

ФАРМАКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 582.669.26 : 547.92

DOI: 10.18101/2542-0623-2025-2-105-116

ВЛИЯНИЕ ФИТОГОРМОНОВ И АРАХИДОНОВОЙ КИСЛОТЫ НА ПРОДУКЦИЮ ЭКДИСТЕРОИДОВ И ГЛИКОЗИЛФЛАВОНОВ В *SILENE AMOENA* (CARYOPHYLLACEAE)

**Д. Н. Оленников, Н. И. Кащенко, Т. М. Шишмарева,
В. М. Шишмарев, Т. В. Корнопольцева, Е. В. Петров**

© Оленников Даниил Николаевич

доктор фармацевтических наук, заведующий лабораторией
olennikovdn@mail.ru

© Кащенко Нина Игоревна

доктор фармацевтических наук, старший научный сотрудник
ninkk@mail.ru

© Шишмарева Татьяна Михайловна

кандидат фармацевтических наук, научный сотрудник
shishmarevatm@mail.ru

© Шишмарев Вячеслав Михайлович

кандидат биологических наук, научный сотрудник
shishmarevslava@rambler.ru

© Корнопольцева Татьяна Владимировна

кандидат фармацевтических наук, научный сотрудник
tv-kornopol@mail.ru

© Петров Евгений Васильевич

кандидат фармацевтических наук, ведущий инженер
petrov.bur@mail.ru

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

Аннотация. Фитогормоны — это сигнальные молекулы, вырабатываемые растительными объектами в очень низких концентрациях, которые контролируют все аспекты роста и развития растений: эмбриогенез, защита от патогенов, стрессоустойчивость, репродуктивное развитие и др. Перспективным направлением являются исследования влияния фитогормонов на вторичные метаболиты, такие как эндистероиды и низкомолекулярные фенольные соединения. В ходе продолжающегося химического изучения видов рода *Silene* в качестве объекта исследования нами был выбран распространенный

вид данного рода — *S. amoena* L. В проведенном исследовании было изучено влияние экзогенных фитогормонов на продуктивность и накопление эндистероидов и гликозилфлавонов в надземных и подземных органах *S. amoena* в условиях интродукции. С применением высокоэффективной жидкостной хроматографии с ультрафиолетовым, диодно-матричным и масс-спектрометрическим (ионизация электрораспылением) детектированием (ВЭЖХ-УФ, ВЭЖХ-ДМД-ИЭР-МС) в надземной части интродуцированных образцов *S. amoena* было установлено присутствие 12 эндистероидов, среди которых доминирующими являлись 20-гидроксиэндизон и полиподин B, а также шести гликозилфлавонов, включая производные шафтозида, изовитексина и свертозина. Установлено, что для повышения продуктивности *S. amoena* обосновано применение этилового эфира арахидоновой кислоты, а для получения сырья с высоким содержанием эндистероидов и гликозилфлавонов рекомендовано применение 24-эпифбрассинолида (100 мг/л) и 4-хлорфеноксикусной кислоты (100 мг/л) соответственно.

Ключевые слова: *Silene amoena*, Caryophyllaceae, эндистероиды, гликозилфлавоны, фитогормоны, ВЭЖХ, масс-спектрометрия.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта № FWSM-2021-0005 (№ 121030100227-7).

Для цитирования

Влияние фитогормонов и арахидоновой кислоты на продукцию эндистероидов и гликозилфлавонов в *Silene amoena* (Caryophyllaceae) / Д. Н. Оленников, Н. И. Кашенко, Т. М. Шишмарева и др. // Природа Внутренней Азии. Nature of Inner Asia. 2025. № 2(31). С. 105–116. DOI: 10.18101/2542-0623-2025-2-105-116

Введение

В XIX в. Чарльз Дарвин впервые предположил, что определенные химические соединения способны стимулировать рост сельскохозяйственных культур, которые получили название «фитогормоны» [Darwin, 1881]. В настоящее время к фитогормонам относят сигнальные молекулы, вырабатываемые растительными объектами в очень низких концентрациях, контролирующие все аспекты роста и развития растений: эмбриогенез [Shekhawat, Mathur, Batra, 2009; Loyola-Vargas et al., 2019], защита от патогенов [Bari, Jones, 2009; Bürger, Chory, 2019], стрессоустойчивость [Ciura, Kruk, 2018; Ku et al., 2018] и репродуктивное развитие [Sundberg, Østergaard, 2009; Pierre-Jerome, Drapek, Benfey, 2018]. В зависимости от химического строения выделяют несколько различных классов фитогормонов — ауксины, абсцизовая кислота, цитокинины, этилен-гиббереллины, бруссинстероиды, жасмонаты и стриголактоны [Wani et al., 2016]. Однако сведения о влиянии этих химических соединений на растительный организм остаются отрывочными и зависят от концентрации используемых фитогормонов, их локализации в тканях и органах растений, а также от взаимодействия с другими фитокомпонентами [Davies, 2010]. Располагая информацией о влиянии экзогенных регуляторов на вегетацию и биосинтез метаболитов растительного объекта, можно целенаправленно изменять темпы роста и развития растений, а также накопление биологически активных соединений. Перспективным направлением являются исследования влияния фитогормонов на вторичные

метаболиты, такие как эндистероиды и низкомолекулярные фенольные соединения [Villarreal-García et al., 2016].

