рациональному использованию растительных ресурсов.

Цель данной работы – сравнительное изучение накопления фруктозосодержащих углеводов в различных органах надземной части растений, относящихся к классу Двудольные, в том числе используемых в качестве лекарственных.

Экспериментальная часть

Накопление фруктозосодержащих углеводов в надземных органах изучали у 12 видов растений класса Двудольные, в значительных количествах накапливающих фруктаны и в подземной части:

Сем. Asteraceae Bercht. & J.Presl: *Echinacea pallida* (Nutt.) Nutt. (эхинацея бледная), *Cichorium intybus* L. (цикорий обыкновенный), *Telekia speciosa* (Schreb.) Baumg. (телекия прекрасная).

Сем. Boraginaceae Juss.: *Symphytum officinale* L. (окопник лекарственный).

Сем. Campanulaceae Juss.: *Campanula cervicaria* L. (колокольчик жёстковолосистый), *C. glomerata* L. (колокольчик скученный), *C. latifolia* L. (колокольчик широколистный), *C. persicifolia* L. (колокольчик персиколистный), *C. punctata* Lam. (колокольчик точечный), *C. rapunculoides* L. (колокольчик рапунцелевидный), *C. trachelium* L. (колокольчик крапиволистный), *Platycodon grandiflorus* (Jacq.) A.DC. (ширококолокольчик крупноцветковый).

Названия видов приведены по Plants of the World Online (POWO) [25].

Материал заготавливали в условиях культуры в открытом грунте в Ботаническом саду Уральского отделения РАН, от растений, находившихся в генеративном возрастном состоянии, в период их цветения. У всех видов собирали цветки, часть стебля в пределах соцветия (ось соцветия), листья в пределах соцветия, листья на 3–5 узлах главного стебля. У растений эхинацеи, имеющих одиночные соцветия-корзинки на верхушках побегов, вместо осей соцветий брали части стеблей от основания соцветия до ближайшего верхнего листа. У видов из семейств Boraginaceae и Campanulaceae анализировали венчики цветков, а у *Campanula persicifolia*, *C. punctata* и *C. trachelium* дополнительно изучали и чашелистики. У видов Asteraceae, в связи с большой трудоемкостью разделения цветков на венчики и чашелистики, проводили анализ цветков в целом.

Собранный материал измельчали до частиц размером 7–10 мм и выдерживали 30 мин при температуре 100 °С для инактивации ферментов. Затем сырье высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре 60 °С. Непосредственно перед анализом проводили дополнительное измельчение материала и с помощью сит отбирали фракцию с размерами частиц 0.5–1 мм. Для определения количества фруктозосодержащих углеводов использовали методику Д.Н. Оленникова и Л.М. Танхаевой [26], с небольшими изменениями. Анализ проводили методом спектрофотометрии, который используется рядом исследователей для определения содержания фруктанов. с применением различных реагентов, в том числе резорцина.

При анализе выделяли две фракции фруктанов: низкомолекулярную (олигофруктаны – GF_L), со степенью полимеризации от 3 до 10, и высокомолекулярную (полифруктаны, (высокомолекулярный инулин, inulin HP) – GF_H), со степенью полимеризации приблизительно от 10 до 60. Навески растительного материала составляли 300 мг. Низкомолекулярную фракцию получали в результате трехкратной экстракции высушенного растительного материала 95%-ным этанолом (30, 15 и 15 мин., на водяной бане при температуре 80 °С). Соотношение сырья и экстрагента составляло 1 : 50. Извлечения фильтровали через бумажный фильтр и объединяли; затем упаривали досуха, растворяли осадок в 50 мл дистиллированной воды. Поскольку высокомолекулярные фруктаны практически не растворяются в этаноле высокой концентрации [26], предполагалось, что в состав этой фракции входили только фруктоза и низкомолекулярные фруктаны, хорошо растворимые в этиловом спирте. Далее из растительного остатка дистиллированной водой экстрагировали высокомолекулярные фруктаны: три раза по 60 мин., на кипящей водяной бане; для первых двух экстракций использовали по 30 мл воды, для третьей экстракции – 15 мл. После каждой экстракции извлечения фильтровали и объединяли в мерных колбах объемом 100 мл; доводили до метки дистиллированной водой.

Далее проводили гидролиз обеих фракций до фруктозы. В пробирки для гидролиза отбирали по 1 мл экстракта, 1 мл 0.1% спиртового раствора резорцина, 1 мл 0.01% спиртового раствора тиомочевины (для стабилизации окраски), 8 мл 95% этанола, 9 мл концентрированной хлористоводородной кислоты. В контрольную пробирку не добавляли резорцин, а этанол вносили в количестве 9 мл. Гидролиз проводили в течение 8 мин. при температуре 100 °С; после охлаждения содержимое пробирок переносили в мерные колбы объемом 100 мл, доводили до метки дистиллированной водой. Содержание фруктозы определяли на спектрофотометре SPECORD 50 «Analytik Jena», при длине волны 480 нм, в кювете с толщиной слоя 10 мм. Использовали калибровочную кривую, построенную с помощью стандартного образца фруктозы (SIGMA ALDRICH, USA). Количество низко- и высокомолекулярных фруктанов рассчитывали в процентах на воздушно-сухую массу. Все анализы проводили в трех повторностях. Данные по каждому образцу приведены в виде среднеарифметического значения и его стандартной ошибки (±SE).

