

УДК 582.683.2:577.1(571.56-191)

СОДЕРЖАНИЕ РУТИНА, АПИГЕНИН-7-О-ГЛЮКОЗИДА И УРОВЕНЬ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ *ALYSSUM LENENSE* ADAMS (*BRASSICACEAE* BURNETT), ПРОИЗРАСТАЮЩЕГО В РАЗНЫХ ФИТОЦЕНОТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

© *И.В. Воронов**, *Н.С. Данилова*, *В.В. Семенова*

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН ФИЦ ЯНЦ,
пр. Ленина, 41, Якутск, 677980 (Россия), e-mail: viv_2002@mail.ru*

Выявлены особенности накопления рутина и апигенин-7-О-глюкозида и их распределение в надземных органах *Alyssum lenense* Adams (сем. *Brassicaceae* Burnett, порядок *Brassicales*), исследован уровень фотосинтетических пигментов в зависимости от фитоценологических условий произрастания растений на территории Центральной Якутии. Полученные данные по содержанию флавоноидов характеризуются неравномерным распределением по органам относительно разных фитоценологических условий произрастания ценопопуляций. Сбор *A. lenense* проводился во время массового цветения в 8 ценопопуляциях и в коллекции Якутского ботанического сада. Распределение содержания рутина по надземным органам *A. lenense* имело направленность: цветки > листья > стебель и зависело от высоты произрастания популяций, затенения и фитоценоза. Характер распределения апигенин-7-О-глюкозида соответствовал схеме: цветки > листья > стебель и зависел от фитоценологических условий произрастания. Выявлено, что в цветках рутина больше, чем апигенин-7-О-глюкозида в условиях культуры и верониково-типчакowo-ковыльной степи, у растений остальных исследованных ценопопуляций соотношение было обратным. Одинаковое количество флавоноидов в цветках наблюдалось у *A. lenense*, произрастающего в простреловой и замещающеполюнной степи. В большинстве исследованных ценопопуляций в листьях и стеблях содержание апигенин-7-О-глюкозида было выше относительно рутина, за исключением популяций, произрастающих в сухом сосновом лесу, на опушке соснового леса, а в листьях – только у растений на искусственном откосе в начальном этапе зарастания. Фитоценологические условия произрастания влияют на количество пигментов в листьях *A. lenense*: наибольшее количество зафиксировано в популяции, произрастающей в сухом сосновом лесу, наименьшее – в холоднополюнном и замещающеполюнном сообществах.

Ключевые слова: *Alyssum lenense*, рутин, лютеолин-7-О-глюкозид, хлорофилл, каротиноиды, ценопопуляция, Центральная Якутия.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме №0297-2021-0023 ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190038-0.

Введение

Накопление и локализация флавоноидов в процессе онтогенеза растения тесно связаны с условиями их произрастания и [1–3]. Флавоноиды играют существенную роль в защите растений от ультрафиолетового излучения, болезней и травоядных животных [4]. Синтез УФ-В абсорбирующих соединений, таких как рутин, кверцетин и другие полифенолы является одной из важнейших реакций при адаптации к действию УФ-излучения [5, 6]. Умеренное количество УФ-излучения может стимулировать синтез рутина, однако растения могут

Воронов Иван Васильевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник,
e-mail: viv_2002@mail.ru

Данилова Надежда Софроновна – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник,
e-mail: nad9.5@mail.ru

Семенова Варвара Васильевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник,
e-mail: vvsemenova-8@yandex.ru

быть повреждены более высокими дозами [7, 8]. Установлено, что более 50% от общего количества рутина у гречихи содержится в верхнем эпидермисе и зависит от роста и развития листьев, при этом в листьях, расположенных выше содержание рутина возрастает, относительно нижних [9, 10]. Согласно Oomah и Mazza (1996), место произрастания оказывает важное влияние на содержание рутина и других

* Автор, с которым следует вести переписку.

флавоноидов в семенах гречихи [11]. Установлено, что при жаркой и сухой погоде растения гречихи накапливали рутину больше, чем в дождливую и прохладную [12]. Следует отметить, что при кратковременном низкотемпературном воздействии происходит накопление рутин в надземной массе, что может указывать на возможность защиты растения и семян не только от грибкового и бактериального воздействия, но и от действия низких температур [8, 13, 14]. Выявлено, что повышенное содержание азота в почве отражается на снижении биосинтеза рутин, возможно, это обусловлено уменьшением потока фенилаланина из шикиматного пути, в направлении флавоноидов из-за повышенного использования его в биосинтезе белков [15].

Известно, что биоактивный потенциал апигенин-7-О-глюкозида связан с его противогрибковой активностью на *Candida* spp., при этом апигенин-7-О-глюкозид обладает более мощной активностью по сравнению с апигенином. Одним из механизмов противогрибкового действия является снижение внутриклеточных и внеклеточных активных форм кислорода [16]. Установлено, что ассоциированные с растениями бактерии выполняют важные функции для роста и здоровья растений. Выявлено, что на микробиом растений *Chamomilla recutita* (L.) Rauschert. положительно влияют бактериальные инокулянты *B. subtilis* Co1-6 и *P. polymyxa* Mc5Re-14, взаимодействуя с микробиомом растения и воздействуя на его метаболиты, усиливая биосинтез апигенин-7-О-глюкозида в соцветиях [17].

