

УДК 581.19

ФЕНОЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ *VACCINIUM VITIS-IDAEA* И ИХ ОТВЕТ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

© Н.А. Артемкина

Институт проблем промышленной экологии Севера, ФИЦ КНЦ РАН,
мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, 184209 (Россия),
e-mail: artemkina@inep.ksc.ru

Брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.) является одним из доминантов травяно-кустарничкового яруса растительности лесов Кольского полуострова. Играет важную роль в вовлечении в круговорот элементов питания, а также в формировании плодородия почвы благодаря способности синтезировать большое количество фенольных соединений, особенно конденсированных танинов. Изучены некоторые закономерности изменения содержания фенольных соединений, флавоноидов и лигнина в различных органах *Vaccinium vitis-idaea*, произрастающей в условиях промышленного воздушного загрязнения. Установлено, что концентрации лигнина в многолетних листьях *Vaccinium vitis-idaea* уменьшаются при приближении к источнику загрязнения как в еловых, так и в сосновых лесах. Выявлены биогеоценотические и возрастные факторы влияния на химический состав листьев *Vaccinium vitis-idaea*. Брусника накапливает в листьях старших возрастных классов фенольные соединения, в том числе танины. Концентрации целлюлозы и лигнина уменьшаются в многолетних листьях. В результате исследования пришли к выводу, что фенольные соединения играют значительную роль в адаптации *Vaccinium vitis-idaea* к воздействию абиотических и биотических факторов окружающей среды. Фенольные соединения, флавоноиды и лигнин листьев *Vaccinium vitis-idaea* по-разному себя ведут в условиях воздушного загрязнения различной интенсивности.

Ключевые слова: *Vaccinium vitis-idaea*, *Ericaceae*, фенольные соединения, флавоноиды, танины, лигнин, Кольский полуостров, северотаежные леса, биотические и абиотические факторы.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ФИЦ КНЦ РАН (№ 0226-2018-0111).

Введение

Брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.) – часто встречаемый кустарничек в Мурманской области. Она присутствует практически во всех таежных биогеоценозах и является одним из доминантов травяно-кустарничкового яруса растительности лесов Кольского полуострова [1]. Играет важную роль в вовлечении в круговорот элементов питания, а также в формировании плодородия почвы благодаря способности синтезировать большое количество фенольных соединений, особенно конденсированных танинов [2].

Значительная часть экстрактивных веществ листьев брусники относится к фенольным соединениям, среди которых особенно высоки уровни арбутина, фенолкарбоновых кислот, гликозидов флавоноидов, а также катехинов и проантоцианидинов (конденсированных танинов) [3–6]. Метаболизм этих фенольных соединений очень отзывчив к различным экологическим условиям, а именно к температуре [7], свету [8], плодородию почв [9], механическим повреждениям [10], аэротехногенному загрязнению [11, 12], географическому положению, сезонной, возрастной и индивидуальной изменчивости [13]. Известно также, что концентрации фенольных соединений изменяются по высотным и широтным градиентам произрастания [14–17], в дополнение к этому их синтез зависит от последовательных стадий трансформации лесов [18].

Несмотря на большой объем информации по фенольным соединениям *Vaccinium vitis-idaea*, еще существует непонимание основных механизмов ответов фенольных соединений на воздействие разнообразных факторов окружающей среды. Поэтому выявление закономерностей изменения содержания фенольных соединений брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.) в различных органах, разного возраста и в отличающихся условиях произрастания является актуальной задачей. Анализ временной и пространственной организации

Артемкина Наталья Александровна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник,
e-mail: artemkina@inep.ksc.ru

синтеза вторичных метаболитов значительно расширит наши представления об адаптивных возможностях брусники на Крайнем Севере.

