

УДК 577.127.4; 58.009

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАСТЕНИЯ *KOENIGIA WEYRICHII*

© А.В. Коровкина¹, Н.С. Цветов^{2*}, С.И. Михайлова^{3,4}

¹ Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр» РАН,
ул. Ферсмана, 14, Апатиты, 184209 (Россия)

² Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева, ФИЦ Кольский научный центр РАН, мкр.
Академгородок, 26А, Апатиты, 184209 (Россия), e-mail: n.tsvetov@ksc.ru

³ Национальный исследовательский Томский государственный
университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050 (Россия)

⁴ Всероссийский центр карантина растений, пр. Фрунзе, 109А, Томск,
634021 (Россия)

Koenigia Weyrichii (F. Schmidt) T.M. Schust. et Reveal – травянистое многолетнее растение, интродуцированное в Мурманскую и Томскую области в середине XX в. Это растение накапливает достаточно большое количество флавоноидов, что делает его перспективным источником биологически активных соединений. Целью данного исследования было определить, как различное месторасположение и климатические условия влияют на содержание общих фенолов, флавоноидов, антиоксидантную и антирадикальную активность этанольных экстрактов *K. Weyrichii*, полученных из разных органов растений в разные фазы вегетации. Соцветия, листья верхнего и среднего ярусов *K. Weyrichii* собирали в трех местах – в районах г. Апатиты, Кировска (Кольский полуостров, Мурманская область) и г. Томска (Западная Сибирь, Томская область) в периоды цветения и плодоношения. Для этанольных экстрактов определялось общее содержание полифенольных компонентов в реакции с реактивом Фолина-Чокалтеу, флавоноидов в реакции с хлоридом алюминия, общая антиоксидантная и антирадикальная активность, определяемые фосфомолибдатным и DPPH методами соответственно. Результаты факторного анализа ANOVA показали, что указанные параметры зависят от места произрастания, периода сбора и типа растительной ткани. Большее значение накопления общих полифенолов наблюдалось в Кировске – 106.2 мг GAE/г (GAE – эквивалент галловой кислоты), наименьшее – в Томске: 86.1 мг GAE/г. Среднее значение накопления флавоноидов было больше в Апатитах – 4.39 мг, RE/г (RE – эквивалент рутина), меньше – в Томске – 3.12 мг RE/г. Более низкие температуры, меньшее количество осадков, большая продолжительность светового дня в Апатитах и Кировске способствовали большему накоплению флавоноидов по сравнению с Томском. В соцветиях в период массового цветения отмечено большее накопление флавоноидов и большая антиоксидантная активность экстрактов на всех трех площадках. Полученные данные могут быть использованы в качестве теоретической основы для рационального использования *K. Weyrichii* в качестве перспективного источника флавоноидов.

Ключевые слова: *Koenigia Weyrichii*, флавоноиды, антиоксидантные свойства, антирадикальная активность, климатические условия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 22-26-20114.

Введение

Коровкина Анна Викторовна – научный сотрудник
лаборатории медицинских и биологических технологий,
e-mail: dokkorr@list.ru

Цветов Никита Сергеевич – кандидат химических наук,
научный сотрудник, e-mail: n.tsvetov@ksc.ru

Михайлова Светлана Ивановна – кандидат
биологических наук, доцент кафедры
сельскохозяйственной биологии, старший научный
сотрудник, e-mail: mikhailova.si@yandex.ru

Koenigia Weyrichii (F. Schmidt) T.M. Schust.
et Reveal (syns. *Polygonum weyrichii* F. Schmidt,
Aconogonon weyrichii (Fr. Schmidt) Hara) – вид
Koenigia, произрастающий в Северо-Восточной
Азии и на Дальнем Востоке России. Это растение
было введено в культуру в разных регионах России
в середине XX века как кормовое растение.

* Автор, с которым следует вести переписку.

K. Weyrichii – травянистый многолетник, характеризуется быстрым ростом, высокой урожайностью зеленой массы, холодостойкостью и морозостойкостью, содержит значительное количество флавоноидов в наземных частях, листьях и соцветиях [1].

Флавоноиды являются обширной группой полифенолов, широко распространенных у растений и представляющих важную составляющую механизма их неспецифической адаптации к неблагоприятным условиям внешней среды [2]. Вследствие сходства мембранных механизмов повреждения и адаптаций растений и животных, растительные адаптогены с успехом применяются в медицинской практике. Существует значительный интерес к флавоноидам, поскольку они демонстрируют широкий спектр полезных для здоровья человека видов фармакологической активности: антиоксидантная [3], вазопротекторная [4], противовоспалительная [5], антиконцерогенная [6], противовирусная [7] и др. У растений при действии абиотических и биотических стрессов содержание флавоноидов, как и других низкомолекулярных биологически активных соединений, может значительно возрасти [8]. Многие климатические факторы (фотопериод, температура, количество осадков, влажность и др.) влияют на биосинтез вторичных метаболитов у растений. Природа и распределение фенолов различаются в зависимости от растительной ткани и фазы развития растения [8]. Антиоксидантная и антирадикальная активность растения во многом обусловлена содержанием веществ фенольного характера, следовательно, перечисленные факторы могут оказывать на них влияние.

В целях рационального использования растения *K. Weyrichii*, перспективного источника флавоноидов, необходимо детальное изучение синтеза полифенольных соединений, флавоноидов, определения антирадикальной и антиоксидантной активности в рассматриваемом растении в зависимости от экологических условий мест обитания. Однако данные о сезонных, географических различиях накопления полифенолов, флавоноидов у растения *K. Weyrichii* крайне ограничены [9].

Цель данного исследования – количественное определение общего содержания полифенолов, флавоноидов, антиоксидантной и антирадикальной активности экстрактов растения *K. Weyrichii*, произрастающего в Мурманской и Томской областях, и оценка влияния на эти параметры места произрастания, климатических условий, фазы вегетации, растительной ткани разных органов растения.