Из литературных источников известно, что содержание флавоноидов может меняться в зависимости от места произрастания [18], фазы онтогенеза [1], эколого-фитоценологических [19] и экологических условий [20]. Влияние фитоценологических условий произрастания растений на накопление вторичных метаболитов является важным вопросом в фитохимических исследованиях, в том числе для поиска перспективных продуцентов биологически активных соединений. Исследования, связанные с влиянием фитоценологических условий на фотосинтетический аппарат растений, также представляют научный интерес, так как содержание пигментов является важным и чувствительным показателем физиологического состояния растений и направленности адаптивных реакций [21].

A. lenense – компонент уникальных реликтовых степных сообществ Центральной Якутии, внесен во многие Красные книги субъектов РФ. Использование *A. lenense* в качестве биосырья для получения биологически активных веществ возможно при его плантационном выращивании. Сведения об органоспецифичном распределении лютеолин-7-О-глюкозида и рутин в зависимости от эколого-фитоценологических условий на территории Республики Саха (Якутия) в литературе отсутствуют.

С учетом этих аспектов в целях рационального использования биологических ресурсов определена цель работы – изучение распределения рутин и апигенин-7-О-глюкозида в надземных органах *Alyssum lenense* и влияния фитоценологических условий на их накопление, локализацию, соотношение и уровень фотосинтетических пигментов.

Экспериментальная часть

Материалом для исследований служила надземная биомасса генеративных особей *Alyssum lenense*. Сбор материала проводился в долине р. Лены в 2019 г., во время цветения в 8 природных ценопопуляциях (ЦП) и в интродукционной популяции в Якутском ботаническом саду ИБПК СО РАН (далее ЯБС).

ЦП 1 входит в состав **верониково-типчакново-ковыльного** сообщества, расположенного на южном склоне (40°) коренного берега р. Лены в окр. г. Якутска на высоте 15–20 м от подножья. Общее проективное покрытие (ОПП) травостоя – 30%, проективное покрытие (ПП) *Alyssum lenense* – 5%. Почва плотная. Антропогенное воздействие отсутствует.

ЦП 2 входит в состав **простреловой** степи, расположенной на пологом (25°) южном склоне коренного берега р. Лены в окр. г. Якутска на высоте 15–20 м от подножья. ОПП травостоя – 50%, ПП *Alyssum lenense* – 1–2%. Почва плотная. Ежегодно на этом участке проводится нерегламентированный весенний пал.

ЦП 3 входит в состав **типчакново-прострелового** сообщества, расположенного на южном склоне (40°) коренного берега р. Лены в окр. Якутска на высоте 80–85 м от подножья на осыпающемся песчаном грунте. Участок сверху ограничен соснами. ОПП травостоя – 30%, ПП *Alyssum lenense* – 10–15%.

ЦП 4 входит в состав **холоднополюнной** степи, расположенной на южном склоне (25–30°) коренного берега р. Лены в окр. с. Немюгюндцы (в 80 км выше г. Якутска) на высоте 5–25 м от подножья. Травостой разреженный, ОПП травостоя – 16%, ПП *Alyssum lenense* – 2%, почва плотная. Антропогенное воздействие сильное – на участке осуществляется выпас крупного рогатого скота (КРС).

ЦП 5 входит в состав **замещающеполюнного** сообщества, расположенного на южном склоне (38°) коренного берега р. Лены в окр. с. Немюгюндцы на высоте 15–25 м от подножья. Почва рыхлая, супесчаная

с выходом каменистых пород, легко осыпающаяся. ОПП травостоя – 30%, ПП *Alyssum lenense* – 5–7%. Антропогенное воздействие умеренное – на участке осуществляется нерегулярный выпас.

ЦП 6 входит в состав **сухого соснового леса**, расположенного на расстоянии 100–150 м от автомобильной междугородной трассы Якутск-Покровск в окр. с. Улахан (в 50 км выше г. Якутска). ОПП травостоя – 50%, ПП *Alyssum lenense* – 1–2%. Опад хвои – 70%. Почва умеренно плотная, под опадом хвои влажная. Антропогенное воздействие умеренное. Участок входит в рекреационную зону, отмечается вытаптывание, выпас КРС.

ЦП 7 произрастает на **опушке соснового леса**, переходящего на береговой северный склон (10°) озера в окр. с. Улахан. ОПП травостоя – 40%, ПП *Alyssum lenense* – 10%. Почва плотная. Антропогенное воздействие сильное – отмечается интенсивное вытаптывание, осуществляется выпас.

ЦП 8 расположена на северо-восточном береговом склоне (45°), на искусственном откосе на начальном этапе зарастания в окр. с. Улахан. ОПП травостоя – 10%, ПП *Alyssum lenense* – 8%. Антропогенное воздействие умеренное в виде вытаптывания. Почва рыхлая осыпающаяся, супесчаная.

Интродукционная популяция в коллекции флоры Якутии ЯБС.

Определение содержания флавоноидов в метанольных экстрактах осуществляли методом ВЭЖХ на микроколоночном хроматографе Милихром А-02 фирмы «ЭкоНова» (Россия), используя программу «Мульти-Хром» для «Windows». В лабораторных условиях измельченную (0,2 мм) навеску надземных органов растений массой 0,05 г экстрагировали в 1,0 мл метанола (Merck) в течение 24 ч при постоянном перемешивании, полученные экстракты пропускали через мембранный фильтр с диаметром пор 0,2 мкм. Разделение проводили на хроматографической колонке ProntoSIL 120-5-C18 AQ размером 2×75 мм. Детектирование осуществляли с помощью УФ-спектрофотометрического детектора при длине волны 350 нм [22]. Повторность опытов трехкратная.