В ходе продолжающегося химического изучения видов рода *Silene* [Оленников, Кащенко, Чирикова, 2019; Olennikov, 2019a] в рамках проведенного исследования нами был выбран распространенный в Европейской России, Западной и Восточной Сибири вид данного рода — *S. amoena* L. [Флора СССР, 1936]. Ранее нами было проведено также исследование химического состава близкого вида *S. repens* Patrin, изучен эндистероидный и флавоноидный профиль данного растительного вида, произрастающего в Байкальском регионе [Olennikov, 2019b, 2020]. Задачей проведенного исследования было изучение влияния экзогенных фитогормонов на продуктивность и накопление эндистероидов и гликозилфлавонов в надземных и подземных органах *S. amoena* в условиях интродукции.

Материалы и методы

Растительное сырье. Саженцы *Silene amoena* были выращены из аутентичных семян, полученных из Главного ботанического сада им. Цицина РАН (Москва, Россия). Семена стерилизовали инкубацией в течение 1 мин в 75 %-ном этаноле, а затем тщательно промывали стерильной водой. Семена прорашивали в почве вторфяных горшках в контролируемых условиях при температуре 25/18 °C (день/ночь), относительной влажности воздуха 70–80 %, освещенности 10 клк и фотопериоде 14 ч. В возрасте 30 дней (2–3 настоящих листа) сеянцы *S. amoena* высаживали в грунтовую пленочную теплицу (4 раст./м²) на территории приусадебного участка ИОЭБ СО РАН (г. Улан-Удэ, Республика Бурятия) и выращивали в течение 30 дней в весенне-летнем обороте с выполнением всех агротехнических мероприятий. Саженцы *S. amoena* были разделены на группы по 30 особей. Каждая группа подвергалась опрыскиванию надземной части (24-эпифбрассинолид, 4-хлорфеноксикусная кислота, гиббереллиновых кислот натриевые соли, арахидоновая кислота, арахидоновой кислоты этиловый эфир) или прикорневой обработке (индолилмасляная кислота) на 1, 7, 14 и 21 сутки в концентрациях 10 и 100 мг/л. Растения обрабатывались методом опрыскивания до стекания первой капли с листа, прикорневая обработка заключалась во внесении 50 мл рабочего раствора в почву. Контрольную группу растений опрыскивали дистиллированной водой. Для обработки использовались разбрзгиватели ручные объемом 1000 мл. Все обработки проходили в раннее время суток, в 9–10 часов утра при температуре воздуха не более 25 °C. Через 30 дней растения извлекали из почвы, корни промывали. Сыре высыпывали в конвекционной печи (40 °C) до значений влажности < 5 %, определяли массу листьев и корней. Образцы измельчали, просеивали до среднего диаметра частиц 0,5 мм на просеивающей машине ЭРЛ-М1 («Зернотехника», Москва, Россия).

Общие экспериментальные условия. Масс-спектрометрический анализ проводили на TQ-масс-спектрометре LCMS-8050 (Shimadzu, Columbia, MD, USA). В работе использованы реагенты: эпифбрассинолид, индолил-3-масляная кислота, 4-хлорфеноксикусная кислота, гиббереллиновых кислот натриевые соли, арахидоновая кислота, арахидоновой кислоты этиловый эфир (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA); коммерческие образцы веществ сравнения: 20-гидроксиэндизон (ООО

Фитопанацея, Москва, Россия), полиподин В, экдизон (ChemFaces, Wuhan, Hubei, PRC). Интегристерон А и 2-дезокси-20-гидроксиэкдизон были выделены ранее из *S. jenisseensis* [Olennikov, Kashchenko, 2020]. 26-Гидроксиинтегристерон А, 20,26-дигидроксиэкдизон, 26-гидроксиполиподин В, туркестерон, 26-гидроксиэкдизон, 20-гидроксиэкдизон-2-*O*-ацетат, витикостерон Е, шафтозид-2"-*O*-гликозид (силенезид Е), мелозид А были выделены из *S. repens* [Olennikov, Kashchenko, 2020], свертзин-2"-*O*-гликозид из *S. samoedorum* [Olennikov, Chirikova, 2019]. Условия пробоподготовки растительных образцов, особенности микроколоночной ВЭЖХ-УФ и ВЭЖХ-ДМД-ИЭР-МС описаны нами ранее [Оленников, Кащенко, 2019; Оленников, Кащенко, Чирикова, 2019]. Статистический анализ проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Значимость различий средних определяли с помощью многорангового теста Дункана.