Материалы и методы

Растительный материал. Исследования проводились с растительным материалом листьев верхнего и среднего ярусов побегов, соцветий растения *K. Weyrichii*, произрастающих в заповедных зонах и дендрариях Полярно-Альпийского ботанического сада-института, расположенных на участках в г. Кировске и г. Апатиты Мурманской, а также на территории Сибирского Ботанического сада г. Томска, собранных в 2020 г. Сбор растительного материала проводили в фазе массового цветения и в период плодоношения. Растение *K. Weyrichii* было идентифицировано опытными биологами, работающими в Ботанических садах.

Географическое положение и климатические условия. Территория Сибирского Ботанического сада (56°49'N 84°97' E) находится на равнине, на востоке Западной Сибири, на высоте 117 м над уровнем моря. Климат резко континентальный. Апатитская (67°34'N 33°24' E) и Кировская (67°36'N 33°40'E) территории находятся на незначительном расстоянии друг от друга (24 км), однако отличаются климатическими условиями. Экспериментальный участок г. Апатиты находится на предгорной равнине, на высоте 140 м над уровнем моря в лесополосе Полярного Альпийского Ботанического сада-института, а лесной пояс территории г. Кировска – на высоте 340 м над уровнем моря, в Хибинских горах. Эти территории находятся за Полярным кругом, в центре Кольского полуострова, в северной атлантико-арктической климатической области умеренного климата. Вследствие того, что эти два региона находятся на высоких широтах, они практически целиком попадают в зону аврорального овала – области, где наиболее часто наблюдаются полярные сияния, обусловленные нестабильностью геомагнитного поля и повышенной активностью космической радиации [10]. В Томске наблюдались более высокие средние показатели температуры воздуха в течение вегетационного периода, а также большее количество осадков, чем в Апатитах и Кировске. Однако продолжительность светового дня в Апатитах и Кировске больше, чем в Томске (рис. 1).

Использованные реактивы. Молибдат аммония, дигидрофосфат калия, карбонат натрия, хлорид алюминия, уксусная кислота (все реактивы квалификации ХЧ, Вектон), концентрированная серная кислота (>94%, Невареактив), этанол (96%, РФК), ацетонитрил (99.9% для ВЭЖХ), 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (99%, Sigma-Aldrich), реактив Фолина-Чокалтеу (2M, Sigma-Aldrich), аскорбиновая кислота (>99.7%, HUGESTONE, China), галловая кислота (98% Sigma-Aldrich), рутин (≥94%, Sigma-Aldrich) и дистиллированная вода.

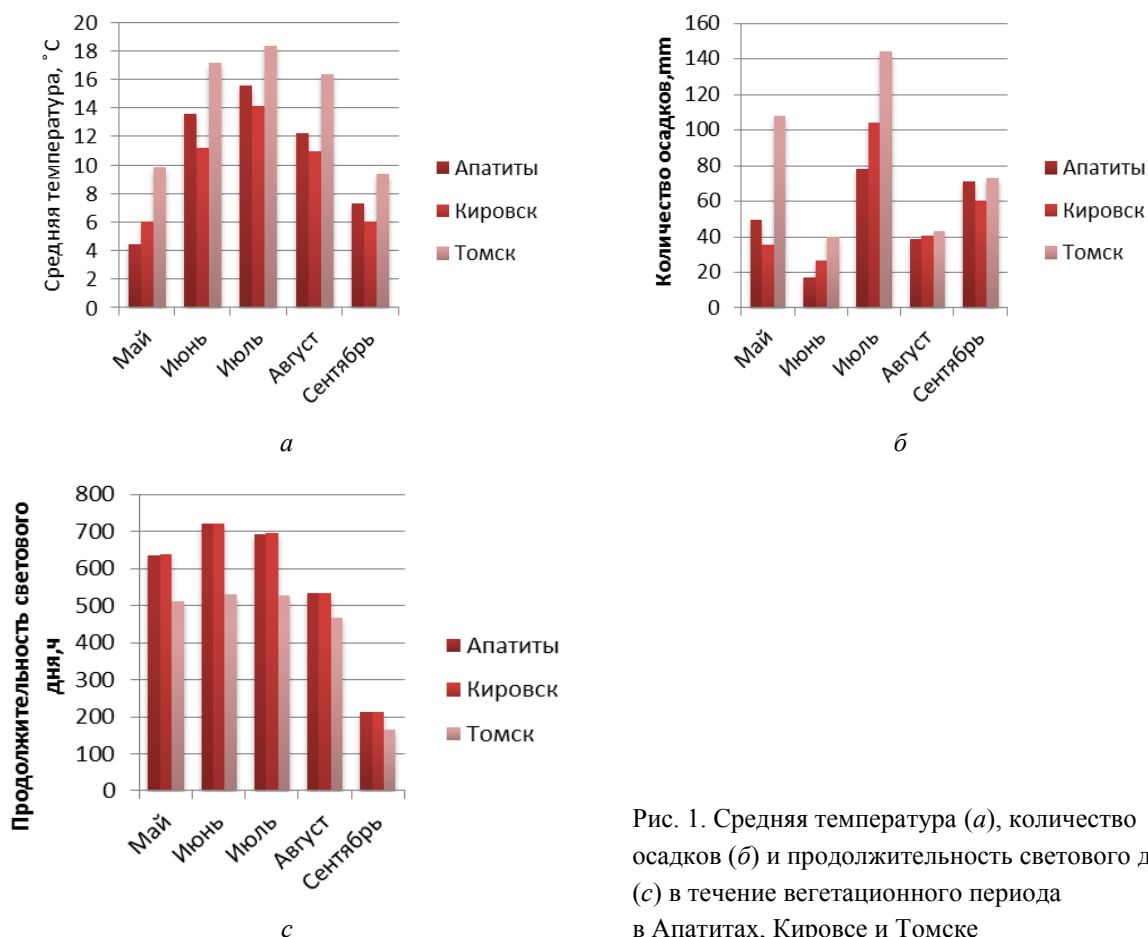


Рис. 1. Средняя температура (а), количество осадков (б) и продолжительность светового дня (с) в течение вегетационного периода в Апатитах, Кировске и Томске

Процедура экстракции. После сушки и хранения, согласно нормам, установленным для лекарственного сырья [11], его измельчали и просеивали через сито с диаметром 1 мм. Затем просеянный материал сушили в течение 3 часов при температуре +70 °С (до стабилизации его массы). Для экстракции использовалась мацерация. 0.1 г растительного материала смешивали с 1 мл смеси этанол + вода (70 об.% этанола) и выдерживали в течение 24 ч в воздушном термостате при температуре 25 °С при периодическом перемешивании. После экстракции растворы центрифугировали в течение 15 мин со скоростью 2000 оборотов в минуту и фильтровали.