Для подтверждения достоверности различий в содержании олигофруктанов в различных органах (листьях в пределах соцветия, осях соцветий, чашелистиках, венчиках цветков) для каждого изученного вида применяли метод однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с использованием программы STATISTICA for Windows 10.0. Использовали также ранговый критерий Краскела–Уоллиса, который является непараметрической альтернативой однофакторного дисперсионного анализа (позволяет обрабатывать выборки малого объема, с неизвестным типом распределения).

Обсуждение результатов

Как показали наши предыдущие исследования [27, 28], у изученных видов класса Двудольные фруктаны накапливались в значительных количествах в подземных органах растений в период плодоношения (в конце вегетационного сезона), где они являлись источником запасных питательных веществ. Что касается надземных органов, то настоящая работа показала, что в стеблевых листьях, в периоды активного роста и

бутонизации, а также цветения растений, фруктаны полностью отсутствовали у видов из семейств Asteraceae и Boraginaceae. В сем. Campanulaceae виды *Campanula cervicaria*, *C. glomerata*, *C. latifolia*, *C. trachelium* также не содержали фруктанов в стеблевых листьях во время цветения, но в период активного роста и бутонизации *C. glomerata* и *C. latifolia* накапливали в них небольшое количество олигофруктанов (1.6–2.5%, табл. 1).

Незначительное количество олигофруктанов (от 0.4 до 3.1%) обнаружено в стеблевых листьях во время цветения у *Campanula persicifolia*, *C. rapunculoides*, *Platycodon grandiflorus*. При этом у последнего вида содержание олигофруктанов в период активного роста было заметно выше, чем во время цветения, – 7.8%. Наибольшее содержание олигофруктанов в стеблевых листьях характерно для *C. punctata*: 10.1% во время активного роста, 12.9% – в период цветения. И только этому виду свойственно накопление в стеблевых листьях небольшого количества и полифруктанов: соответственно 2.4±0.2 и 4.7±0.3. Возможно, это связано со спецификой жизненной формы растений данного вида. Для них характерны тонкие длинные корневища, которые интенсивно растут, в результате чего образуются крупные куртины, содержащие большую массу фотосинтезирующих листьев.

У большинства изученных видов класса Двудольные фруктаны отсутствовали и в листьях, расположенных в пределах соцветий. Однако у ряда видов сем. Campanulaceae (*Platycodon grandiflorus, Campanula glomerata,* и особенно *C. latifolia* и *C. punctata*) эти органы содержали от 0.5 до 7.7% олигофруктанов (табл. 2). Следует отметить, что у представителей класса Однодольные (ряд видов рода *Allium*), как установлено нами ранее, олигофруктаны в листьях во время активного роста и бутонизации накапливались в значительных количествах, от 10.3 до 18.9%, в период цветения их было меньше – от 4.6 до 11.4% [27, 29]. Как отмечают M.A. Machado De Carvalcho, S.M.C. Dietrich [30], наличие низкомолекулярных фруктанов в листьях указывает на их роль как краткосрочного резерва.

Немного выше содержание олигофруктанов в осях соцветий, где они присутствовали у большинства изученных видов, в том числе у всех видов сем. Campanulaceae. Содержание олигофруктанов в осях соцветий варьировало от 1.3 до 7.4% а у *C. punctata* составляло 9.3–11.9% (табл. 2).

В наибольшем количестве низкомолекулярные фруктаны присутствовали в цветках всех изученных видов. Это, в частности, соответствует данным A.A. Dosio et al. [7] для *Helianthus annuus*. При этом у представителей семейств Asteraceae и Boraginaceae их содержание, в целом, невысокое – от 1.9 до 7.4% (табл. 2). Однако почти все виды сем. Campanulaceae содержали в цветках значительные количества олигофруктанов. Особенно высоким оно было у *Campanula latifolia, C. punctata*, *C. rapunculoides, C. trachelium, Platycodon grandiflorus*: от 10.0 до 19.8% (табл. 2). Интересно, что эти же виды, по нашим данным [28], накапливают наибольшее количество фруктанов (преимущественно высокомолекулярных) в подземных органах.