Результаты и обсуждение

Многокомпонентность химического профиля различных видов *Silene*, собранных в условиях Байкальского региона, была показана нами ранее [Olennikov, 2019b, 2020]. На предварительном этапе исследования для отделения экдистероидов и гликозилфлавонов от посторонних соединений этанольных извлечений из травы и корней интродуцированных образцов *S. amoena* применяли твердофазную экстракцию на полиамиде, что позволило получить фракции SPE-1 и SPE-2. Данные фракции были исследованы с применением микроколоночной ВЭЖХ-УФ и ВЭЖХ-ДМД-ИЭР-МС. В результате хроматографического анализа фракций SPE-1 из травы и корней интродуцированной *S. amoena* было выявлено присутствие 12 соединений, отнесенных к группе экдистероидов. Интродуцированные образцы *S. amoena* по составу экдистероидного профиля не отличались от дикорастущих образцов. Основными экдистероидами интродуцированных образцов травы *S. amoena* являлись 20-гидроксиэкдизон (6) и полиподин В (7), корней — 20-гидроксиэкдизон (6).

На следующем этапе исследования нами был проведен полевой эксперимент для определения влияния экзогенных фитогормонов на продуктивность и накопление экдистероидных соединений в интродуцированных образцах *S. amoena*. Было принято решение использовать соединения 6 и 7 в качестве маркерных экдистероидов (табл. 1). Согласно полученным экспериментальным данным обработка саженцев *S. amoena* брассиностероидом (24-эпibrассинолид) в концентрации 100 мг/л приводила к значительному увеличению средней массы листьев растений (> 1,63 раза). Прирост массы корней при использовании максимальной концентрации 24-эпibrассинолида увеличился с 50,8 до 60,5 мг. Содержание целевых экдистероидов в листьях *S. amoena* — 20-гидроксиэкдизона и полиподина В, было максимальным среди всех исследуемых групп растений, обработанных фитогормонами. Возможно, причиной является химическое родство экдистероидов и брассиностероидов. В соответствии с ранее полученными сведениями экдистероиды и брассиностероиды являются схожими по химической структуре соединениями и могут оказывать опосредованное влияние на количественное содержание друг друга.

Таблица 1

Средняя масса для одного растения и суммарное содержание
20-гидроксиэндизона (6) и полиподина В (7) в органах *S. amoena*
после 1 месяца обработки фитогормонами

Группа	Концентрация, мг/л	Листья			Корни	
		масса, мг ^a	6, мг/г ^b	7, мг/г ^b	масса, мг ^a	6, мг/г ^b
Контроль (вода)	—	50,3	0,95	0,40	50,8	0,42
24-эпибрассинолид	10	64,3 [†]	2,11 [†]	1,12 [†]	52,1 [†]	0,36 [†]
24-эпибрассинолид	100	81,9 [†]	2,15 [†]	1,12 [†]	60,5 [†]	0,40
Индолилмасляная кислота	10	60,8 [†]	1,00 [†]	0,45	50,3	0,47 [†]
Индолилмасляная кислота	100	64,7 [†]	1,05 [†]	0,49 [†]	57,9 [†]	0,50 [†]
4-Хлорфеноксиуксусная кислота	10	67,7 [†]	1,02	0,34 [†]	56,3 [†]	0,41
4-Хлорфеноксиуксусная кислота	100	78,6 [†]	1,02	0,37	60,4 [†]	0,40
Гиббереллиновых кислот натриевые соли	10	83,5 [†]	0,95	0,41	56,3 [†]	0,50 [†]
Гиббереллиновых кислот натриевые соли	100	115,7 [†]	0,97	0,40	71,9 [†]	0,81 [†]
Арахидоновая кислота	10	60,9 [†]	0,90	0,40	65,8 [†]	0,57 [†]
Арахидоновая кислота	100	81,3 [†]	1,01	0,40	68,3 [†]	0,60 [†]
Арахидоновой кислоты этиловый эфир	10	124,3 [†]	0,84 [†]	0,33 [†]	70,6 [†]	0,71 [†]
Арахидоновой кислоты этиловый эфир	100	145,9 [†]	0,83 [†]	0,29 [†]	71,4 [†]	0,72 [†]