Общее содержание полифенолов (total phenolic content, TPC) определяли с помощью реакции с реактивом Фолина-Чокалтеу по методике, описанной в [12] с небольшими модификациями. Исходный 2М реактив разбавляли в 10 раз дистиллированной водой, к 1 мл полученного раствора добавляли 0.2 мл разбавленного в 100 раз экстракта, через 5 мин добавляли 0.8 мл 5% карбоната натрия и оставляли в темноте при комнатной температуре на 60 мин. После этого измеряли оптическую плотность с помощью фотоколориметра КФК-3-01 (ЗОМЗ, Россия, 2010 г.) при длине волны 765 нм. Общее содержание фенольных компонентов выражали в мг эквивалента галловой кислоты (GAE) на 1 г растительного материала. Общее содержание фенольных компонентов выражается в мг эквивалента галловой кислоты (GAE) на 1 г растительного материала:

$$TPC = \frac{0.1 \cdot (A_{765} - b) \cdot V_{ext}}{a \cdot m_{plant}}, \text{ мг GAE/г}$$

где A_{765} – оптическая плотность при длине волны 765 нм, a и b – коэффициенты линейного уравнения градуировочного графика (наклон и сдвиг соответственно), V_{ext} – объем экстрагента, m_{plant} – масса растительного материала.

Общее содержание флавоноидов (total flavonoid content, TFC) определяли с помощью реакции комплексообразования с хлоридом алюминия [13] 0.05 разбавленного в 5 раз этанолом экстракта смешивали с 0.1 мл 2% раствора хлорида алюминия в 96% этаноле и доводили объем до 2.5 мл 96% этанолом. Оптическая

плотность измерялась при длине волны 415 нм. Общее содержание флавоноидов в экстракте выражается в мг эквивалента рутина (РЕ) на 1 г растительного материала:

$$TFC = \frac{0.005 \cdot k \cdot A_{415} \cdot V_{ext}}{m_{plant}}, \text{ мг РЕ/г}$$

где k – калибровочный коэффициент, A_{415} – оптическая плотность при длине волны 415 нм.

Общая антиоксидантная активность (total antioxidant activity, TAC) определялась с использованием фосфомолибдатного метода [14]. 0.2 мл разбавленного в 30 раз 70% этанолом экстракта смешивали с 2 мл реакционного раствора (4 мМ молибдата аммония, 28 мМ дигидрофосфата калия, 0.6 М серная кислота) в закрывающихся виалах. Смесь термостатировали при 95 °С в течение 90 мин. Затем измеряли оптическую плотность растворов при 850 нм. Общее содержание антиоксидантных веществ в экстракте выражается в мг эквивалента аскорбиновой кислоты (ААЕ) на 1 г растительного материала:

$$TFC = \frac{0.03 \cdot k \cdot A_{850} \cdot V_{ext}}{m_{plant}}, \text{ мг ААЕ/г}$$

где k – калибровочный коэффициент, A_{850} – оптическая плотность при 850 нм.

Антирадикальная активность (free radical scavenging, FRS) определялась с помощью реакции со свободным радикалом 2,2-дифенил-1-пикрилгидразилом (DPPH) [15] 0.05 мл разбавленного в 400 раз 96% этанолом экстракта смешивали с 0.95 мл раствора DPPH в 96% этаноле (4 мг на 100 мл) и термостатировали при 37 °С в течение 30 мин. Затем измеряли оптическую плотность растворов при 505 нм. Общее содержание антиоксидантных веществ в экстракте выражается в мг эквивалента аскорбиновой кислоты (ААЕ) на 1 г растительного материала:

$$FRS = \frac{(A_{505}^{blank} - A_{505}^{ext})}{A_{505}^{blank}} \cdot 100, \%$$

где A_{505}^{blank} – оптическая плотность холостой пробы, содержащей раствор DPPH и аликвоту этанола при длине волны 505 нм, A_{505}^{ext} – оптическая плотность смеси с анализируемым экстрактом.

Обработка результатов измерений. Для исследований использовали по 5 растений, все исследования проводили в тройной повторности. Результаты были выражены в виде средних значений. Все статистические анализы проводились с помощью программного обеспечения Statistica 7.1. Все факторы и их взаимодействие были проанализированы с помощью факторного дисперсионного анализа (ANOVA). Статистически значимые различия сравнивались при $P \leq 0.05$ с использованием теста Тьюки. Коэффициент корреляции r был рассчитан между накоплением флавоноидов и климатическими условиями.

Обсуждение результатов

Факторный дисперсионный анализ трех месторасположений (Апатиты, Кировск, Томск), периода сбора и органа растения растения *K. Weyrichii* показал значимые различия в общем содержании полифенолов, флавоноидов, антиоксидантной и антирадикальной активности экстрактов растения между месторасположением, периодом сбора и органа растения, а также значительное взаимодействие месторасположения и периода сбора, месторасположения и органа растения, периода сбора и органа растения, месторасположения × периода сбора × органа растения (табл. 1).

Общее содержание полифенолов, флавоноидов, антиоксидантой и антирадикальной активности экстрактов различных органов растения *K. Weyrichii*, собранных в различные периоды вегетации в трех разных месторасположениях, а также результаты теста Тьюки, описывающие статистическую значимость между средними значениями определяемых параметров в рамках одного месторасположения, представлено в таблице 2.

Таблица 1. Результаты многофакторного дисперсионного анализа ANOVA (F-значения) на содержание общих фенолов, флавоноидов, антиоксидантной и антирадикальной активности экстрактов растения *K. Weyrichii*, собранного в трех местах – Апатиты, Кировск, Томск в период массового цветения и в период плодоношения в 2020 г.