Таблица 1. Содержание низкомолекулярных фруктанов в стеблевых листьях изученных видов класса Двудольные, % на воздушно-сухую массу

Вид	Период активного роста и бутонизации	Период цветения
Asteraceae		
Cichorium intybus	0	0
Echinacea pallida	0	0
Telekia speciosa	...*	0
Boraginaceae		
Symphytum officinale	0	0
Campanulaceae		
Campanula cervicaria	...	0
Campanula glomerata	1.6±0.03	0
Campanula latifolia	2.4±0.1 – 2.5±0.1	0
Campanula persicifolia	...	1.3±0.1
Campanula punctata	10.1±0.1	12.9±0.4
Campanula rapunculoides	...	0.4±0.04
Campanula trachelium	...	0
Platycodon grandiflorus	7.8±0.2	3.1±0.01

* Знак "..." соответствует отсутствию данных

Таблица 2. Содержание низкомолекулярных фруктанов (GF_L) в соцветиях изученных видов, % на воздушно-сухую массу

Вид	Венчики цветков*	Чашелистики	Ось соцветия	Листья в соцветии
Asteraceae				
Echinacea pallida	1.9±0,2	...***	2.3±0,1**	–***
Cichorium intybus	7.4±0.5	...	0	0
Telekia speciosa	5.9±0.1	...	5.5±0.04	0
Boraginaceae				
Symphytum officinale	7.3±0.3	...	0	0
Campanulaceae				
Campanula cervicaria	0 – 4.2±0.1	...	0 – 2.59±0.05	0
Campanula glomerata	4.6±0.1	...	3.9±0.1	0.5±0.1
Campanula latifolia	10.0±0.6 – 16.2±0.2	...	7.4±0.1	6.1±0.2
Campanula persicifolia	6.3±0.03 – 14.7±0.4	2.2±0.04 – 7.2±0.2	1.3±0.1 – 4.6±0.2	0
Campanula punctata	16.9±0.1 – 19.8±0.6	14.3±0.4 – 16.0±0.3	9.3±0.3 – 11.9±0.3	7.7±0.1
Campanula rapunculoides	13.4±0.3	...	1.5±0.1	0.07±0.01
Campanula trachelium	11.8±0.1 – 12.8±0,8	7.3±0.6 – 8.9±0.3	0 – 1.9±0.03	0
Platycodon grandiflorus	17.6±0.8	...	5.1±0.3	2.4±0.1

* У видов Asteraceae проводили анализ венчиков и чашелистиков совместно.

** В связи с тем, что у *Echinacea pallida* одиночные соцветия-корзинки расположены на концах стеблей, у этого вида вместо оси соцветия анализировали часть стебля от основания соцветия до верхнего стеблевого листа.

*** Знак "..." соответствует отсутствию данных, знак "–" соответствует отсутствию явления.

По мнению Д.Н. Оленникова, Н.И. Кащенко [2], для нормального функционирования цветка необходимо значительное количество энергии, которую можно получить из легкогидролизуемых полисахаридов, в частности фруктанов, что объясняет значительное содержание олигофруктанов в цветках изученных нами объектов. По данным Vergauwen et al. [11], высокое содержание олигофруктанов и фруктозы в лепестках колокольчика рапунцелевидного в первые дни после раскрытия цветков, связано с ролью, которую эти соединения играют в осморегуляции, снижая осмотический потенциал и способствуя раскрыванию цветков. Они принимают участие и в процессах метаболизма в период цветения.

У *Campanula persicifolia*, *C. punctata*, *C. trachelium* изучено также содержание фруктанов в чашелистиках. В них олигофруктаны накапливались в меньших количествах, чем в венчиках цветков (2.2–16.0%), но в больших, чем в осях соцветий. Таким образом, для каждого отдельного вида наблюдался градиент содержания олигофруктанов от листьев к осям соцветий, чашелистикам (для некоторых видов) и далее к венчикам цветков (табл. 2). Статистический анализ подтвердил достоверность различий в содержании олигофруктанов между разными органами у видов сем. Campanulaceae в подавляющем большинстве случаев. Недостоверными оказались только различия в количестве олигофруктанов между листьями, расположенными в пределах соцветий, и осями соцветий для трех видов из восьми изученных – *Campanula latifolia*, *C. punctata*, *C. trachelium*.

Ко времени периода цветения, когда проводился данный анализ содержания фруктанов, интенсивный рост растений уже заканчивался, и олигофруктаны, накопившиеся в результате фотосинтетической деятельности, транспортировались из листьев в другие органы растений, где возникала необходимость в них как в источниках энергии. Вероятно, происходил процесс их перемещения из листьев по осям соцветий в чашелистики и далее в венчики цветков, где потребность в них была наиболее высока. Это и приводило к наблюдаемому распределению концентраций олигофруктанов в различных надземных органах.