* Указано среднее значение воздушно-сухой массы для 1 растения ($n = 30$). ^b От массы воздушно-сухого сырья. [†] Разница достоверна по сравнению с данными контрольной группы ($p > 0,95$)

Известно, что обработка 4-дневных саженцев *Lepidium sativum* экзогенным 20-гидроксиэндизоном приводила к существенному снижению содержания эндогенных брассиностероидов [Tarkowská, Krampolová, Strnad, 2020]. В свою очередь, при обработке саженцев 24-эпибрассинолидом наблюдался противоположный эффект. В соответствии с химическим строением 20-гидроксиэндизон, полиподин В и 24-эпибрассинолид относятся к классу тетрациклических тритерпенов и включают в себя полигидроксилированные стероидные структуры с оксигенированным

В-кольцом. Однако имеются и структурные различия между этими двумя группами фитостеринов, которые в конечном итоге оказывают прямое влияние на их биологическую активность, а именно: (1) В-кольцо 24-эпибрасинолида содержит только карбонильную группу у С-6, тогда как эндистероиды имеют характерный хромофорный фрагмент 14-гидрокси-7-ен-6-она; (2) ориентация гидроксильных групп у С-2, С-3 и С-22 является зеркальной; (3) сочленение А- и В-колов имеет *цис*-ориентацию в скелете эндистероидов, в то время как для 24-эпибрасинолида характерна *транс*-конфигурация [Tarkowská, Krampolová, Strnad, 2020]. Согласно литературным данным, гормональная активность у насекомых или растений регулируется структурой боковой цепи, а не природой стероидного каркаса ядра. В частности, модификации С-20 резко повлияли на гормональную активность как эндистероидов, так и 24-эпибрасинолида [Watanabe, 2015]. Интересно, что полученные данные коррелировали с литературными сведениями только в отношении надземной части *S. amoena*. Содержание 20-гидроксиэндизона в корнях по сравнению с контрольной группой существенно не изменилось.

В свою очередь, обработка *S. amoena* представителем класса ауксинов, индолилмасляной кислотой (100 мг/л), оказала наиболее выраженное влияние именно на подземные органы данного растительного вида. Наблюдалось увеличение продуктивности корней с 50,8 до 57,9 мг; содержание 20-гидроксиэндизона также возраспало с 0,42 до 0,50 мг/г. Фитогормоны ауксины, являясь производными индола, стимулируют рост плодов и побегов растений, рост клеток камбия, вызывают положительный геотропизм корней, влияют на дифференцировку клеток и обеспечивают взаимодействие отдельных органов [Zhao, 2010].

Обработка 4-хлорфеноксиусной кислотой (100 мг/л), которая имеет схожее химическое строение с ауксинами, приводила к увеличению продуктивности как надземных (78,6 мг), так и подземных органов (60,4 мг) *S. amoena*. Содержание 20-гидроксиэндизона в листьях возраспало до 1,02 мг/г и снижалось в корнях до 0,40 мг/г. Данное соединение используется в сельском хозяйстве для повышения продуктивности видов семейства Пасленовых за счет стимулирования образования завязей и предотвращения их опадания [Sasaki, Yano, Yamasaki, 2005]. Возможно, небольшая длительность эксперимента и отсутствие генеративных органов у саженцев *S. amoena* не позволили в полной мере оценить влияние данного регулятора роста.

При использовании раствора гиббереллиновых кислот натриевых солей (100 мг/л) наблюдалось повышение продуктивности надземной части *S. amoena* в 2,30 раза (с 50,3 до 115,7 мг/г). Содержание 20-гидроксиэндизона при этом повышалось незначительно, а содержание полиподина В не изменилось. Было отмечено увеличение массы корней в 1,42 раза, при этом содержание 20-гидроксиэндизона в корнях повысилось в 1,93 раза (с 0,42 до 0,81 мг/г). К гиббереллинам относятся фитогормоны с тетрациклической дитерпеновой структурой, функции которых связаны со стимуляцией вегетативного развития растений (прорастание, рост стебля в длину) и генеративного развития (перехода к цветению). Гиббереллины действуют в одном направлении с ауксинами и стимулируют биосинтез и передачу сигнала друг другу [Gupta, Chakrabarty, 2013].