Эффект	TPC	TFC	TAC	FRS
Месторасположение (A)	740.50***	148.62 ***	703.794***	334.76 ***
Период вегетации (B)	504.91 ***	211.82***	4.024*	447.91 ***
Орган растения (C)	356.75***	121.14***	100.302***	151.76 ***
A×B	10.12***	58.24***	200.769***	26.96 ***
A×C	791.91***	41.84***	61.500***	106.44 ***
B×C	71.14 ***	154.95***	329.613***	25.01 ***
A×B×C	1704.50 ***	14.02***	34.876***	215.53 ***

*P≤0.05; **P≤0.01; ***P≤0.001

Таблица 2. Общее содержание полифенолов, флавоноидов, общая антиоксидантная и антирадикальная активность экстрактов растения *K. Weyrichii* – Tukey's HSD (достоверно значимая разница) на уровне P<0.05

Место сбора	Орган растения ²	TPC ¹ , мг GAE/г	TFC ¹ , мг, RE/г	TAC ¹ , мг AAE /г	FRS ¹ , %
Апатиты	1	111.2±8.2 ^{2,3,4,5,6}	6.07±0.22 ^{2,3,4,5,6}	49.1±2.0 ^{2,3,4,5,6}	32.8±2.1 ^{2,5,6}
	2	102.5±3.8 ^{1,3,4,5,6}	3.37±0.12 ^{1,3,4,5,6}	36.2±1.9 ^{1,4,5,6}	29.5±2.0 ^{1,3,4,5,6}
	3	77.0±4.0 ^{1,2,5,6}	4.73±0.15 ^{1,2,5,6}	38.2±1.5 ^{1,6}	31.8±1.9 ^{2,5,6}
	4	86.5 ±3.3 ^{1,2,5,6}	4.76±0.22 ^{1,2,5,6}	38.5±1.5 ^{1,2}	33.3±1.8 ^{2,6}
	5	93.8±2.6 ^{1,2,3,4}	3.54±0.24 ^{1,2,3,4,6}	43.1±1.2 ^{1,2}	40.5±2.0 ^{1,2,3,6}
	6	90.6±2.8 ^{1,2,3,4}	4.11±0.13 ^{1,2,3,4,5}	40.8±1.9 ^{1,2,3}	42.5±1.6 ^{1,2,3,4,5}
Кировск	1	79.1±2.5 ^{2,3,4,5,6}	6.30±0.18 ^{2,3,4,5,6}	43.6±1.8 ^{2,3,4,5}	33.8±1.4 ^{2,3,5,6}
	2	120.1±8.1 ^{1,3,4,5,6}	3.16±0.21 ^{1,4,5,6}	36.4 ±1.8 ^{1,4,5,6}	38.1±1.6 ^{1,3,4,5,6}
	3	135.2±8.2 ^{1,2,4,5,6}	3.13±0.23 ^{1,4,5,6}	36.4±1.6 ^{1,4,5,6}	40.5±1.9 ^{1,2,4,6}
	4	84.9±3.5 ^{1,2,3,5,6}	4.04±0.26 ^{1,2,3,5}	40.6±2.0 ^{1,2,3,5,6}	32.8±1.8 ^{2,3,5,6}
	5	68.1±1.6 ^{1,2,3,5,6}	3.50±0.14 ^{1,2,3,4,6}	48.2±1.5 ^{1,2,3,4,6}	41.6±1.9 ^{1,2,4,6}
	6	150.6±8.8 ^{1,2,3,4,5}	3.20±0.16 ^{1,2,3,5}	43.4±1.6 ^{2,3,4,5}	50.1±1.8 ^{1,2,3,4,5}
Томск	1	81.3±2.2 ^{2,3,4,5,6}	4.20±0.19 ^{2,3,4,5,6}	36.9±1.6 ^{2,3,4,5,6}	27.5±1.6 ^{2,4,5,6}
	2	111.8±2.9 ^{1,3,4,5,6}	3.20±0.20 ^{1,4,6}	33.9±2.0 ^{1,4,5,6}	34.6±1.6 ^{1,3,5,6}
	3	77.6±1.9 ^{1,2,4,5,6}	3.30±0.18 ^{1,4,6}	31.3±2.6 ^{1,4,5,6}	29.5±1.8 ^{2,4,5,6}
	4	101.9±2.0 ^{1,2,3,5,6}	1.09±0 ^{1,2,3,5,6}	25.7±1.9 ^{1,2,3,5}	36.5±1.7 ^{1,3,5,6}
	5	107.3±2.3 ^{1,2,3,4,6}	2.93±0.12 ^{1,2,3,4}	38.6±1.5 ^{1,2,3,5,6}	40.0±2.0 ^{1,2,3,4,6}
	6	43.5±1.2 ^{1,2,3,4,5}	2.72±0.15 ^{1,4}	24.3±1.6 ^{1,2,3,5}	23.2±1.9 ^{1,2,3,4,5}

¹Средние значения ± стандартное отклонение. ²1 – Соцветия период массового цветения; 2 – Листья верхнего яруса в период массового цветения; 3 – Листья среднего яруса в период массового цветения; 4 – Соцветия в период плодоношения; 5 – Листья верхнего яруса в период плодоношения; 6 – Листья среднего яруса в период плодоношения

Общее содержание полифенолов. Наибольшее содержание полифенолов отмечено в Кировске в листьях среднего яруса в период плодоношения – 150.6 мг GAE/г, наименьшее – в Томске в листьях среднего яруса в период плодоношения – 4.5 мг GAE/г. В Апатитах наибольшее содержание общих фенолов было в соцветиях, в Кировске – в листьях среднего яруса, в Томске – в листьях верхнего яруса. В Апатитах и Кировске наблюдалось увеличение количества общих фенолов в листьях среднего яруса к периоду плодоношения, в то время как в Томске, наоборот, наблюдалось снижение накопления общих фенолов в данном органе. Однако среднее содержание общих полифенолов на трех площадках снижалось к периоду плодоношения. Различное содержание общих полифенолов в разных органах растения и в разные вегетационные периоды, по всей видимости, связано с тем, что на способность накапливать общие полифенолы оказывают влияние разные факторы, причем для каждого растения в разных местах произрастания существуют свои закономерности, определяющие индивидуальный уровень общих полифенолов [16]. Достоверные различия в накоплении общих полифенолов по трем площадкам наблюдалось между Кировск-Апатиты при P=0.004 и Томск-Кировск при P<0.0001. В общей сложности среднее значение накопления общих фенолов за оба периода больше в Кировске, наименьшее – в Томске (рис. 2).