Экспериментальная часть

Исследования фенольных соединений *Vaccinium vitis-idaea* были проведены в северотаежных лесах Кольского полуострова, подверженных и не подверженных промышленному воздушному загрязнению выбросами медно-никелевого комбината «Североникель». В частности, в сосняках и ельниках по градиенту загрязнения (на разных стадиях их техногенной трансформации) (1997, 2003 гг.). Главные лесообразующие породы на выбранных площадках *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. Фоновые объекты представлены ельником зеленомошным (260 км от комбината) и сосняком кустарничково-зеленомошным (270 км от комбината). Леса, подверженные воздушному загрязнению, представлены дефолирующими лесами и техногенными редколесьями. Идентифицированы 2 стадии дефолирующих лесов: интенсификации дефолиации – ельник кустарничково-зеленомошный (100 км) и сосняк кустарничково-лишайниковый (48 км) и затухания дефолиации – ельник зеленомошно-кустарничковый (31 км) и сосняк кустарничковый (31 км). Техногенные редколесья представлены еловым (7 км) и сосновым (8 км) редколесьями. Учитывая пространственную гетерогенность биогеоценозов, изучение проводили в их отдельных структурных частях – межкрупных парцеллах, отличающихся друг от друга составом, структурой, свойствами своих компонентов, спецификой их связей и материально-энергетического обмена. А также в ненарушенных ельниках, произрастающих в окрестностях оз. Умбозеро (67°29'N, 34°32'E) (2011 г.) в более 120 км от комбината «Североникель». Стационарные площадки с еловыми ассоциациями составляют профили геохимически сопряженных ландшафтов, структурные части которых (элементарные ландшафты) характеризуются различным типом растительности. Пробные площади были заложены в автоморфных условиях, в ельниках кустарничково-зеленомошных (I); в транзитных условиях, в ельниках зеленомошно-деренно-кустарничковых (II); в аккумулятивных ландшафтах, в ельниках сфагново-багульниковых (III) (рис. 1; S).

Объектам исследований послужили вегетативные органы *Vaccinium vitis-idaea*. Листья текущего года, в данном случае это, соответственно, 1997, 2003 и 2011 гг. и многолетние листья предыдущего года соответственно (1996, 2002 и 2010 гг.) отбирали, чтобы показать различия между молодыми и стареющими листьями. Отбор образцов производился в пятикратной повторности в конце августа начале сентября (конец периода вегетации). Из-за недостаточной для химического анализа массы, образцы корней (n=5) объединяли в одну среднюю пробу. Заготовленные элементы отбора 1997 г. высушивали при комнатной температуре и хранили в бумажных пакетах, а в 2003 и 2011 гг. хранили в холодильнике при температуре 15 °С. Аналитические пробы измельчали до размера частиц, проходящих сквозь сито с отверстиями диаметром 1 мм. С момента сбора до момента проведения анализа проходило не более шести месяцев, исключение составляет отбор 1997 г., который анализировали на содержание лигнина после 8 лет хранения.

Образцы отбирали именно в эти годы, чтобы попробовать учесть влияние снижения выбросов медно-никелевого комбината с 1997 по 2011 гг. Выбросы SO₂ в 1997 г. составили 139.9 тыс. т/год; в 2002 – 43.5 тыс. т/год; в 2011 – 31.3 тыс. т/год. Выбросы Ni в 1997 году составили 1348 т/год; в 2002 – 818 т/год; в 2011 – 345 т/год. Выбросы Cu в 1997 году составили 761 т/год; в 2002 – 698 т/год; в 2011 – 484 т/год (по данным Кольской ГМК). В этот период времени растения анализировали на содержание загрязняющих веществ, элементов питания и параллельно – на содержание основных классов фенольных соединений, результаты по которым представлены в данной статье.

Концентрации фенольных соединений в образцах проводили фотоколориметрическим методом Свейна-Хиллиса с реактивом Фолина-Чокальтеу на КФК-3 при длине волны 730 нм в кюветках с толщиной слоя 10 мм [19]. Количественное определение флавоноидов в пробах проводили фотоколориметрическим методом при длине волны 410 нм [11]. Расчет количества флавоноидов и фенольных соединений производили по калибровочным графикам, построенным по кверцетину и галловой кислоте соответственно (в ненарушенных ельниках, составляющих профиль геохимически сопряженного ландшафта, концентрации фенольных соединений эквивалентны таниновой кислоте). Количественное определение растворимых конденсированных танинов (проантоцианидинов) в образцах проводили фотоколориметрическим методом (555 нм) после реакции полученного извлечения с раствором *n*-бутанол : HCl (95 : 5 v/v) [20]. Расчет количества танинов производили по калибровочным графикам, построенным по конденсированным танинам листьев *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*.