Определение концентрации хлорофилла и каротиноидов проводили на спектрофотометре (СФ 2000, Россия) [23]. Долю хлорофиллов светособирающего комплекса (ССК) рассчитывали по [24]. Для оценки устойчивости растений и интенсивности действия факторов окружающей среды на растительный организм было рассчитано соотношение суммы хлорофиллов к каротиноидам и хлорофиллов a/b . Результаты экспериментов представлены средней арифметической величиной ее стандартной ошибкой. Анализ и оценка достоверности результатов проводилась по [25].

Обсуждение результатов

Полученные данные по содержанию исследованных флавоноидов указывают на их наличие во всех надземных органах растения и характеризуются неравномерным распределением. Известно, что флавоноиды у растений в основном содержатся в цветках [13]. Полученные нами данные согласуются с литературными, но в разных условиях произрастания, соотношение содержания исследованных флавоноидов в надземных органах отличалось. Содержание рутина в органах растения распределяется следующим образом: цветки>листья>стебель во всех исследованных ЦП (табл. 1). Максимальное содержание рутина наблюдалось в цветках и листьях *Alyssum lenense* в ЦП 3 на южном склоне на высоте 80–85 м (9,050 и 3,98 мг/г воздушно-сухой фитомассы соответственно). Минимальное значение содержания рутина в цветках (до 2,510 мг/г воздушно сухой фитомассы) отмечено у особей, произрастающих в сухом сосновом лесу (ЦП 6) и на опушке соснового леса (ЦП 7). По-видимому, на синтез рутина в генеративных органах растений большое влияние оказывает затенение и механическое уплотнение почвы вследствие вытаптывания и выпаса. Минимальное значение по содержанию рутина в листьях (1,120–1,180 мг/г воздушно-сухой фитомассы) наблюдалось у особей ЦП 7 и интродукционной популяции. Максимальное содержание рутина в стеблях было зафиксировано у *A. lenense* в ЦП 4 (ПП 2%) на южном склоне на высоте 5 м, а минимальное его содержание в стеблях отмечено у особей интродукционной популяции.

Выявлено, что содержание апигенин-7-О-глюкозида в *A. lenense* также варьирует в различных эколого-фитоценологических условиях произрастания, в том числе и на органоспецифичном уровне. Известно, что гликозиды преимущественно локализируются в тканях активного роста – листьях, цветках и бутонах [26]. Проведенный анализ показал, что у особей исследованных ценопопуляций локализация апигенин-7-О-глюкозида относительно органов растения различается. Распределение апигенин-7-О-глюкозида в растениях ЦП, расположенных на склонах южной экспозиции на уплотненных почвах (ЦП 1, ЦП 2, ЦП 4, ЦП 5), по органам было следующим: листья>цветки>стебель. Возможным фактором данного соотношения может являться лучшее освещение относительно фитоценозов, расположенных на надпойменной террасе. В условиях

культуры наблюдается сходный характер распределения, что может объясняться тем, что в питомнике высока вероятность повышенного пула почвенных микроорганизмов относительно других типов почв долины Туймаада [27]. Концентрация апигенин-7-О-глюкозида в листьях выше, чем в цветках в 1.2 раза у растений ЦП 1 и 4; в 1.8 раза выше – ЦП 2; в 3.3 раза выше – ЦП 5 и в культуре – выше в 5.1 раза (табл. 1). У особей в ЦП 3, произрастающей на более крутом склоне на высоте 80–85 м, на осыпающемся грунте, распределение апигенин-7-О-глюкозида имеет другой характер: цветки=листья>стебель; содержание апигенин-7-О-глюкозида в цветках и листьях составляет до 10.64 мг/г воздушно сухой фитомассы.

Все ценопопуляции, расположенные на надпойменной террасе (ЦП 6, ЦП 7, ЦП 8) вдоль автодороги, соответствуют распределению: цветки→листья→стебель. При этом содержание апигенин-7-О-глюкозида в цветках выше, чем в листьях, в 2.3–2.5 раза у растений *A. lenense*, входящих в состав ЦП 6 и 8; в 5.6 раза выше – у растений, произрастающих на опушке соснового леса (ЦП 7).

Максимальное содержание апигенин-7-О-глюкозида в цветках (до 10.640 мг/г воздушно-сухой фитомассы) среди исследованных ЦП отмечено у растений, произрастающих в ЦП 3. Минимальное содержание в цветках выявлено у *A. lenense*, произрастающего в культуре (1.500 мг/г воздушно-сухой фитомассы). Выявлено максимальное значение содержания флавоноида в листьях (18.380 мг/г воздушно-сухой фитомассы) у особей, произрастающих в замещающепопынной степи на высоте 15 м (ЦП 5) и минимальное среди выборки (0.870 мг/г воздушно-сухой фитомассы) – в растениях, произрастающих на опушке соснового леса (ЦП 7), что может объясняться слабой солнечной инсоляцией и механическим уплотнением почвы. Высокое содержание апигенин-7-О-глюкозида (2.400 мг/г воздушно-сухой фитомассы) в стеблях *A. lenense* наблюдается у растений, произрастающих в замещающепопынной степи на высоте 15 м (ЦП 5), минимальное содержание флавоноида в стеблях отмечено у особей, произрастающих в условиях культуры и в ЦП 7 и 8.

Возможно, что содержание исследованных флавоноидов в надземных органах *A. lenense* в различных эколого-фитоценологических условиях на данном этапе онтогенеза растений зависит от видовой насыщенности фитоценоза и, соответственно, от возможного влияния аллелопатии, фенотипической и генотипической изменчивости.

Выявлено, что соотношение исследованных флавоноидов в растениях разных ЦП различаются. В условиях культуры в цветках содержание рутина в 2.4 раза больше, чем апигенин-7-О-глюкозида. Так как одна из функций рутина – защита растений от УФ-облучения, возможно, синтез его в качестве протектора протекает более интенсивно. Преобладание слабо-желтой окраски цветков также может указывать на снижение накопления апигенин-7-О-глюкозида.