Следует отметить, что наибольшее содержание олигофруктанов во всех изученных надземных органах – листьях, осях соцветий, чашелистиках, венчиках цветков – свойственно виду *Campanula punctata*; немного уступает ей *Platycodon grandiflorus*. Оба эти вида имеют восточноазиатский ареал: распространены в Восточной Сибири и на дальнем Востоке России, в Корее, Японии, северо-восточном Китае.

Что касается полифруктанов, то они полностью отсутствовали у изученных видов в цветках, а также в листьях, расположенных в пределах соцветия; только у *Campanula punctata* в очень малом количестве обнаружены полифруктаны в венчиках цветков (табл. 3).

Однако небольшое количество полифруктанов присутствовало в осях соцветий (0.8–7.7%) и чашелистиках (1.9–5.2%) у *Campanula persicifolia*, *C. punctata*, *C. rapunculoides, C. trachelium*. Очевидно,

полимеризация олигофруктанов с целью образования запасных питательных веществ происходит слабо, поскольку они необходимы для процессов развития и функционирования генеративных органов.

Проанализировано суммарное содержание низко- и высокомолекулярных фруктанов в различных надземных органах изученных видов (рис.).

Закономерности их распределения в зависимости от вида растения и органа, в целом, аналогичны закономерностям распределения олигофруктанов, так как олигофруктаны составляют основную часть общего количества фруктозосодержащих углеводов. Максимальное суммарное содержание фруктанов наблюдается в цветках, минимальное – в листьях, расположенных в пределах соцветия. Наиболее богаты фруктанами *Campanula latifolia*, *Campanula rapunculoides*, *Platycodon grandiflorus* и особенно – *Campanula punctata*.

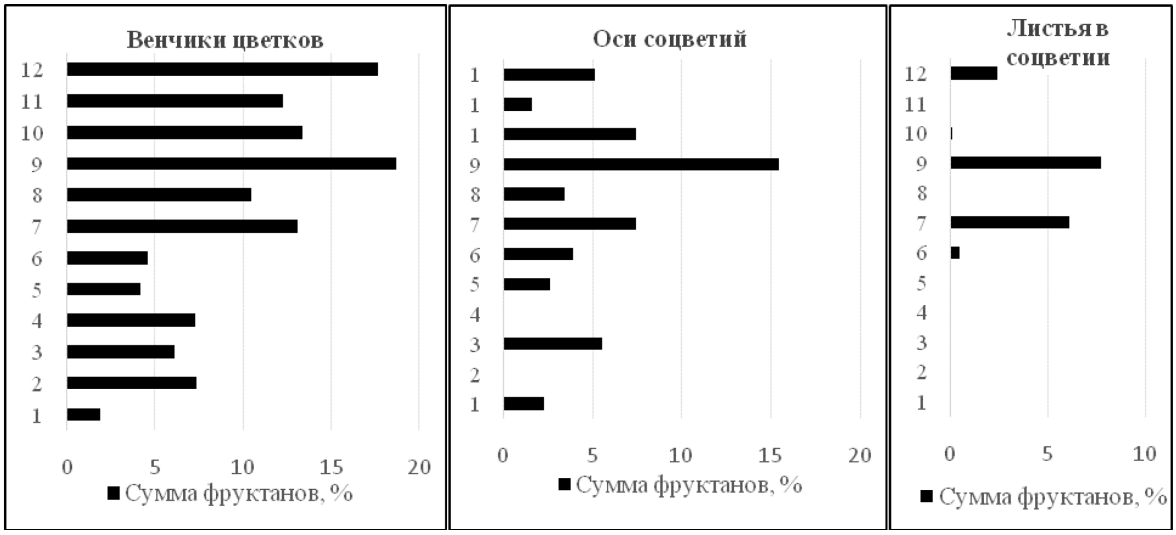
Таблица 3. Содержание высокомолекулярных фруктанов (GF_H) в соцветиях изученных видов, % на воздушно-сухую массу

Вид	Венчики цветков*	Чашелистики	Ось соцветия	Листья в соцветии
Asteraceae				
Echinacea pallida	0	...***	0**	_***
Cichorium intybus	0	...	0	0
Telekia speciosa	0	...	0	0
Boraginaceae				
Symphytum officinale	0	...	0	0
Campanulaceae				
Campanula cervicaria	0	...	0	0
Campanula glomerata	0	...	0	0
Campanula latifolia	0	...	0	0
Campanula persicifolia	0	0 – 5.2±0.1	0 – 0.8±0.07	0
Campanula punctata	0 – 0.7±0.1	1.9±0.1 – 4.4±0.2	2.1±0.2 – 7.7±0.4	0
Campanula rapunculoides	0	...	5.9±0.4	0
Campanula trachelium	0	2.3±0.1 – 2.8±0.1	1.2±0.01 – 2.4±0.03	0
Platycodon grandiflorus	0	...	0	0

* У видов Asteraceae проводили анализ венчиков и чашелистиков совместно.