Обработка препаратами арахидоновой кислоты приводила к значительному увеличению продуктивности саженцев *S. amoena*. Выявлено, что максимальная продуктивность надземных (в 2,90 раза) и подземных органов (в 1,41 раза) из всех экспериментальных групп была отмечена при обработке этиловым эфиром арахидоновой кислоты (100 мг/л). Однако содержание обоих эндистероидов в траве *S. amoena* было меньше, чем в контрольных образцах. Исследуемые соединения арахидоновой кислоты не относятся к фитогормонам как предыдущие компоненты, а являются элиситорами, т. е. не свойственными для организма растения соединениями, которые попадают в него извне и вызывают устойчивость к фитопатогенным инфекциям, что аналогично процессу иммунизации [Dedyukhina, Kamzolova, Vainshtein, 2014]. Ввиду повышенной устойчивости растительных объектов к болезням наблюдается увеличение урожайности.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод о том, что применение определенного фитогормона или элиситора в случае *S. amoena* будет зависеть от задачи исследователя. Если необходимо повысить урожайность *S. amoena*, то обосновано применение элиситора этилового эфира арахидоновой кислоты. Если же необходимо получить сырье с высоким содержанием эндистероидов, то рекомендовано применение фитогормона 24-эпифлоресцина.

Анализ фракции SPE-2 из травы *S. amoena* осуществляли методом ВЭЖХ-ДМД-ИЭР-МС, используя для идентификации данные о хроматографической подвижности, УФ и масс-спектрах в сравнении с известными соединениями и сведениями литературы. Всего в SPE-2 было обнаружено 6 компонентов (14–19), отнесенных на основе УФ-спектров к группе гликозилфлавонов, в том числе к производным шафтозида (шафтозид-2"-*O*-гликозид, 14; шафтозид, 15), изовитексина (изовитексин-2"-*O*-гликозид, 16; изовитексин, 17) и свертазина (свертазин-2"-*O*-гликозид, 18; свертазин, 19). Шафтозид (15), изовитексин-2"-*O*-гликозид (мелозид А, 16), изовитексин (17) ранее были обнаружены нами в *S. repens* [18], а свертазин-2"-*O*-гликозид (18) и свертазин (19) выявлены в *S. amoena* впервые. Интерес представляет соединение 14. УФ-спектр данного соединения характерен для флавонов. Анализ масс-спектра позволяет отнести данное соединение к C-гликозилфлавонам. Молекулярная формула 14 была определена как $C_{32}H_{38}O_{19}$ (m/z 725 для [M-H]). Общая картина масс-спектра была близка к таковой шафтозида (апигенин-6-C-глюкозид-8-C-арabinозид, 15), что позволило предварительно охарактеризовать 14 как *O*-гексозид шафтозида. Ранее соединение 14 ранее было впервые обнаружено нами в *S. italica* и получило название шафтозид-2"-*O*-гликозид (силенезид E) [Olennikov, Kashchenko, 2020].

На заключительном этапе исследования была проведена оценка влияния экзогенных фитогормонов на содержание гликозилфлавонов 14–19 в листьях *S. amoena* после 1 месяца обработки (табл. 2).

Максимальная концентрация гликозида, шафтозида, силенезида E (14) наблюдалась при опрыскивании саженцев *S. amoena* 24-эпифлоресцином в концентрации 100 мг/л. Содержание данного компонента увеличивалось в 1,33 раза по сравнению с контролем. В свою очередь максимальная продукция шафтозида (15), доминирующего флавоноидного соединения травы *S. amoena*, была отмечена при использовании в максимальной концентрации аналога ауксина — 4-хлорфеноксиуксусной

кислоты. Содержание шафтозида возрастало с 0,70 до 2,99 мг/г, то есть в 4,27 раза. Для мелозида А (**16**), который является гликозидом изовитексина, и его агликона изовитексина (**17**) также было отмечено максимальное накопление при обработке 4-хлорфеноксиуксусной кислотой (100 мг/л). По сравнению с контрольной группой их содержание возрастало в 5 и 2,71 раза соответственно. Максимальное увеличение содержания свертизин-2"-*O*-гликозида (**18**) было выявлено при обработке натриевыми солями гиббереллиновых кислот (100 мг/л) с 0,10 до 0,60 мг/г. Наибольшее накопление агликона свертизина (**19**) было отмечено в случае обработки арахидоновой кислотой (100 мг/л). Суммарное содержание гликозилфлавонов наблюдалось при обработке сеянцев 4-хлорфеноксиуксусной кислотой в максимальной концентрации и составляло 4,16 мг/г против 1,52 мг/г в контрольной группе.