У особей *A. lenense* ЦП 1 (на высоте 15–20 м) в цветках рутина было в 1.8 раза больше, чем апигенин-7-О-глюкозида. В цветках растений других ценопопуляций содержание рутина, наоборот, ниже, а в ЦП 2 и 5 наблюдалось одинаковое их количество. Возможно, это связано с тем, что у значительной части особей этих ЦП фенологические фазы протекали с некоторым опережением – растения находились в фазе конца цветения, которое характеризуется прекращением активного роста и сопряжено с уравниванием интенсивности синтеза флавоноидов.

Таблица 1. Содержание рутина и апигенин-7-О-глюкозида у *Alyssum lenense*, мг/г воздушно-сухой ткани

ЦП	Рутин	Апигенин-7-О-глюкозид	Рутин	Апигенин-7-О-глюкозид	Рутин	Апигенин-7-О-глюкозид
	цветки		листья		стебель	
1	6.00±0.30 ^d	3.42±0.17 ^b	2.77±0.14 ^e	4.02±0.20 ^d	0.37±0.02 ^d	1.45±0.07 ^f
2	5.45±0.27 ^{d_b}	5.09±0.26 ^{d_b}	3.21±0.16 ^f	9.09±0.45 ^g	0.52±0.03 ^e	1.78±0.09 ^g
3	9.05±0.45 ^g	10.64±0.53 ^{g_b}	3.98±0.20 ^g	10.36±0.52 ^{h_b}	0.49±0.02 ^e	1.98±0.10 ^h
4	7.59±0.36 ^f	9.47±0.47 ^g	3.18±0.16 ^f	12.54±0.63 ⁱ	0.95±0.05 ^f	2.12±0.11 ⁱ
5	5.91±0.30 ^{d_a}	5.51±0.28 ^{d_a}	2.48±0.12 ^d	18.38±0.92 ^j	0.45±0.02 ^e	2.40±0.12 ^j
6	2.51±0.13 ^a	3.80±0.19 ^c	1.86±0.09 ^c	1.62±0.08 ^b	0.22±0.01 ^c	0.19±0.01 ^b
7	2.49±0.13 ^a	4.87±0.24 ^d	1.12±0.06 ^a	0.87±0.04 ^a	0.20±0.01 ^c	0.11±0.01 ^a
8	3.10±0.16 ^b	5.12±0.26 ^d	2.46±0.12 ^d	2.04±0.10 ^c	0.16±0.01 ^b	0.11±0.01 ^a
Интрод попул.	3.66±0.18 ^c	1.50±0.08 ^a	1.18±0.06 ^a	7.64±0.38 ^f	0.10±0.01 ^a	0.13±0.01 ^a

Значения с одинаковыми надстрочными литерами в ряду и подстрочными литерами в строке статистически значимо не различались при $p < 0.05$.

Рассматривая соотношение флавоноидов в листьях *A. Lenense*, выявили более высокое содержание апигенин-7-О-глюкозида, относительно рутина в ценопопуляциях, произрастающих на склоне коренного берега, нежели в листьях особей ЦП 6, 7 и 8, расположенных на надпойменной террасе. В стеблях *A. lenense* накопление апигенин-7-О-глюкозида было выше относительно рутина, за исключением растений, произрастающих в сухом сосновом лесу (ЦП 6) и на опушке соснового леса (ЦП 7). Возможно, что изменение концентрации метаболитов у бурачка в разных фитоценологических условиях произрастания, в том числе, может объясняться и разными ассоциациями бактерий, распространенными в местах произрастания, как патогенных, так и непатогенных видов, при этом накопление апигенин-7-О-глюкозида и его большая локализация также может быть связана с интенсивностью окрашивания лепестков соцветий.

Следует отметить тот факт, что содержание изученных флавоноидов у особей, произрастающих на склонах, более высокое, чем у растений, местообитания которых расположены на надпойменной террасе. Это напрямую зависит, в первую очередь, от ультрафиолетовой нагрузки, которую испытывают растения на склонах, фоновой аллелопатии и эдафического фактора, т.е. содержание флавоноидов изменяется в зависимости от эколого-фитоценологических условий произрастания и свидетельствует об изменении хода метаболических процессов.

Для изучения влияния фитоценологических условий произрастания на уровень фотосинтетических пигментов было определено содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листьях *A. lenense*. Изменение фотохимической активности при адаптации растений к действию биотических и абиотических факторов регулируется концентрацией пигментов в фотосинтетических мембранах [28], при этом хлорофилл чувствительно реагирует на все изменения в обмене веществ и при неблагоприятных условиях изменяется как его общее содержание, так и соотношение отдельных форм (*a/b*) [29]. У большинства высших растений содержание хлорофилла *a* в 2–3.5 раза выше, чем содержание хлорофилла *b* [30]. Хлорофилл *a* – это основной функциональный пигмент, определяющий направление и скорость фотосинтеза в растении, тогда как хлорофилл *b* считается регулятором продуктивности и развития растений. Недостаток хлорофилла *b* приводит к уменьшению биомассы растений, наблюдается задержка цветения, уменьшение листьев и преждевременное их старение. Изменение отношения хлорофиллов *a/b* указывает на изменение соотношения между комплексами реакционных центров фотосистем и светособирающих комплексов [31] и может являться показателем устойчивости растений к неблагоприятным факторам окружающей среды, а соотношение суммы хлорофиллов к каротиноидам характеризует интенсивность действия совокупности факторов окружающей среды на растительный организм.