Содержание лигнина и целлюлозы определяли путем обработки пробы 72% серной кислотой, после предварительного кипячения в растворе ЦТАБ (10 г цетилтриметиламмония бромид в 1 л 0.5 М H₂SO₄) [21].

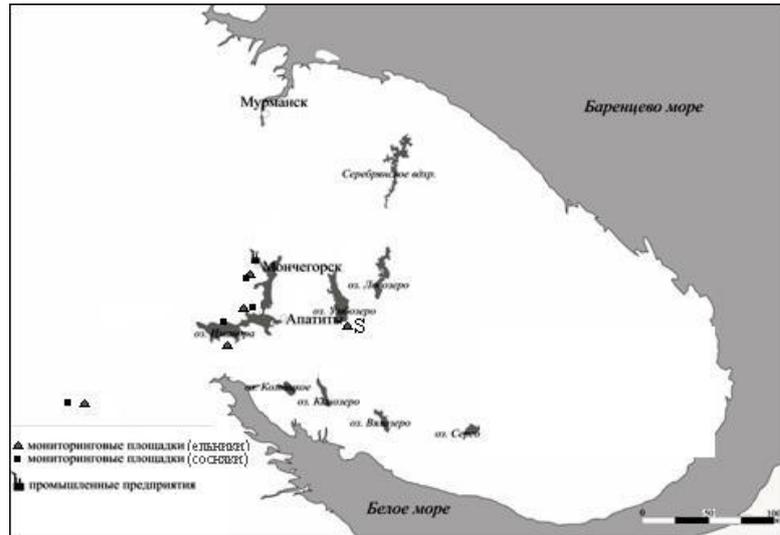


Рис. 1. Карта-схема расположения мониторинговых площадок отбора проб (ИППЭС КНЦ РАН)

Обсуждение результатов

Особенности содержания фенольных соединений в разных органах *Vaccinium vitis-idaea* в условиях воздушного промышленного загрязнения

Еловые леса. В еловых лесах на фоновой территории концентрация фенолов для листьев текущего года и многолетних незначительно отличается и составляет в среднем 108.0 и 120.0 мг/г сухого сырья (далее мг/г). Этот показатель для побегов уменьшается более чем в три раза (33.5 мг/г). В корнях фенолов содержится еще меньше – 16.5 мг/г. Содержание флавоноидов можно расположить в следующем ряду: листья текущего года (58.5 мг/г) > многолетние листья (32.8 мг/г) > побеги (19.1 мг/г) > корни (13.2 мг/г) (рис. 2).

В многолетних листьях *V. vitis-idaea* при приближении к источнику загрязнения наблюдается нелинейная зависимость с максимумом содержания фенольных соединений в зоне дефолилирующих лесов (100 км). Подобное повышение концентрации фенолпропаноидов может происходить в ответ на увеличение вымывания растительных полифенолов из опада [22, 23] и кроны ели. Таким образом, в зоне дефолилирующих лесов (100 км), возможно, проявляется аллелопатический эффект: прямой за счет токсичности кроновых вод и косвенный за счет снижения доступности фосфора и азота [24].