Таблица 2

Содержание гликозилфлавонов в листьях *S. amoena*
после 1 месяца обработки фитогормонами

Группа	Конц., мг/л	Содержание гликозилфлавонов, мг/г ± S.D. ^{a, 6}						
		14	15	16	17	18	19	Σ_{14-19}
Контроль (вода)	-	0,58	0,70	0,01	0,07	0,10	0,06	1,52
24-эпибрассинолид	10	0,75 [†]	1,12 [†]	—	0,01 [†]	0,08	0,04	2,00 [†]
24-эпибрассинолид	100	0,77 [†]	1,29 [†]	—	0,01 [†]	0,06 [†]	0,02 [†]	2,15 [†]
Индолилмасляная кислота	10	0,57	1,14 [†]	0,02 [†]	0,10	0,10	0,08 [†]	2,01 [†]
Индолилмасляная кислота	100	0,60	1,17 [†]	0,02 [†]	0,14 [†]	0,14 [†]	0,16 [†]	2,23 [†]
4-хлорфенокси-уксусная кислота	10	0,71 [†]	2,05 [†]	0,01	0,10	0,05 [†]	0,07	2,99 [†]
4-хлорфенокси-уксусная кислота	100	0,76 [†]	2,99 [†]	0,05 [†]	0,19 [†]	0,05 [†]	0,12 [†]	4,16 [†]
Гиббереллиновых кислот натриевые соли	10	0,30 [†]	0,37 [†]	—	0,05	0,53 [†]	0,04 [†]	1,29 [†]
Гиббереллиновых кислот натриевые соли	100	0,35 [†]	0,24 [†]	—	0,07	0,60 [†]	0,03 [†]	1,29 [†]
Арахидоновая кислота	10	0,67 [†]	1,12 [†]	—	0,09	0,15 [†]	0,10 [†]	2,13 [†]
Арахидоновая кислота	100	0,70 [†]	1,45 [†]	0,01	0,14 [†]	0,17 [†]	0,19 [†]	2,66 [†]
Арахидоновой кислоты этиловый эфир	10	0,35 [†]	0,85 [†]	0,02 [†]	0,10	0,05 [†]	0,02 [†]	1,39 [†]
Арахидоновой кислоты этиловый эфир	100	0,34 [†]	0,90 [†]	0,03 [†]	0,15 [†]	0,07 [†]	0,01 [†]	1,50

* От массы воздушно-сухого сырья. ⁶ Гликозилфлавоны: **14** — шафтозид-2"-*O*-гликозид (силенезид E), **15** — шафтозид, **16** — изовитексин-2"-*O*-гликозид (мелозид A), **17** — изовитексин, **18** — свертизин-2"-*O*-гликозид, **19** — свертизин. [†] Разница достоверна по сравнению с данными контрольной группы ($p \geq 0,95$).

Таким образом, для получения сырья *S. amoena* с высоким содержанием гликозилфлавонов обоснована обработка сеянцев 4-хлорфеноксикусной кислотой. Известные сведения литературы о влиянии фитогормонов на продукцию фенольных соединений в растительном организме указывают на то, что брассинолиды и ауксины могут способствовать накоплению флавоноидов [Petridis, 2016].

Выводы

1. В интродуцированных образцах травы и корней *Silene amoena* выявлено присутствие 12 эндистероидов: 26-гидроксигингистерона А, 20, 26-дигидроксиэндизона, 26-гидроксиполиподина В, интегристерона А, туркестерона, 20-гидроксиэндизона, полиподина В, 26-гидроксиэндизона, эндизона, 2-дезокси-20-гидроксиэндизона, 20-гидроксиэндизона-2-*O*-ацетата, витикостерона Е.
2. В интродуцированных образцах травы *S. amoena* выявлено присутствие 6 гликозилфлавонов: производных шафтозида, изовитексина, свертазина. Свертизин-2"-*O*-гликозид, свертазин и силенезид Е обнаружены в *S. repens* впервые.
3. Установлено, что для повышения продуктивности *S. amoena* обосновано применение этилового эфира арахидоновой кислоты. Для получения сырья с высоким содержанием эндистероидов и гликозилфлавонов рекомендовано применение 24-эпивитексина (100 мг/л) и 4-хлорфеноксикусной кислоты (100 мг/л) соответственно.