Наибольшее количество хлорофилла *a* и *b* в листьях *A. lenense* среди исследованных ценопопуляций зафиксировано у особей ЦП 6, высокое содержание каротиноидов наблюдалось у растений ЦП 8 (табл. 2). Минимальное содержание количества исследованных пигментов отмечено у *A. lenense*, произрастающего в холоднопопынной степи на высоте 25 м (ЦП 4) и замещающепопынной степи на высоте 15 м (ЦП 5), низкое количество хлорофилла *b* наблюдалось у растений, произрастающих на опушке соснового леса (ЦП 7).

Таблица 2. Содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях *A. lenense* (мг/г воздушно сухой ткани), их соотношения и уровень ССК

ЦП	С (хл <i>a</i>)	С (хл <i>b</i>)	С кар	Соотношение <i>a/b</i>	*ССК, %	*Соотношение (хл <i>a</i> +хл <i>b</i>)/кар
1	1.29±0.07с	0.62±0.03с	0.26±0.01с	2.07±0.10а	71.41±3.57b	7.49±0.37b
2	1.30±0.07с	0.64±0.03с	0.26±0.01с	2.03±0.10а	72.58±3.63b	7.59±0.38b
3	1.13±0.06b	0.52±0.03b	0.24±0.01с	2.16±0.11b	69.33±3.47a	6.78±0.34a
4	0.95±0.05а	0.44±0.02а	0.17±0.01а	2.18±0.11b	69.64±3.48a	8.55±0.43с
5	0.91±0.05а	0.43±0.02а	0.15±0.01а	2.11±0.11а	70.80±3.53b	8.73±0.44с
6	1.56±0.08d	0.77±0.04е	0.28±0.01с	2.04±0.10а	72.70±3.64b	8.46±0.42с
7	1.14±0.06b	0.47±0.02а	0.23±0.01b	2.45±0.12с	63.82±3.21a	7.09±0.35а
8	1.36±0.07с	0.61±0.03с	0.31±0.02d	2.23±0.11b	68.12±3.41a	6.43±0.32а
Интрод попул.	1.32±0.07с	0.68±0.03d	0.29±0.01с	1.95±0.10а	74.80±3.74b	6.91±0.35а

Значения с одинаковыми надстрочными литерами в ряду статистически значимо не различались при $p < 0.05$

*с учетом закладки 5% ошибки на методику.

Соотношение хлорофиллов *a* и *b* среди исследованных природных ценопопуляций было снижено у растений ЦП 1, 2, 5 и 6. Максимальное значение по соотношению хлорофиллов отмечено у *A. lenense*, произрастающего на опушке соснового леса (ЦП 7), благодаря низкому содержанию хлорофилла *b*, что может указывать более на высокую скорость фотосинтеза. Уровень ССК у особей этой популяции был низким и составлял 63.8%. Наблюдалось снижение накопления исследованных флавоноидов в надземной биомассе *A. Lenense*, произрастающего на опушке соснового леса (ЦП 7) относительно исследованных ценопопуляций, при этом важную, на наш взгляд, роль имеет затенение фитоценоза близко растущими деревьями. Установлено, что уровень ССК в листьях был высоким среди выборки у особей ЦП 1, 2, 5, 6 и интродукционной популяции, что может указывать на то, что большая часть хлорофиллов принадлежит светособирающему комплексу фотосистем. Между тем, известно, что чем выше значение ССК, тем меньше продуктивность фотосинтеза [31].

Установлено, что фитоценотические условия влияют на количество пигментов в листьях *A. lenense*, при этом у большинства растений исследованных ЦП соотношение хлорофиллов *a* и *b* и уровень ССК не отличался от растений, произрастающих в культурных условиях. При этом анализ соотношения суммы хлорофиллов к каротиноидам дает возможность предположить о высокой интенсивности воздействия фитоценотических условий произрастания на *A. lenense* в составе ЦП 4, 5 и 6. У растений ЦП 4, 5 увеличение соотношения происходило за счет уменьшения содержания каротиноидов на фоне низкого содержания хлорофиллов, у растений ЦП 6 – за счет относительного увеличения количества всех исследованных пигментов, возможно, связанного с затенением (ЦП 6 входит в состав сухого соснового леса, ОПП травостоя – 50%, почва влажная).

Выводы

Полученные данные по содержанию рутина и апигенин-7-О-глюкозида указывают на их наличие во всех надземных органах растения. Содержание рутина распределялось: цветки > листья > стебель и зависело от высоты произрастания ценопопуляций, затенения и фитоценоза. Характер накопления апигенин-7-О-глюкозида в *A. lenense* зависел от фитоценотических условий произрастания и распределялся у ЦП, расположенных на склонах южной экспозиции при уплотненных почвах (ЦП 1, 2, 4, 5): листья > цветки > стебель. Интродукционная популяция имела сходный характер распределения и отличалась наибольшими значениями. Содержание флавоноида в цветках и листьях было одинаковым у *A. lenense*, произрастающего в типчаково-простреловой степи на открытом южном склоне сопки на высоте 80–85 м (ЦП 3). Ценопопуляции, расположенные на надпойменной террасе (ЦП6-8) вдоль автодороги, соответствовали распределению: цветки > листья > стебель.

Установлено, что фитоценотические условия влияют на соотношение рутина и апигенин-7-О-глюкозида в исследованных органах *A. lenense*. У большинства исследованных ЦП апигенин-7-О-глюкозида накапливалось больше относительно рутина. Исключением были растения, произрастающие в простреловой степи (ЦП 2) и замещающепольном сообществе (ЦП5), где наблюдалось одинаковое количество исследованных флавоноидов в цветках.