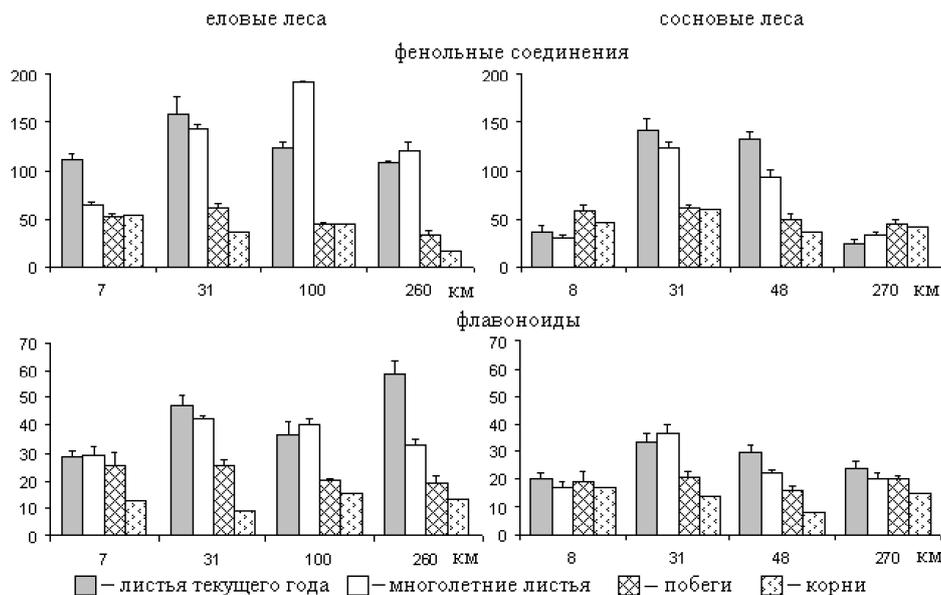


Рис. 2. Содержание фенольных соединений (мг/г) и флавоноидов (мг/г) в различных органах *Vaccinium vitis-idaea*, произрастающей на разном удалении от источника загрязнения (2003 г. – листья текущего года; 2002 г. – многолетние листья)

По мере приближения к источнику загрязнения происходит постепенное увеличение содержания фенолов в листьях текущего года в ряду: фон (260 км) < дефолирующие леса (100 км) < дефолирующие леса (31 км). На стадии техногенного редколесья (7 км) концентрация фенолов в многолетних листьях (64.3 мг/г) и листьях текущего года (112.0 мг/г) ниже, чем в дефолирующих лесах (31 км: 143.6 и 158.4 мг/г соответственно). В зоне техногенного редколесья (7 км) происходит нарушение питательного режима почв, разрушение биогеоценозов, что приводит к изменению хода метаболических процессов в *V. vitis-idaea*. Такая же картина характерна и для содержания флавоноидов в многолетних листьях *V. vitis-idaea*. Прежде такая закономерность была установлена для хвои *Pinus sylvestris* L., подверженной воздействию промышленных поллютантов [25]. В этой работе была установлена двухфазная реакция растений на произрастание в условиях загрязнения, где для первой фазы характерно усиление адаптивных реакций фотосинтезирующих органов в виде повышения концентраций фенольных соединений, а для второй – угнетение метаболических процессов.

Концентрации фенолов и флавоноидов в побегах *V. vitis-idaea* в межкрупных пространствах в зоне техногенного редколесья больше ($p=0.014$ и $p=0.21$ соответственно), чем на фоновой территории. Определенных закономерностей в содержании фенолов и флавоноидов в корнях *V. vitis-idaea* не установлено.

Сосновые леса. В сосновых лесах на фоновой территории концентрация фенолов для многолетних листьев и листьев текущего года отличается незначительно и составляет в среднем 31.2 и 24.2 мг/г. В побегах фенолов содержится в 45.9 мг/г, а в корнях 42.4 мг/г (рис. 2). Содержание флавоноидов представлено в следующем порядке: листья текущего года (24.0 мг/г) > многолетние листья (20.6 мг/г) > побеги (20.0 мг/г) > корни (15.1 мг/г) (рис. 2).

В сосняках происходит накопление общих фенолов и флавоноидов на стадиях дефоляции – 31 км и 48 км по сравнению с фоном в листьях текущего года *V. vitis-idaea* ($p<0.05$) и многолетних ($p<0.05$). Типичными особенностями стадии соснового техногенного редколесья (8 км) являются вымывание фенолов из живых тканей за счет нарушения восковой кутикулы, уменьшение свободных форм орто-дифенолов за счет их взаимодействия с Al и Fe, снижение биоразнообразия. Все вышеперечисленные факторы приводят к изменению хода метаболических процессов и, вследствие этого, к уменьшению содержания фенолов и флавоноидов в фотосинтезирующих органах растений по сравнению со стадиями дефоляции (31 км и 48 км) (рис. 2).