** В связи с тем, что у *Echinacea pallida* одиночные соцветия-корзинки расположены на концах стеблей, у этого вида вместо оси соцветия анализировали часть стебля от основания соцветия до верхнего стеблевого листа.

*** Знак "..." соответствует отсутствию данных, знак "–" соответствует отсутствию явления.



Суммарное содержание низко- и высокомолекулярных фруктанов в надземных органах изученных видов. По оси ординат: 1 – *Echinacea pallida*, 2 – *Cichorium intybus*, 3 – *Telekia speciosa*, 4 – *Symphytum officinale*, 5 – *Campanula cervicaria*, 6 – *C. glomerata*, 7 – *C. latifolia*, 8 – *C. persicifolia*, 9 – *C. punctata*, 10 – *C. rapunculoides*, 11 – *C. trachelium*, 12 – *Platycodon grandiflorus*

Заключение

Изучено содержание фруктозосодержащих углеводов (фруктанов) в период цветения в надземных органах 12 видов класса Двудольные (сем. Asteraceae – 3 вида, сем. Boraginaceae – 1 вид, сем. Campanulaceae – 8 видов). Установлено, что у видов Asteraceae и Boraginaceae фруктаны отсутствовали в стеблевых листьях, а также в листьях, находящихся в пределах соцветий. Виды сем. Campanulaceae *Campanula glomerata*, *C. latifolia, C. persicifolia*, *C. rapunculoides, C. punctata, Platycodon grandiflorus* содержали олигофруктаны в стеблевых листьях, причем *C. punctata* – в заметных количествах.

У всех изученных видов сем. Campanulaceae, а также у *Telekia speciosa,* низкомолекулярные фруктаны – олигофруктаны накапливались в осях соцветий (1.9–11.9%). Максимальное содержание олигофруктанов наблюдалось в цветках всех изученных видов. Особенно высоким оно было у видов сем. Campanulaceae: *Campanula latifolia, C. punctata, C. rapunculoides, C. trachelium, Platycodon grandiflorus* – 10.0–19.8%. Вероятно, высокое содержание олигофруктанов связано с ролью, которую данные соединения играют в осморегуляции, способствуя, в частности, раскрыванию бутонов, а также с их участием в процессах метаболизма в период цветения. Наибольшее содержание олигофруктанов во всех изученных надземных органах – листьях, осях соцветий, чашелистиках, венчиках цветков – свойственно виду *Campanula punctata*; немного уступает ему *Platycodon grandiflorus.* Для каждого отдельного вида наблюдался градиент содержания олигофруктанов от листьев к осям соцветий, чашелистикам (для некоторых видов) и далее к венчикам цветков. Очевидно, это связано с процессом их транспортировки из мест синтеза (листьев) по осям соцветий к цветкам.

Высокомолекулярные фруктаны (полифруктаны) отсутствовали у изученных видов в цветках, а также в листьях, расположенных в пределах соцветий. Небольшое количество полифруктанов присутствовало у некоторых видов в осях соцветий и чашелистиках. Очевидно, в данном случае олигофруктаны необходимы для процессов развития и функционирования генеративных органов, и полимеризация их с целью образования запасных питательных веществ происходит слабо.

Финансирование
Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада Уральского отделения РАН (по теме 123112700111-4) и на базе УНУ «Коллекция растений открытого и закрытого грунта Ботанического сада УрО РАН» (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 предоставите соответствующие ссылки на автора(ов), источник и 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 Phytol. 1993. Vol. 123(1). Pp. 3–14. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb04525.x.
2. Оленников Д.Н., Кащенко Н.И. Полисахариды. Современное состояние изученности: экспериментально-наукометрическое исследование // Химия растительного сырья. 2014. №1. С. 5–26. https://doi.org/10.14258/jcprm.1401005.
3. 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.
4. Багаутдинова Р.И., Федосеева Г.П., Оконешникова Т.Ф. Фруктозосодержащие углеводы растений разных семейств – локализация и состав // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2001. №5. С. 13–16.
5. Van den Ende W. Multifunctional fructans and raffinose family oligosaccharides // Front. Plant Sci. 2013. Vol. 4. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00247.
6. Janket A., Jogloy S., Vorasoot N., Kesmala T., Holbrook C.C., Patanothai A. Genetic diversity of water use efficiency in Jerusalem artichoke (Helianthus tuberosus L.) germplasm // Aust. J. Crop. Sci. 2013. Vol. 7. Pp. 1670–1681.
7. Dosio G.A.A., Martínez-Noël G.M.A., García L.A., Giorgi M.E., Tognetti J.A. Presence of inulin in sunflower (Helianthus annuus L.) grown under high irradiance // Plant Physiology and Biochemistry. 2023. Vol. 194. Pp. 638–642. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.12.006.