Выявлено, что фитоценотические условия произрастания влияют на количество пигментов в листьях *A. lenense*. Анализ соотношения хлорофиллов *a/b* и уровень ССК у большинства исследованных ЦП не показал статистических отличий от растений, произрастающих в культурных условиях, что может указывать на стабильность функционирования фотосинтетических систем.

Определена возможность использования *A. lenense* в качестве сырья для получения биологически активных веществ при его плантационном выращивании.

Список литературы

1. Минаева В.Г. Флавоноиды в онтогенезе растений и их практическое использование. Новосибирск, 1978. 254 с.
2. Запрометов М.Н. Фенольные соединения: распространение, метаболизм и функции в растениях. М., 1993. 272 с.
3. Высочина Г.И. Фенольные соединения в систематике и филогении семейства гречишных. Новосибирск, 2004. 240 с.
4. Kreft I., Fajjani N., Germ M. Rutin in buckwheat – Protection Of plants and its importance for the production of functional food // Fagopyrum. 2003. Vol. 20. Pp. 7–11.
5. Bjorn L.O. Effects of ozone depletion and increased ultraviolet B radiation on terrestrial plants // Fundamentals for the Assessment of Risks from Environmental Radiation. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1999. Pp. 463–470.

6. Gaberscik A., Germ M., Skof A., Drmaz D., Trost T. UVB radiation screen and respiratory potential in two aquatic primary producers: *Scenedesmus quadricauda* and *Ceratophyllum demersum* // Verh. Internat. Verein. Limnol. 2002. Vol. 27. Pp. 1–4.
7. Kreft S., Strukelj B., Gaberscik A., Kreft I. Rutin in buckwheat herbs grown at different UV-B radiation levels: comparison of two UV spectrophotometric and an HPLC method. *J. Exper // Botany*. 2002. Vol. 53. Pp. 1801–1804.
8. Gao W., Grant R.H., Heisler G.M., Slusser J.R. A geometric ultraviolet-B radiation transfer model applied to vegetation canopies // *Agron*. 2002. Vol. 94. Pp. 475–482.
9. Zhanaeva T.A. Tissue-specific distribution of rutin and rutin-degrading enzymes in buckwheat leaves // *Plant Physiology*. 1998. Vol. 45(1). Pp. 63–66.
10. Wagenbreth D., Hagels H., Schilcher H. Characterisation of buckwheat cultivars and gene bank material for rutin content and growth parameters // *Breeding Research on Medicinal and Aromatic Plants*. Quedlimburg, 1996. Pp. 95–102.
11. Oomah B., Mazza G. Flavonoids and antioxidative activities in buckwheat // *Agr. Food Chem*. 1996. Vol. 44. Pp. 1746–1750.
12. Schneider M., Kuhlmann H., Marquard R. Investigation on rutin content in *Fagopyrum esculentum* under specific climatic condition in the phytotrone // *Breeding Research on Medicinal and Aromatic Plants*. Quedlimburg, 1996. Pp. 351–354.
13. Клыков А.Г. Биологические ресурсы видов рода *Fagopyrum* Mill. (Гречиха) на российском Дальнем Востоке (таксономия, химический состав, возможности использования, культивирование): автореф. дисс. ... докт. биол. наук. Владивосток, 2013. 43 с.
14. Luthar Z. Polyphenol classification and tannin content of buckwheat seeds (*Fagopyrum esculentum* Moench) // *Fagopyrum*. 1992. Vol. 12. Pp. 36–42.
15. Маргна У.В. Взаимосвязь биосинтеза флавоноидов с первичным метаболизмом растений. М., 1990. 144 с.
16. Smiljkovic M., Stanislavljevic D., Stojkovic D., Petrovic I., Marjanovic Vicentic J., Popovic J., Golic Grdadolnik S., Markovic D., Sankovic-Babice S., Glamoclija J., Stevanovic M., Sokovic M. Apigenin-7-O-glucoside versus apigenin: Insight into the modes of anticandidal and cytotoxic actions // *Experimental and Clinical Sciences*. 2017. Vol. 16. Pp. 795–807. DOI: 10.17179/excli2017-300.
17. Schmidt R., Köberl M., Mostafa A., Ramadan E.M., Monschein M., Jensen K.B., Bauer R., Berg G. Effects of bacterial inoculants on the indigenous microbiome and secondary metabolites of chamomile plants // *Frontiers in Microbiology*. 2014. Vol. 5. P. 64. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00064.
18. Машурчак Н.В. Влияние условий произрастания на накопление флавоноидов в природных и экспериментальных популяциях цмина песчаного (*Helichrysum arenarium* L. Moench) в Саратовской области: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Саратов, 2010. 24 с.
19. Ломбоева С.С., Танхаева Л.М., Оленников Д.Н. Динамика накопления флавоноидов в надземной части ортилии однобокой (*Orthilia secunda* L. House) // *Химия растительного сырья*. 2008. №3. С. 83–88.
20. Гусев Н.Ф., Немерешина О.Н. Влияние техногенного загрязнения на содержание флавоноидов в растениях семейства норичниковых Степного Предуралья // *Вестник ОГУ*. 2004. №10. С. 123–126.
21. Blankenship R.E. *Molecular Mechanisms of Photosynthesis*. Malden, MA. Blackwell Science, 2002. P. 321.
22. Шейн А.А., Прокопьев И.А., Филиппова Г.В., Журавская А.Н. Влияние техногенного загрязнения на содержание фотосинтетических пигментов и флавоноидов *Matricaria Chamomila* (Asteraceae) // *Растительные ресурсы*. 2014. №2. С. 235–241.
23. Клейн Р.М., Клейн Д.Т. *Методы исследования растений*. М., 1974. 527 с.
24. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and Carotenoids Pigments of Photosynthetic Biomembranes // *Method. Enzymol*. 1987. Vol. 148. Pp. 350–382.
25. Лакин Г.Ф. *Биометрия*. М., 1980. 293 с.
26. Борисова Г.Г., Ермошин А.А., Малева М.Г., Чукина Н.В. *Основы биохимии вторичного обмена растений: учебное пособие для вузов*. Екатеринбург, 2014. 128 с.
27. Иванова Т.И., Кузьмина Н.П., Саввинов Д.Д. Микробиоценозы мерзлотных почв долины Туймаада Центральной Якутии // *Известия РАН. Серия микробиологическая*. 2014. №6. С. 573–585.
28. Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А. *Хлорофилл и продуктивность растений*. М., 2000. 135 с.
29. Воронина О.Е., Ефимцев Е.И., Татарина Т.А. Пигментный аппарат растений в условиях антропогенного воздействия // *Вестник Московского гос. университета леса. Лесной вестник*. 1999. №2. С. 82–83.
30. Холл Д., Рао К. *Фотосинтез*. М., 1983. 134 с.
31. *Фотосинтез и продукционный процесс: сборник статей АН СССР / ред. А.А. Ничипорович*. М., 1988. 276 с.