В побегах и корнях *V. vitis-idaea* не выявлено каких-либо закономерностей в изменении содержания фенольных соединений и флавоноидов по мере приближения к источнику загрязнения. Концентрация фенолов и флавоноидов в побегах на основных стадиях дигрессионной сукцессии характеризуется средней вариабельностью полученных результатов (коэффициенты вариации $CV_{\text{фен}}=21.5\%$ и $CV_{\text{флав}}=26.5\%$).

Еловые и сосновые леса. На основании данных, представленных выше, можно подчеркнуть биогеоэкологическую изменчивость в содержании фенолов и флавоноидов. Брусника демонстрирует более ярко выраженную реакцию на влияние ели, чем сосны, что выражается в повышенном содержании означенных выше соединений. Однофакторный дисперсионный анализ показал, что концентрации фенолов ($F=28.9$, $p<0.0001$) и флавоноидов ($F=33.2$, $p<0.0001$) в листьях брусники еловых лесов выше, чем сосновых. Указанные тенденции в отношении ельников могут быть связаны с тем, что ель является более мощным средообразователем. Кроновые и стволовые воды ели значительно кислее и концентрированное, изменяется питательный режим почв и происходит адаптация брусники к таким условиям за счет синтеза большего количества фенолов, выполняющих защитную функцию в растении. В различных условиях произрастания содержание фенольных соединений в листьях брусники сосновых и еловых лесов характеризуется большой вариабельностью полученных результатов, при этом степень максимальной индивидуальной изменчивости меньше ($CV_{\text{инд}}=19.1\%$), чем географической ($CV_{\text{геогр}}=23.5-69.5\%$).

Концентрации лигнина в многолетних листьях *V. vitis-idaea* уменьшаются при приближении к источнику загрязнения как в еловых лесах, так и в сосновых (табл. 1.). В сосновых лесах значительное снижение содержания лигнина происходит уже на стадии дефолирующих лесов (31 км).

Таблица 1. Концентрации лигнина (%) в многолетних листьях *Vaccinium vitis-idaea* (1996 г.), произрастающих на разной стадии трансформации лесов, подверженных промышленному воздушному загрязнению

Расстояние, км	7	31	200
Еловые леса	11.7±0.4	13.6±0.4	15.7±0
Расстояние, км	10	31	110
Сосновые леса	12.6±0.2	12.8±0.2	15.4±0.2

Примечание. Представлены средние арифметические ± стандартная ошибка (n=2).

Зависимость концентраций фенольных соединений от возраста листьев *Vaccinium vitis-idaea*

Результаты исследований представлены на рисунке 3. Установили, что незначительное снижение концентрации целлюлозы с возрастом происходит только в листьях *V. vitis-idaea* ($p=0.12$). Концентрации лигнина в многолетних листьях *V. vitis-idaea* заметно снижаются по сравнению с листьями текущего года ($p<0.05$). Фенольные соединения немного накапливаются с возрастом в листьях *V. vitis-idaea* ($p=0.09$). Динамика накопления проантоцианидинов была аналогична динамике фенольных соединений, т.е. концентрации танинов повышались с возрастом в листьях *V. vitis-idaea* ($p=0.05$).

Таким образом, было установлено, что содержание фенольных соединений, в том числе танинов, а также лигнина и целлюлозы значительно изменяется и зависит от возраста исследуемых органов. *V. vitis-idaea* накапливает в листьях старших возрастных классов фенольные соединения. Кроме того, брусника отличается значительными концентрациями танинов, которые также повышаются в многолетних листьях. Из чего следует, что *V. vitis-idaea*, формируя опад с повышенным содержанием фенольных соединений и танинов, по-своему может влиять на процессы почвообразования в местах своего произрастания.