8. Silva T.M., Vilhalva D.A.A., Moraes M.G., Figueiredo-Ribeiro R.C.L. Anatomy and fructan distribution in vegetative organs of Dimerostemma vestitum (Asteraceae) from the campos rupestres // An. Acad. Bras. Cienc. 2015. Vol. 87. Pp. 797–812. http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201520140214.
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. Res. Int. 2019. Article 1083952. https://doi.org/ 10.1155/2019/1083952.
10. Rusak G., Pleše N. Inulin crystals in living specimens of Centaurea rupestris L. (Asteraceae) // Acta Bot. Croat. 1993. Vol. 52. Pp. 13–16.
11. Vergauwen R., Van den Ende W., Van Laere A. The role of fructan in flowering of Campanula rapunculoides // J. Exp. Bot. 2000. Vol. 51(348). Pp. 1261–1266. https://doi.org/10.1093/jxb/51.348.1261.
12. Gibson G.R., Probert H.M., Van Loo J., Rastall R.A., Roberfroid M.B. Dietary modulation of the human colonic microbiota: updating the concept of prebiotics // Nutrition. 2004. Vol. 17. Pp. 259–275. https://doi.org/10.1079/nrr200479.
13. Roberfroid M.B., Gibson G.R., Hoyles L., McCartney A.L., Rastall R.A., Rowland I.R., Wolvers D., Watzl B., Szajewska H., Stahl B., Guarner F., Respondek F., Whelan K., Coxam V., Davicco M.J., Léotoing L., Wittrant Y., Delzenne N.M., Cani P.D., Neyrinck A.M., Meheust A. Prebiotic effects: Metabolic and health benefits // Br. J. Nutr. 2010. Vol. 104 (Suppl. 2). Pp. S1–S63. https://doi.org/10.1017/S0007114510003363.
14. Vogt L., Meyer D., Pullens G., Faas M., Smelt M., Venema K., Ramasamy U., Schols H.A., De Vos P. Immunological properties of inulin-type fructans // Crit. Rev. Food Sci. 2015. Vol. 55(3). Pp. 414–436.
15. Franco-Robles E., López M.G. Implication of Fructans in Health: Immunomodulatory and Antioxidant Mechanisms // Sci. World J. 2015. Article 289267. https://doi.org/10.1155/2015/289267.
16. Dobrange E., Peshev. D., Loedolff B., Van den Ende W. Fructans as Immunomodulatory and Antiviral Agents: The Case of Echinacea // Biomolecules. 2019. Vol. 9. Pp. 615–626. https://doi.org/10.3390/biom9100615.
17. Liu F., Prabhakar M., Ju J., Long H., Zhou H.-W. Effect of inulin-type fructans on blood lipid profile and glucose level: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials // Eur. J. Clin. Nut. 2017. Vol. 71(1). Pp. 9–20. https://doi.org/10.1038/ejcn.2016.156.
18. Wang L., Yang H., Huang H., Zhang C., Zuo, Xu P., Niu Y.M., Wu S.-S. Inulin-type fructans supplementation improves glycemic control for the prediabetes and type 2 diabetes populations: results from a GRADE-assessed systematic review and dose–response meta-analysis of 33 randomized controlled trials // J. Transl. Med. 2019. Vol. 17. 410. https://doi.org/10.1186/s12967-019-02159-0.
19. Kelly G. Inulin-Type Prebiotics: A Review (Part 2) // Altern. Medi. Rev. 2009. Vol. 14(1). Pp. 36–55.
20. Pool-Zobel B.L. Inulin-type fructans and reduction in colon cancer risk: review of experimental and human data // Brit. J. Nutr. 2005. Vol. 93 (Suppl. 1). Pp. S73–S90. https://doi.org/10.1079/bjn20041349.
21. Mazraeh R., Azizi-Soleiman F., Jazayeri S.M.H.M., Noor S.M.A. Effect of inulin-type fructans in patients undergoing cancer treatments: A systematic review // Pak. J. Med. Sci. 2019. Vol. 35(2). Pp. 575–580. https://doi.org/10.12669/pjms.35.2.701.
22. Dobrange E., Xonti A., Peshev. D., Van den Ende W., Loedolff B. Fructans and their potential role as paradoxical antioxidants in Echinacea products // F1000research-263169. 2019. Vol. 8. 1650. https://doi.org/10.7490/f1000research.1117505.1.
23. Abrams S.A., Griffin I.J., Hawthorne K.M., Liang L., Gunn S.K., Darlington G., Ellis K.J. A combination of prebiotic short- and long-chain inulin-type fructans enhances calcium absorption and bone mineralization in young adolescents // Am. J. Clin. Nutr. 2005. Vol. 82(2). Pp. 471–476. https://doi.org/10.1093/ajcn/82.2.471.
24. Holloway L., Moyniham S., Abrams S.A., Kent K., Hsu A.R., Friedlander A.L. Effects of oligofructose-enriched inulin on intestinal absorption of calcium and magnesium and bone turnover markers in postmenopausal women // Brit. J. Nutr. 2007. Vol. 97(2). Pp. 365–372. https://doi.org/10.1017/S000711450733674X.
25. Plants of the World Online (POWO). Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. URL: http://www.plantsoftheworldonline.org.
26. 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.
27. Васфилова Е.С., Воробьева Т.В. Перспективные растительные источники фруктозосодержащих углеводов // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56. Вып. 4. С. 363–374. https://doi.org/10.31857/S0033994620040081.
28. 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.
29. Васфилова Е.С., Воробьева Т.В. Особенности накопления глюкофруктанов в надземной части видов рода Allium (Amaryllidaceae) // Химия растительного сырья. 2024. №1. С.103–111. https://doi.org/10.14258/jcprm.20240112195.
30. Machado De Carvalcho M.A. Dietrich S.M.C. Variation in fructan content in the underground organs of Vernonia herbacea (Veil.) Rusby at different phenological phases // New Phytol. 1992. Vol. 123(4). Pp. 735–740. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03784.x.