Поступила в редакцию 30 октября 2020 г.

После переработки 23 ноября 2020 г.

Принята к публикации 4 декабря 2020 г.

Для цитирования: Воронов И.В., Данилова Н.С., Семенова В.В. Содержание рутина, апигенин-7-О-глюкозида и уровень фотосинтетических пигментов *Alyssum lenense* Adams (*Brassicaceae* Burnett), произрастающего в разных фитоценологических условиях Центральной Якутии // *Химия растительного сырья*. 2021. №1. С. 129–137. DOI: 10.14258/jcrpm.2021018770.

Voronov I.V.*, Danilova N.S., Semenova V.V. THE CONTENT OF RUTIN, APIGENIN-7-O-GLUCOSIDE AND THE LEVEL OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS OF ALYSSUM LENENSE ADAMS (*BRASSICACEAE* BURNETT) GROWING IN DIFFERENT PHYTOCENOTIC CONDITIONS OF CENTRAL YAKUTIA

Institute of biological problems of cryolithozone, Siberian Branch Russian Academy of Science, pr. Lenina, 41, Yakutsk, 677980 (Russia), e-mail: viv_2002@mail.ru

The features of accumulation of rutin and apigenin-7-O-glucoside and their distribution in the aboveground organs of *Alyssum lenense* Adams (*Brassicaceae* Burnett) were revealed. The content of photosynthetic pigments was investigated depending on the phytocenotic conditions of plant growth in the territory of Central Yakutia. The data obtained on the content of flavonoids are characterized by an uneven distribution over organs with respect to different phytocenotic conditions of the growth of cenopopulations. *A. lenense* was collected during flowering period in 8 cenopopulations and in the collection of the Yakutsk Botanical Garden. The distribution of rutin content over the aboveground organs of *A. lenense* was directed: flowers → leaves → stem and depended on the altitude of the population growth, shading, and phytocenosis. The distribution pattern of apigenin-7-O-glucoside corresponded to the scheme: flowers / = leaves → stem and depended on phytocenotic growing conditions. It was revealed that rutin in flowers is higher than apigenin-7-O-glucoside under the conditions of introduction and in the *Veronica incana-Festuca lenensis-Stipa capillata* grass steppe; in the plants of the other studied cenopopulations, the ratio was inverse. The same amount of flavonoids in flowers was observed in *A. lenense*, growing in *Pulsatilla flavescens* steppe and *Artemisia commutata* steppe. In most of the studied cenopopulations, the content of apigenin-7-O-glucoside in leaves and stems was higher than rutin, with the exception of populations growing in a dry pine forest, at the edge of a pine forest, and in leaves - only in plants on an artificial slope at the initial stage overgrowth. Phytocenotic growing conditions affect the amount of pigments in the leaves of *A. lenense*: the largest amount was recorded in the population growing in a dry pine forest, and the smallest in *Artemisia frigida* steppe and *Artemisia commutata* steppe.

Keywords: *Alyssum lenense*, rutin, luteolin-7-O-glucoside, chlorophyll, carotenoids, cenopopulation, Central Yakutia.