Общее содержание флавоноидов. Наибольшее содержание флавоноидов отмечено в соцветиях в период цветения в Кировске – 6.30 мг RE/г, наименьшее – в соцветиях в период плодоношения в Томске –

1.09 мг RE/г. На всех трех площадках максимальное количество флавоноидов было в соцветиях в период цветения. Очевидно, это связано с тем, что флавоноиды необходимы для развития пыльцы, прорастания и роста пыльцевых трубок, оплодотворения и последующего набора семян [17]. В Томске наблюдалось снижение содержания флавоноидов во всех исследуемых органах растения к периоду плодоношения, в Апатитях и Кировске незначительное увеличение данного параметра наблюдалось в листьях верхнего яруса, возможно, это связано с подготовкой растения к зимнему периоду. Однако среднее значение содержания флавоноидов снижалось на всех трех площадках к периоду плодоношения. Достоверные значимые различия накопления общих флавоноидов при $P < 0.0001$ наблюдались между площадками Апатиты-Томск и Кировск-Томск. В общей сложности среднее значение накопления флавоноидов за весь вегетационный период наибольшее в Апатитах, наименьшее – в Томске (рис. 3).

Общая антиоксидантная активность. Наибольшая антиоксидантная активность отмечена в соцветиях в период плодоношения в Апатитах – 49.1 мг ААЕ /г, наименьшая – в Томске в листьях среднего яруса в период плодоношения – 24.3 мг ААЕ /г. В Апатитах и Кировске наблюдалось снижение уровня антиоксидантной активности в соцветиях к периоду плодоношения, с увеличением данного параметра в листьях среднего и верхнего ярусов, в Томске увеличение наблюдалось только у листьев среднего яруса. В Апатитах максимальная антиоксидантная активность наблюдалась в соцветиях в период цветения, в Кировске и Томске – в листьях среднего яруса в период плодоношения. Но в период цветения антиоксидантная активность была больше в соцветиях на всех трех площадках. Вероятно, что для растения в период цветения соцветия более других органов растения нуждаются в антиоксидантной защите [17]. Достоверно значимые различия общей антиоксидантной активности при $P < 0.0001$ наблюдались между площадками Томск-Апатиты и Томск-Кировск. В общей сложности в Апатитах и Кировске наблюдалось большее значение антиоксидантной активности, чем в Томске (рис. 4).

Антирадикальная активность. Наибольшая антиоксидантная активность отмечена в листьях среднего яруса в период плодоношения в Томске – 23.2%, наименьшая – в листьях среднего яруса в период плодоношения в Кировске – 50.1%. На всех трех площадках во всех органах растений наблюдалось снижение антирадикальной активности к периоду плодоношения. Очевидно, это связано с тем, что к этому периоду снижались средние значения накопления общих фенолов и флавоноидов, которые участвуют в процессах нейтрализации влияния свободных радикалов [18]. Достоверно значимые различия при $P < 0.0001$ наблюдались между площадками Кировск-Апатиты и Томск-Кировск, $P = 0.01$ – Томск-Апатиты. В общей сложности в Томске наблюдалась большее значение антирадикальной активности, в Кировске – меньшее (рис. 5).

Влияние географического положения на накопление общих полифенолов и флавоноидов. Географическое положение в совокупности с климатическими условиями, возможно, оказывает влияние на накопление флавоноидов. С помощью корреляционного анализа выявлена взаимосвязь между накоплением общих флавоноидов и температурой воздуха, количеством осадков и продолжительностью светового дня за вегетационный период и (рис. 6).

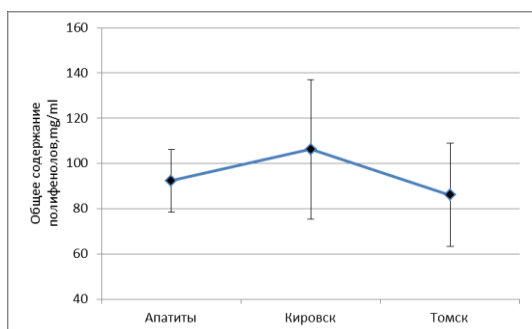


Рис. 2. Среднее значение накопления общих полифенолов в растениях *K. Weyrichii* за вегетационный период в Апатитах, Кировске и Томске

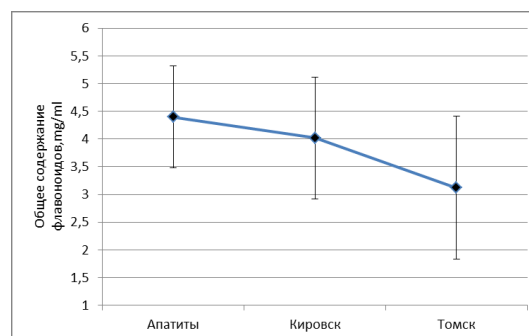


Рис. 3. Среднее значение накопления флавоноидов в растениях *K. Weyrichii* за вегетационный период в Апатитах, Кировске и Томске

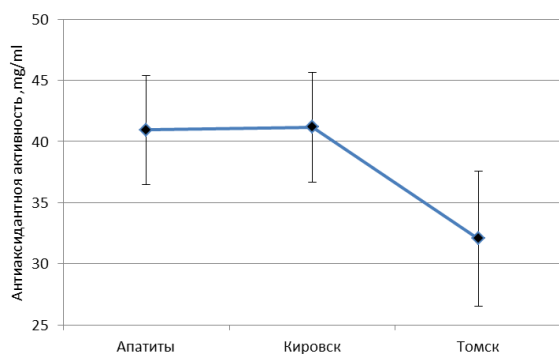


Рис. 4. Среднее значение антиоксидантной активности экстрактов растения *K. Weyrichii* за вегетационный период в Апатитах, Кировске и Томске