Литература

1. Оленников Д. Н., Кащенко Н. И. Эндистероиды *Silene italicica*: Гликозидные и негликозидные компоненты и ВЭЖХ-ДМД-ИЭР-МС профиль // Химия растительного сырья. 2019. № 4. С. 120–129. Текст : непосредственный. doi: 10.14258/jcprm.2019045109.
2. Оленников Д. Н., Кащенко Н. И., Чирикова Н. К. С-/О-Гликозилфлавоны *Silene italicica* (Caryophyllaceae) // Химия растительного сырья. 2019. № 3. С. 119–127. Текст : непосредственный. doi: 10.14258/jcprm.2019035110.
3. Флора СССР / под редакцией В. Л. Комарова. Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1936. Т. 4. С. 577–691. Текст : непосредственный.
4. Bari R., Jones J. D. G. Role of Plant Hormones in Plant Defence Responses. *Plant Molecular Biology*. 2009; 69: 473–488. DOI: 10.1007/s11103-008-9435-0
5. Bürger M., Chory J. Stressed Out about Hormones: How Plants Orchestrate Immunity. *Cell Host Microbe*. 2019; 26: 163–172. DOI: 10.1016/j.chom.2019.07.006
6. Ciura J., Kruk J. Phytohormones as Targets for Improving Plant Productivity and Stress Tolerance. *Journal of Plant Physiology*. 2018; 229: 32–40. DOI: 10.1016/j.jplph.2018.06.013.
7. Darwin C., Sir Darwin F. *The Power of Movement in Plants*. D. Appleton and Company, New York, USA, 1881. 592 p.
8. Davies P. J. Regulatory Factors in Hormone Action: Level, Location and Signal Transduction. In *Plant Hormones*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2010. P. 16–35.
9. Dedyukhina E. G., Kamzolova S. V., Vainshtein M. B. Arachidonic Acid as an Elicitor of the Plant Defense Response to Phytopathogens. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2014; 1(18). DOI: 10.1186/s40538-014-0018-9
10. Gupta R., Chakrabarty S. K. *Gibberellic Acid in Plant. Still a Mystery Unresolved*. Plant Signaling & Behavior. 2013; 8(9). DOI: 10.4161/psb.25504
11. Ku Y. S., Sintaha M., Cheung M. Y., Lam H. M. Plant Hormone Signaling Crosstalks between Biotic and Abiotic Stress Responses. *International Journal of Molecular Sciences*. 2018; 19(10). DOI: 10.3390/ijms19103206

12. Loyola-Vargas V. M., Méndez-Hernández H. A., Ledezma-Rodríguez M. et al. Signaling Overview of Plant Somatic Embryogenesis. *Frontiers in Plant Science*. 2019; 10(77). DOI: 10.3389/fpls.2019.00077.
13. Olennikov D. N., Kashchenko N.I. New C,O-glycosylflavones from the Genus *Silene*. *Chemistry of Natural Compounds*. 2020; 56(6): 1026–1034. DOI: 10.1007/s10600-020-03220-x
14. Olennikov D. N. Ecdysteroids of *Silene repens* from Eastern Siberia. *Chemistry of Natural Compounds*. 2019b; 55(4): 770–772. DOI: 10.1007/s10600-019-02807-3.
15. Olennikov D. N. Ecdysteroids, Flavonoids, and Phenylpropanoids from *Silene nutans*. *Chemistry of Natural Compounds*. 2019a; 55: 127–130. DOI: 10.1007/s10600-019-02632-8.
16. Olennikov D. N. Silenerepin, a New C-glycosylflavone from *Silene repens*. *Chemistry of Natural Compounds*. 2020; 56(3): 423–426. DOI: 10.1007/s10600-020-03053-8
17. Olennikov D. N., Chirikova N. K. C-Glycosyl Flavones from Two Eastern Siberian Species of *Silene*. *Chemistry of Natural Compounds*. 2019; 55: 642–647. DOI: 10.1007/s10600-019-02768-7.
18. Olennikov D. N., Kashchenko N. I. Phytoecdysteroids of *Silene jenisseensis*. *Chemistry of Natural Compounds*. 2017; 53: 1199–1201. DOI: 10.1007/s10600-017-2239-1.
19. Petridis A., Döll S., Nichelmann L., Bilger W., Mock H.-P. *Arabidopsis thaliana* G2-Like Flavonoid Regulator and Brassinosteroid Enhanced Expression are Low-Temperature Regulators of Flavonoid Accumulation. *New Phytologist*. 2016; 211: 912–925. DOI: 10.1111/nph.13986
20. Pierre-Jerome E., Drapek C., Benfey P. N. Regulation of Division and Differentiation of Plant Stem Cell. *Annual Review of Cell Biology*. 2018; 34: 289–310. DOI: 10.1146/annurev-cellbio-100617-062459.
21. Sasaki H., Yano T., Yamasaki A. Reduction of High Temperature Inhibition in Tomato Fruit Set by Plant Growth Regulators. *Japan Agricultural Research Quarterly*. 2005; 39: 135–138. DOI: 10.6090/jarq.39.135
22. Shekhawat G. S., Mathur S., Batra A. Role of Phytohormones and Nitrogen in Somatic Embryogenesis Induction in Cell Culture Derived from Leaflets of *Azadirachta indica*. *Biologia Plantarum*. 2009; 53: 707–710. DOI: 10.1007/s10535-009-0127-7
23. Sundberg E., Østergaard L. Distinct and Dynamic Auxin Activities during Reproductive Development. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*. 2009; 1(6). DOI: 10.1101/cshperspect.a001628
24. Tarkowská D., Krampolová E., Strnad M. Plant Triterpenoid Crosstalk: The Interaction of Brassinosteroids and Phytoecdysteroids in *Lepidium sativum*. *Plants*. 2020; 9(10). DOI: 10.3390/plants9101325
25. Villarreal-García D., Nair V., Cisneros-Zevallos L., Jacobo-Velázquez D. A. Plants as Biofactories: Postharvest Stress-Induced Accumulation of Phenolic Compounds and Glucosinolates in Broccoli Subjected to Wounding Stress and Exogenous Phytohormones. *Frontiers in Plant Science*. 2016; 7(45). DOI: 10.3389/fpls.2016.00045
26. Wani S. H., Kumar V., Shriram V., Kumar S. S. Phytohormones and Their Metabolic Engineering for Abiotic Stress Tolerance in Crop Plants. *Crop Science*. 2016; 4: 162–176. DOI: 10.1016/j.cj.2016.01.010
27. Watanabe B. Structure-Activity Relationship Studies of Insect and Plant Steroid Hormones. *Journal of Pesticide Sciences*. 2015; 40: 146–151. DOI: 10.1584/jpestics.J15-04
28. Zhao Y. Auxin Biosynthesis and its Role in Plant Development. *Annual Review of Plant Biology*. 2010; 61: 49–64. DOI: 10.1146/annurev-applant-042809-112308