References

1. Minayeva V.G. *Flavonoidy v ontogeneze rasteniy i ikh prakticheskoye ispol'zovaniye*. [Flavonoids in plant ontogeny and their practical use]. Novosibirsk, 1978, 254 p. (in Russ.).
2. Zaprometov M.N. *Fenol'nyye soyedineniya: rasprostraneniye, metabolizm i funktsii v rasteniyakh*. [Phenolic compounds: distribution, metabolism and functions in plants]. Moscow, 1993, 272 p. (in Russ.).
3. Vysochina G.I. *Fenol'nyye soyedineniya v sistematike i filogenii semeystva grechishnykh*. [Phenolic compounds in the taxonomy and phylogeny of the buckwheat family]. Novosibirsk, 2004, 240 p. (in Russ.).
4. Kreft I., Fajjani N., Germ M. *Fagopyrum*, 2003, vol. 20, pp. 7–11.
5. Bjorn L.O. *Fundamentals for the Assessment of Risks from Environmental Radiation*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1999. pp. 463–470.
6. Gaberscik A., Germ M., Skof A., Drmaz D., Trost T. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 2002, vol. 27, pp. 1–4.
7. Kreft S., Strukelj B., Gaberscik A., Kreft I. *Botany*, 2002, vol. 53, pp. 1801–1804.
8. Gao W., Grant R.H., Heisler G.M., Slusser J.R. *Agron.*, 2002, vol. 94, pp. 475–482.
9. Zhanaeva T.A. *Plant Physiology*, 1998, vol. 45(1), pp. 63–66.
10. Wagenbreth D., Hagels H., Schilcher H. *Breeding Research on Medicinal and Aromatic Plants*, Quedlimburg, 1996. pp. 95–102.
11. Oomah B., Mazza G. *Agr. Food Chem.*, 1996, vol. 44, pp. 1746–1750.
12. Schneider M., Kuhlmann H., Marquard R. *Breeding Research on Medicinal and Aromatic Plants*, Quedlimburg, 1996, pp. 351–354.
13. Klykov A.G. *Biologicheskkiye resursy vidov roda Fagopyrum Mill. (Grechikha) na rossiyskom Dal'nem Vostoke (taksonomiya, khimicheskii sostav, vozmozhnosti ispol'zovaniya, kul'tivirovaniye): avtoref. diss. ... dokt. biol. nauk*. [Biological resources of species of the genus *Fagopyrum* Mill. (Buckwheat) in the Russian Far East (taxonomy, chemical composition, use, cultivation): author. diss. ... doct. biol. sciences]. Vladivostok, 2013, 43 p. (in Russ.).
14. Luthar Z. *Fagopyrum*, 1992, vol. 12, pp. 36–42.
15. Margna U.V. *Vzaimosvyaz' biosinteza flavonoidov s pervichnym metabolizmom rasteniy*. [The relationship of flavonoid biosynthesis with primary plant metabolism]. Moscow, 1990, 144 p. (in Russ.).
16. Smiljkovic M., Stanislavljevic D., Stojkovic D., Petrovic I., Marjanovic Vicentic J., Popovic J., Golic Grdadolnik S., Markovic D., Sankovic-Babice S., Glamoclija J., Stevanovic M., Sokovic M. *Experimental and Clinical Sciences*, 2017, vol. 16, pp. 795–807. DOI: 10.17179/excli2017-300.
17. Schmidt R., Köberl M., Mostafa A., Ramadan E.M., Monschein M., Jensen K.B., Bauer R., Berg G. *Frontiers in Microbiology*, 2014, vol. 5, p. 64. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00064.
18. Mashurchak N.V. *Vliyaniye usloviy proizrastaniya na nakopleniye flavonoidov v prirodnykh i eksperimental'nykh populyatsiyakh tsmina peschanogo (Helichrysum arenarium L. Moench) v Saratovskoy oblasti: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk*. [The influence of growing conditions on the accumulation of flavonoids in natural and experimental populations of sandy cmin (*Helichrysum arenarium* L. Moench) in the Saratov region: author. dis. ... Cand. biol. sciences]. Saratov, 2010, 24 p. (in Russ.).
19. Lomboyeva S.S., Tankhayeva L.M., Olennikov D.N. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2008, no. 3, pp. 83–88. (in Russ.).
20. Gusev N.F., Nemereshina O.N. *Vestnik OGU*, 2004, no. 10, pp. 123–126. (in Russ.).

* Corresponding author.

21. Blankenship R.E. *Molecular Mechanisms of Photosynthesis*, Malden, MA. Blackwell Science, 2002, p. 321.
22. Shein A.A., Prokop'yev I.A., Filippova G.V., Zhuravskaya A.N. *Rastitel'nyye resursy*, 2014, no. 2, pp. 235–241. (in Russ.).
23. Kleyn R.M., Kleyn D.T. *Metody issledovaniya rasteniy*. [Plant research methods]. Moscow, 1974, 527 p. (in Russ.).
24. Lichtenthaler H.K. *Method. Enzymol.*, 1987, vol. 148, pp. 350–382.
25. Lakin G.F. *Biometriya*. [Biometrics]. Moscow, 1980, 293 p. (in Russ.).
26. Borisova G.G., Yermoshin A.A., Maleva M.G., Chukina N.V. *Osnovy biokhimii vtorichnogo obmena rasteniy: uchebnoye posobiye dlya vuzov*. [Fundamentals of biochemistry of secondary plant metabolism: a textbook for universities]. Yekaterinburg, 2014, 128 p. (in Russ.).
27. Ivanova T.I., Kuz'mina N.P., Savvinov D.D. *Izvestiya RAN. Seriya mikrobiologicheskaya*, 2014, no. 6, pp. 573–585. (in Russ.).
28. Andrianova Yu.Ye., Tarchevskiy I.A. *Khlороfill i produktivnost' rasteniy*. [Chlorophyll and plant productivity]. Moscow, 2000, 135 p. (in Russ.).
29. Voronina O.Ye., Yefimtsev Ye.I., Tatarinova T.A. *Vestnik Moskovskogo gos. universiteta lesa. Lesnoy vestnik*, 1999, no. 2, pp. 82–83. (in Russ.).
30. Khol D., Rao K. *Fotosintez*. [Photosynthesis]. Moscow, 1983, 134 p. (in Russ.).
31. *Fotosintez i produktsionnyy protsess: sbornik statey AN SSSR* [Photosynthesis and the production process: collection of articles of the USSR Academy of Sciences], ed. A.A. Nichiporovich. Moscow, 1988, 276 p. (in Russ.).

Received October 30, 2020

Revised November 23, 2020

Accepted December 4, 2020

For citing: Voronov I.V., Danilova N.S., Semenova V.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2021, no. 1, pp. 129–137. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021018770.