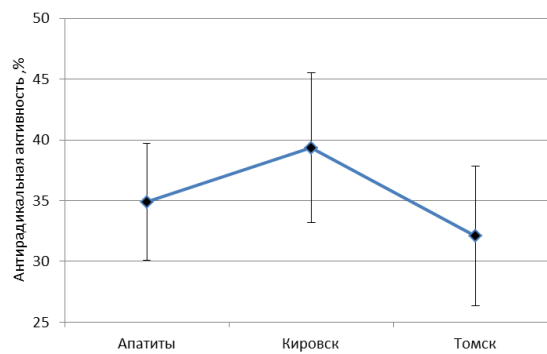
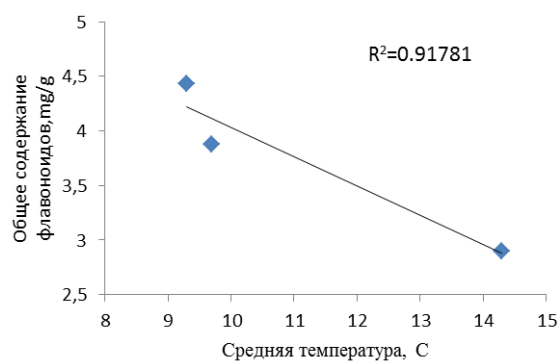
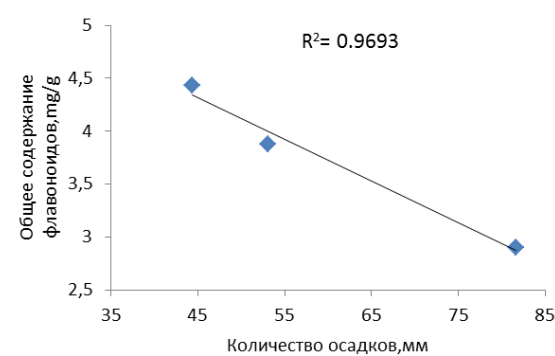


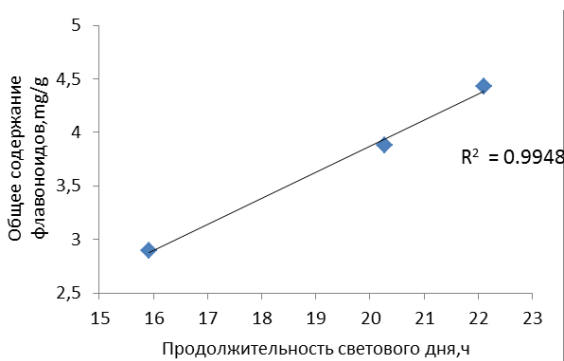
Рис. 5. Среднее значение антирадикальной активности экстрактов растения *K. Weyrichii* за вегетационный период в Апатитах, Кировске и Томске



а



б



с

Рис. 6. Корреляция между накоплением флавоноидов и средней температуры воздуха (а), количеством осадков (б) и продолжительностью светового дня (с)

Наблюдалось увеличение накопления флавоноидов при более низких температурах и меньшем количестве осадков. Это согласуется с данными, что растения увеличивают синтез антиоксидантов в стрессовых условиях, включая абиотические стрессы [19]. Увеличение накопления флавоноидов с увеличением продолжительности светового дня, очевидно, связано с тем, что флавоноиды синтезируются по фенилпропаноидному пути при стимуляции светом [20]. Также некоторые исследования показали, что низкая температура может увеличивать накопление флавоноидов, но накопление флавоноидов при низких температурах зависит от количества света [21]. Это полностью согласовывается с полученными нами данными, в Апатитах и Кировске отмечены более низкие температуры воздуха по сравнению с Томском и более продолжительный световой день. В отношении накопления общих полифенолов данных закономерностей отмечено не было.

Выводы

1. Получены экспериментальные данные о содержании полифенольных веществ и флавоноидов, антиоксидантных и антирадикальных свойств в этанольных экстрактах соцветий и листьев *K. Weyrichii*,

собранных на экспериментальных площадках ПАБСИ КНЦ РАН в районе г. Апатиты и г. Кировска и на территории Сибирского Ботанического сада г. Томска на разных стадиях вегетации.

2. Различные местоположения, температура воздуха, количество осадков, продолжительность светового дня влияли на содержание общих фенолов, флавоноидов, антиоксидантную и антирадикальную активность этанольных экстрактов *K. Weyrichii*.

3. Больше накопление общих полифенолов наблюдалось в Кировске, наименьшее – в Томске.

4. Среднее накопление флавоноидов было выше в Апатитах, самое низкое – в Томске.

5. Более низкие температуры, меньшее количество осадков и более продолжительный световой день в Апатитах и Кировске, возможно, способствовали большему накоплению флавоноидов по сравнению с Томском.

6. В соцветиях в период массового цветения было отмечено большее накопление флавоноидов и большая антиоксидантная активность экстрактов во всех трех местах.

Полученные данные могут быть использованы в качестве теоретической основы для рационального использования *K. Weyrichii* в качестве перспективного источника флавоноидов.