Поступила в редакцию 2 декабря 2025 г.

После переработки 6 марта 2026 г.

Принята к публикации 14 октября 2026 г.

Vasfilova Ye.S.[*], *Vorobyeva T.A.* FRUCTOSE-CONTAINING CARBOHYDRATES IN THE ABOVE-GROUND ORGANS OF SOME SPECIES OF THE CLASS MAGNOLIOPSIDA

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

Fructose-containing carbohydrates (fructans) are found primarily in the underground organs of plants, where they are a source of reserve nutrients. In some species of the class Monocotyledons, they are also found in the aboveground organs, where they perform a number of other functions; however, for representatives of the class Dicotyledons, such data are very limited. We studied the fructan content during flowering in the aboveground organs (leaves, inflorescence axes, sepals, and corollas) of 12 species of the class Dicotyledons (from the families Asteraceae, Boraginaceae, Campanulaceae), which accumulate significant amounts of fructans in their underground parts. Several Campanulaceae species contained low-molecular-weight compounds (oligofructans) in the leaves located on the stem and within the inflorescenceas as well as in the inflorescence axes. The highest oligofructan content was observed in the flowers of all studied species, that is likely related to their role in osmoregulation. It was particularly high in most species of the Campanulaceae family, ranging from 4.2 to 19.8%. The highest oligofructan content in all studied aboveground organs was characteristic of *Campanula punctata*; *Platycodon grandiflorus* was slightly lower. For each individual species, a gradient in oligofructan content was observed from leaves to inflorescence axes, sepals (for some species), and then to flowers. This is apparently related to their transport from the sites of synthesis (leaves) along the inflorescence axes to the flowers. High-molecular-weight fructans were absent from the corollas and leaves, but small amounts were found in the inflorescence axes and sepals.

Keywords: fructose-containing carbohydrates, fructans, above-ground plant organs, Dicotyledons, Asteraceae, Boraginaceae, Campanulaceae.

For citing: Vasfilova Ye.S., Vorobyeva T.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 4, Online First. (in Russ.). https://doi.org/10.14258/jcprm.20260418311.