Статья поступила в редакцию 10.04.2025; одобрена после рецензирования 26.05.2025; принята к публикации 20.06.2025.

INFLUENCE OF PHYTOHORMONES AND ARACHIDONIC ACID
ON PRODUCTION OF ECDYSTEROIDS AND GLYCOSYLFLOWONES
IN *SILENE AMOENA* (CARYOPHYLLACEAE)

D. N. Olennikov, N. I. Kaschenko, T. M. Shishmaryova,
V. M. Shishmaryov, T. V. Kornopoltseva, E.V. Petrov

Daniil N. Olennikov
Dr. Sci. (Pharm.), Laboratory Head
olennikovdn@mail.ru

Nina I. Kashchenko
Dr. Sci. (Pharm.), Senior Researcher
ninkk@mail.ru

Tatyana M. Shishmaryova
Dr. Sci. (Pharm.), Researcher
shishmarevatm@mail.ru

Vyacheslav M. Shishmaryov
Cand. Sci. (Pharm.), Researcher
shishmarevslava@rambler.ru

Tatyana V. Kornopoltseva
Cand. Sci. (Pharm.), Researcher
tv-kornopol@mail.ru

Evgeny V. Petrov
Cand. Sci. (Pharm.), Researcher
petrov.bur@mail.ru

Institute of General and Experimental Biology SB RAS
6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude 670047, Russia

Abstract. Phytohormones are signaling molecules produced by plant objects in low concentrations that control all aspects of plant growth and development: embryogenesis, protection from pathogens, stress resistance, reproductive development, etc. Investigations on the influence of phytohormones on secondary metabolites such as ecdysteroids and low molecular weight phenolic compounds is a promising area. In the course of the ongoing chemical study of the species of the genus *Silene*, we have selected as an object of our research the widespread species of this genus — *S. amoena* L. The research focuses on studying the influence of exogenous phytohormones on the productivity and accumulation of ecdysteroids and glycosylflavones in the herb and root of *S. repens*. Using high-performance liquid chromatography with ultraviolet, diode array, and mass spectrometric (electrospray ionization) detection (HPLC-UV, HPLC-DMD-ESI-MS) in the aerial part of the introduced *S. amoena* samples, we have established the presence of 12 ecdysteroids, among which 20-hydroxyecdysone, polypodin B and six glycosylflavones, derivatives of schaftoside, isovitexin, swertisin, are the dominant compounds. It has been found that to increase the productivity of *S. amoena*, the use of ethyl ester of arachidonic acid is justified, and to obtain raw materials with a high

content ofecdysteroids and glycosylflavones, it is recommended to use 24-epibrassinolide (100 mg/L) and 4-chlorophenoxyacetic acid (100 mg/L) respectively.

Keywords: *Silene amoena*, Caryophyllaceae, ecdysteroids, glycosylflavones, HPLC, phytohormones, mass-spectrometry.

Acknowledgments

The study was supported by the Ministry of Education and Science, project No FWSM-2021-0005 (№121030100227-7).

For citation

Influence of Phytohormones and Arachidonic Acid on Production of Ecdysteroids and Glycosylflavones in *Silene amoena* (Caryophyllaceae) / D. N. Olennikov, N. I. Kaschenko, T. M. Shishmaryova et al. *Nature of Inner Asia*. 2025; 2(31): 105–116 (In Russ.).
DOI: 10.18101/2542-0623-2025-2-105-116

The article was submitted 10.04.2025; approved after reviewing 26.05.2025; accepted for publication 20.06.2025.