Список литературы

1. Korovkina A., Zhirov V., Tsvetov N., Petrashova D. Herbaceous plants growing in Arctic zones as potential perspective sources of valuable flavonoids // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 613. 012058. DOI: 10.1088/1755-1315/613/1/012058.
2. Panche A.N., Diwan A.D., Chandra S.R. Flavonoids: an overview // Journal of Nutritional Science. 2016. Vol. 47. Pp. 1–15. DOI: 10.1017/jns.2016.41.
3. Siasos G., Tousoulis D., Tsigkou V., Kokkou E., Oikonomou E., Vavuranakis M., Basdra E.K., Papavassiliou A.G., Stefanadis C. Flavonoids in Atherosclerosis: An Overview of Their Mechanisms of Action // Current Medicinal Chemistry. 2013. Vol. 20. N21. Pp. 2641–2660. DOI: 10.2174/0929867311320210003.
4. Suganya N., Dornadula S., Chatterjee S., Mohanram R.K. Quercetin improves endothelial function in diabetic rats through inhibition of endoplasmic reticulum stress-mediated oxidative stress // European Journal of Pharmacology. 2018. Vol. 819. Pp. 80–88. DOI: 10.1016/j.ejphar.2017.11.034.
5. Maleki S.J., Crespo J.F., Cabanillas B. Anti-inflammatory effects of flavonoids // Food Chemistry. 2019. Vol. 299. Pp. 124124–125126. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125124.
6. Siddiqi A., Saidullah B., Sultana S. Anti-carcinogenic effect of hesperidin against renal cell carcinoma by targeting COX-2/PGE2 pathway in Wistar rats // Environmental Toxicology. 2018. Vol. 33. N10. Pp. 1069–1077. DOI: 10.1002/tox.22626.
7. Guo H., Wan X.H., Niu F.J., Sun J.J., Shi C.X., Ye J.M., Zhou C.Z. Evaluation of antiviral effect and toxicity of total flavonoids extracted from *Robinia pseudoacacia* cv. idaho // Biomedicine & Pharmacotherapy. 2019. Vol. 118. 109335. DOI: 10.1016/j.biopha.2019.109335.
8. Yang L., Wen K.-S., Ruan X., Zhao Y.-X., Wei F., Wang Q. Response of Plant Secondary Metabolites to Environmental Factors // Molecules. 2018. Vol. 23. N4. Pp. 762–768. DOI: 10.3390/molecules23040762.
9. Korovkina A.V., Zhirov V.K. Environmental factors affecting flavonoid accumulation in plants *Poligonum weyrichii* growing in Murmansk region // Regulatory Mechanisms in Biosystems. 2019. Vol. 10. N4. Pp. 553–559. DOI: 10.15421/021981.
10. Marshall G.J., Vignols R.M., Rees W.G. Climate Change in the Kola Peninsula, Arctic Russia, during the Last 50 Years from Meteorological Observations // Journal of Climate. 2016. Vol. 29. N18. Pp. 6823–6840. DOI: 10.1175/jcli-d-16-0179.1.
11. Waterhouse A.L. Determination of Total Phenolics // Book Determination of Total Phenolics. John Wiley & Sons, 2001. Pp. 1.1.1–11.1.8.
12. Ainsworth E.A., Gillespie K.M. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent // Nature Protocols. 2007. Vol. 2. N4. Pp. 875–877. DOI: 10.1038/nprot.2007.102.
13. Belikov V.V., Shraiber M.S. Methods of analysis of flavonoid compounds // Farmatsiia. 1970. Vol. 19. N1. Pp. 66–72.
14. Prieto P., Pineda M., Aguilar M. Spectrophotometric quantitation of antioxidant capacity through the formation of a phosphomolybdenum complex: Specific application to the determination of vitamin E // Analytical Biochemistry. 1999. Vol. 269. N2. Pp. 337–341. DOI: 10.1006/abio.1999.4019.
15. Blois M.S. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical // Nature. 1958. Vol. 181. Pp. 1199–1200. DOI: 10.1038/1811199a0.
16. Hardinsyah, Windardi I.P., Aries M., Damayanthi E. Total Phenolic Content, Quercetin, and Antioxidant Activity of Gandaria (*Bouea Macrophylla* Griff.) Leaf Extract at Two Stages of Maturity // J. Gizi Pangan. 2019. Vol. 14. N2. Pp. 61–68. DOI: 10.25182/jgp.2019.14.2.61-68.
17. Schijlen E., de Vos C.H.R., Martens S., Jonker H.H., Rosin F.M., Molthoff J.W., Tikunov Y.M., Angenent G.C., van Tunen A.J., Bovy A.G. RNA interference silencing of Chalcone synthase, the first step in the flavonoid biosynthesis

- pathway, leads to parthenocarpic tomato fruits // *Plant Physiology*. 2007. Vol. 144. N3. Pp. 1520–1530. DOI: 10.1104/pp.107.100305.
18. Leopoldini M., Russo N., Toscano M. The molecular basis of working mechanism of natural polyphenolic antioxidants // *Food Chemistry*. 2011. Vol. 125. N2. Pp. 288–306. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.08.012.
 19. Zrckova M., Capouchova I., Eliasova M., Paznoch L., Pazderu K., Dvorak P., Konvalina P., Orsak M., Sterba Z. The effect of genotype, weather conditions and cropping system on antioxidant activity and content of selected antioxidant compounds in wheat with coloured grain // *Plant Soil and Environment*. 2018. Vol. 64. N11. Pp. 530–538. DOI: 10.17221/430/2018-PSE.
 20. Jaakola L., Maatta-Riihinen K., Karenlampi S., Hohtola A. Activation of flavonoid biosynthesis by solar radiation in bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) leaves // *Planta*. 2004. Vol. 218. N5. Pp. 721–728. DOI: 10.1007/s00425-003-1161-x.
 21. Davik J., Bakken A.K., Holte K., Blomhoff R. Effects of genotype and environment on total anti-oxidant capacity and the content of sugars and acids in strawberries (*Fragaria X ananassa* Duch.) // *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 2006. Vol. 81. N6. Pp. 1057–1063. DOI:10.1080/14620316.2006.11512171.

Поступила в редакцию 19 мая 2022 г.

После переработки 22 июня 2022 г.

Принята к публикации 20 сентября 2022 г.

Для цитирования: Коровкина А.В., Цветов Н.С., Михайлова С.И. Влияние климатических условий на накопление биологически активных соединений растения *Koenigia Weyrichii* // *Химия растительного сырья*. 2022. №4. С. 249–258. DOI: 10.14258/jcrpm.20220411384.