References

1. Hendry G.A.F. *New Phytol*., 1993, vol. 123(1), pp. 3–14. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb04525.x.
2. Olennikov D.N., Kashchenko N.I. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2014, no. 1, pp. 5–26. https://doi.org/10.14258/jcprm.1401005. (in Russ.).
3. Pollock C.J. *New Phytol*., 1986, vol. 104(1), pp. 1–24. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1986.tb00629.x.
4. Bagautdinova R.I., Fedoseyeva G.P., Okoneshnikova T.F. *Khimiya i komp'yuternoye modelirovaniye. Butlerovskiye soobshcheniya*, 2001, no. 5, pp. 13–16. (in Russ.).
5. Van den Ende W. *Front. Plant Sci*., 2013, vol. 4. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00247.
6. Janket A., Jogloy S., Vorasoot N., Kesmala T., Holbrook C.C., Patanothai A. *Aust. J. Crop. Sci*., 2013, vol. 7, pp. 1670–1681.
7. Dosio G.A.A., Martínez-Noël G.M.A., García L.A., Giorgi M.E., Tognetti J.A. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2023, vol. 194, pp. 638–642. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.12.006.
8. Silva T.M., Vilhalva D.A.A., Moraes M.G., Figueiredo-Ribeiro R.C.L. *An. Acad. Bras. Cienc*., 2015, vol. 87, pp. 797–812. http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201520140214.
9. Zeaiter Z., Regonesi M.E., Cavini S., Labra M., Sello G., Di Gennaro P. *BioMed. Res. Int*., 2019, article 1083952. https://doi.org/ 10.1155/2019/1083952.
10. Rusak G., Pleše N. *Acta Bot. Croat*., 1993, vol. 52, pp. 13–16.
11. Vergauwen R., Van den Ende W., Van Laere A. *J. Exp. Bot*., 2000, vol. 51(348), pp. 1261–1266. https://doi.org/10.1093/jxb/51.348.1261.
12. Gibson G.R., Probert H.M., Van Loo J., Rastall R.A., Roberfroid M.B. *Nutrition*, 2004, vol. 17, pp. 259–275. https://doi.org/10.1079/nrr200479.
13. Roberfroid M.B., Gibson G.R., Hoyles L., McCartney A.L., Rastall R.A., Rowland I.R., Wolvers D., Watzl B., Szajewska H., Stahl B., Guarner F., Respondek F., Whelan K., Coxam V., Davicco M.J., Léotoing L., Wittrant Y., Delzenne N.M., Cani P.D., Neyrinck A.M., Meheust A. *Br. J. Nutr*., 2010, vol. 104 (Suppl. 2), pp. S1–S63. https://doi.org/10.1017/S0007114510003363.
14. Vogt L., Meyer D., Pullens G., Faas M., Smelt M., Venema K., Ramasamy U., Schols H.A., De Vos P. *Crit. Rev. Food Sci*., 2015, vol. 55(3), pp. 414–436.
15. Franco-Robles E., López M.G. *Sci. World J*., 2015, article 289267. https://doi.org/10.1155/2015/289267.
16. Dobrange E., Peshev. D., Loedolff B., Van den Ende W. *Biomolecules*, 2019, vol. 9, pp. 615–626. https://doi.org/10.3390/biom9100615.
17. Liu F., Prabhakar M., Ju J., Long H., Zhou H.-W. *Eur. J. Clin. Nut*., 2017, vol. 71(1), pp. 9–20. https://doi.org/10.1038/ejcn.2016.156.
18. Wang L., Yang H., Huang H., Zhang C., Zuo, Xu P., Niu Y.M., Wu S.-S. *J. Transl. Med*., 2019, vol. 17, 410. https://doi.org/10.1186/s12967-019-02159-0.
19. Kelly G. *Altern. Medi. Rev*., 2009, vol. 14(1), pp. 36–55.
20. Pool-Zobel B.L. *Brit. J. Nutr*., 2005, vol. 93 (Suppl. 1), pp. S73–S90. https://doi.org/10.1079/bjn20041349.
21. Mazraeh R., Azizi-Soleiman F., Jazayeri S.M.H.M., Noor S.M.A. *Pak. J. Med. Sci*., 2019, vol. 35(2), pp. 575–580. https://doi.org/10.12669/pjms.35.2.701.

[*] Corresponding author.

22. Dobrange E., Xonti A., Peshev. D., Van den Ende W., Loedolff B. *F1000research-263169*, 2019, vol. 8, 1650. https://doi.org/10.7490/f1000research.1117505.1.
23. Abrams S.A., Griffin I.J., Hawthorne K.M., Liang L., Gunn S.K., Darlington G., Ellis K.J. *Am. J. Clin. Nutr*., 2005, vol. 82(2), pp. 471–476. https://doi.org/10.1093/ajcn/82.2.471.
24. Holloway L., Moyniham S., Abrams S.A., Kent K., Hsu A.R., Friedlander A.L. *Brit. J. Nutr*., 2007, vol. 97(2), pp. 365–372. https://doi.org/10.1017/S000711450733674X.
25. *Plants of the World Online (POWO). Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew*. URL: http://www.plantsoftheworldonline.org.
26. Olennikov D.N., Tankhayeva L.M. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2008, no. 1, pp. 87–93. (in Russ.).
27. Vasfilova Ye.S., Vorob'yeva T.V. *Rastitel'nyye resursy,* 2020, vol. 56, no. 4, pp. 363–374. https://doi.org/10.31857/S0033994620040081. (in Russ.).
28. Vasfilova Ye.S., Vorob'yeva T.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya,* 2025, no. 3, pp. 124–132. https://doi.org/10.14258/jcprm.20250316406. (in Russ.).
29. Vasfilova Ye.S., Vorob'yeva T.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya,* 2024, no. 1, pp. 103–111. https://doi.org/10.14258/jcprm.20240112195. (in Russ.).
30. Machado De Carvalcho M.A. Dietrich S.M.C. *New Phytol*., 1992, vol. 123(4), pp. 735–740. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03784.x.

Received December 2, 2025

Revised March 6, 2026

Accepted October 14, 2026

Сведения об авторах

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

Воробьева Татьяна Андреевна – ведущий инженер, aroma.botsad@mail.ru

Information about authors

Vasfilova Evgeniya Samuilovna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, euvas@mail.ru

Vorobyeva Tatyana Andreyevna – Lead Engineer, aroma.botsad@mail.ru