Korovkina A.V.¹, Tsvetov N.S.^{2}, Mikhaylova S.I.^{3,4} THE INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS ON ACCUMULATION OF BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS IN KOENIGIA WEYRICHII*

¹ Federal Research Center "Kola Science Center" RAS, ul. Fersmana, 14, Apatity, 184209 (Russia)

² Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials. I.V. Tananaeva, Federal Research Center Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 26A, Apatity, 184209 (Russia), e-mail: n.tsvetov@ksc.ru

³ National Research Tomsk State University, pr. Lenina, 36, Tomsk, 634050 (Russia)

⁴ All-Russian Center for Plant Quarantine, pr. Frunze, 109A, Tomsk, 634021 (Russia)

Koenigia Weyrichii (F. Schmidt) T.M. Schust. et Reveal is a herbaceous perennial plant introduced to the Murmansk and Tomsk regions in the mid–twentieth century. This plant accumulates a sufficiently large amount of flavonoids, which makes it a promising source of biologically active compounds. The purpose of this study was to determine how different location and climatic conditions affect the content of total phenols, flavonoids, antioxidant and antiradical activity of *K. Weyrichii* ethanol extracts obtained from different plant organs in different phases of vegetation. Inflorescences, leaves of the upper and middle tiers of *K. Weyrichii* were collected in three places – in the districts of Apatity, Kirovsk (Kola Peninsula, Murmansk region) and Tomsk (Western Siberia, Tomsk region) during flowering and fruiting periods. For ethanol extracts, the total content of polyphenolic components in reaction with Folin-Chokalteu reagent, flavonoids in reaction with aluminum chloride, total antioxidant and antiradical activity determined by phosphomolybdate and DPPH methods, respectively, were determined. The results of ANOVA factor analysis showed that these parameters depend on the place of growth, the period of collection and the type of plant tissue. The higher average value of the accumulation of total polyphenols was observed in Kirovsk – 106.2 мг GAE/г (GAE is the equivalent of gallic acid), the lowest – in Tomsk: 86.1 мг GAE/г. The average value of flavonoid accumulation was higher in Apatity – 4.39 мг RE/г (RE – equivalent of rutin), less in Tomsk – 3.12 мг RE/г. Lower temperatures, less precipitation, and longer daylight hours in Apatity and Kirovsk contributed to a greater accumulation of flavonoids compared to Tomsk. In the inflorescences during the mass flowering period, there was a greater accumulation of flavonoids and a greater antioxidant activity of extracts at all three sites. The obtained data can be used as a theoretical basis for the rational use of *K. Weyrichii* as a promising source of flavonoids.

Keywords: *Koenigia Weyrichii*, flavonoids, antioxidant properties, antiradical activity, climatic conditions.

* Corresponding author.

Referenses

1. Korovkina A., Zhirov V., Tsvetov N., Petrashova D. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 613, 012058. DOI: 10.1088/1755-1315/613/1/012058.
2. Panche A.N., Diwan A.D., Chandra S.R. *Journal of Nutritional Science*, 2016, vol. 47, pp. 1–15. DOI: 10.1017/jns.2016.41.
3. Siasos G., Tousoulis D., Tsigkou V., Kokkou E., Oikonomou E., Vavuranakis M., Basdra E.K., Papavassiliou A.G., Stefanadis C. *Current Medicinal Chemistry*, 2013, vol. 20, no. 21, pp. 2641–2660. DOI: 10.2174/0929867311320210003.
4. Suganya N., Dornadula S., Chatterjee S., Mohanram R.K. *European Journal of Pharmacology*, 2018, vol. 819, pp. 80–88. DOI: 10.1016/j.ejphar.2017.11.034.
5. Maleki S.J., Crespo J.F., Cabanillas B. *Food Chemistry*, 2019, vol. 299, pp. 124124–125126. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125124.
6. Siddiqi A., Saidullah B., Sultana S. *Environmental Toxicology*, 2018, vol. 33, no. 10, pp. 1069–1077. DOI: 10.1002/tox.22626.
7. Guo H., Wan X.H., Niu F.J., Sun J.J., Shi C.X., Ye J.M., Zhou C.Z. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2019, vol. 118, 109335. DOI: 10.1016/j.biopha.2019.109335.
8. Yang L., Wen K.-S., Ruan X., Zhao Y.-X., Wei F., Wang Q. *Molecules*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 762–768. DOI: 10.3390/molecules23040762.
9. Korovkina A.V., Zhirov V.K. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 553–559. DOI: 10.15421/021981.
10. Marshall G.J., Vignols R.M., Rees W.G. *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, no. 18, pp. 6823–6840. DOI: 10.1175/jcli-d-16-0179.1.
11. Waterhouse A.L. *Book Determination of Total Phenolics*. John Wiley & Sons, 2001, pp. 1.1.1–11.1.8.
12. Ainsworth E.A., Gillespie K.M. *Nature Protocols*, 2007, vol. 2, no. 4, pp. 875–877. DOI: 10.1038/nprot.2007.102.
13. Belikov V.V., Shraiber M.S. *Farmatsiia*, 1970, vol. 19, no. 1, pp. 66–72.
14. Prieto P., Pineda M., Aguilar M. *Analytical Biochemistry*, 1999, vol. 269, no. 2, pp. 337–341. DOI: 10.1006/abio.1999.4019.
15. Blois M.S. *Nature*, 1958, vol. 181, pp. 1199–1200. DOI: 10.1038/1811199a0.
16. Hardinsyah, Windardi I.P., Aries M., Damayanthi E. *J. Gizi Pangan*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 61–68. DOI: 10.25182/jgp.2019.14.2.61-68.
17. Schijlen E., de Vos C.H.R., Martens S., Jonker H.H., Rosin F.M., Molthoff J.W., Tikunov Y.M., Angenent G.C., van Tunen A.J., Bovy A.G. *Plant Physiology*, 2007, vol. 144, no. 3, pp. 1520–1530. DOI: 10.1104/pp.107.100305.
18. Leopoldini M., Russo N., Toscano M. *Food Chemistry*, 2011, vol. 125, no. 2, pp. 288–306. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.08.012.
19. Zrckova M., Capouchova I., Eliasova M., Paznocht L., Pazderu K., Dvorak P., Konvalina P., Orsak M., Sterba Z. *Plant Soil and Environment*, 2018, vol. 64, no. 11, pp. 530–538. DOI: 10.17221/430/2018-PSE.
20. Jaakola L., Maatta-Riihinen K., Karenlampi S., Hohtola A. *Planta*, 2004, vol. 218, no. 5, pp. 721–728. DOI: 10.1007/s00425-003-1161-x.
21. Davik J., Bakken A.K., Holte K., Blomhoff R. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 2006, vol. 81, no. 6, pp. 1057–1063. DOI:10.1080/14620316.2006.11512171.

Received May 19, 2022

Revised June 22, 2022

Accepted September 20, 2022

For citing: Korovkina A.V., Tsvetov N.S., Mikhaylova S.I. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 4, pp. 249–258. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20220411384.