Биогеоценотические отличия в содержании фенольных соединений *Vaccinium vitis-idaea*

Результаты количественного определения химических компонентов листьев брусники представлены в таблице 2. Концентрации целлюлозы и лигнина с увеличением возраста листьев *V. vitis-idaea* уменьшаются на обеих площадках, однако в ельнике кустарничково-зеленомошном (вершина склона) эта закономерность выражена ярче (снижение целлюлозы на 2.4% по сравнению с 1.0%, снижение лигнина на 6.4% по сравнению с 0.9% в ельнике зеленомошно-деренно-кустарничковом (середина склона)). Соответственно, стехиометрические показатели лигнин/целлюлоза и лигнин/N, косвенным образом показывающие на возможное изменение скорости разложения растительного опада, имеют более широкие значения в ельнике кустарничково-зеленомошном (0.67 и 15.5 для многолетних листьев брусники соответственно по сравнению с 0.62 и 12.1).

Содержание общего количества фенольных соединений и конденсированных танинов, как уже было отмечено, повышается с возрастом листьев *V. vitis-idaea* в исследуемых ельниках. В кустарничково-зеленомошном ельнике (вершина склона) отмечены максимальные концентрации фенольных соединений и конденсированных танинов как в листьях текущего года, так и многолетних, что может быть связано с биогеоценотическим фактором (освещенностью, температурным режимом, плодородием почв и др.).

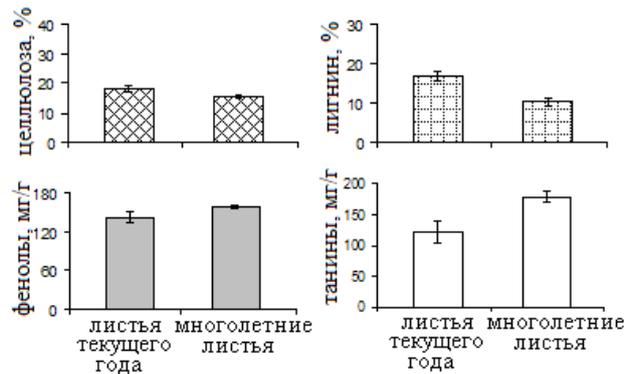


Рис. 3. Химический состав в зависимости от возраста листьев *Vaccinium vitis-idaea*, произрастающих в ненарушенном ельнике кустарничково-зеленомошном (n=3) (2011 г. – листья текущего года; 2010 г. – многолетние листья)

Таблица 2. Химический состав *Vaccinium vitis-idaea* в различных биогеоценозах

Состав	Ельник кустарничково-зеленомошный		Ельник зеленомошно-деренно-кустарничковый	
	Листья текущего года	Многолетние листья	Листья текущего года	Многолетние листья
Целлюлоза, %	17.8±1.1	15.4±0.5	16.5±0.2	15.5±0.2
Лигнин, %	16.7±1.1	10.3±1.0	10.6±0.4	9.7±0.4
Лигнин/целлюлоза	0.94±0.04	0.67±0.08	0.64±0.02	0.62±0.03
Лигнин/N	19.3±1.1	15.5±2.4	10.0±0.1	12.1±1.7
Фенольные соединения, мг/г	141.3±7.7	158.4±1.0	84.8±11.5	104.4±27.3
Танины, мг/г	121.0±18.9	178.8±9.2	88.5±7.8	120.2±14.5

Примечание. Представлены средние арифметические±стандартная ошибка (n=3) (2011 г. – листья текущего года; 2010 г. – многолетние листья).

Выводы

1. Установлены концентрации фенольных соединений и флавоноидов в различных органах *V. vitis-idaea*, произрастающей в ненарушенных северотаежных лесах и лесах, подверженных промышленному воздушному загрязнению. Определена двухфазная реакция растений на произрастание в условиях загрязнения. Где для первой фазы характерно усиление адаптивных реакций фотосинтезирующих органов в виде повышения концентраций фенольных соединений, а для второй – подавление метаболизма фенолпропаноидов.

2. Основная часть фенольных соединений и флавоноидов сосредоточена в фотосинтезирующих органах *V. vitis-idaea*. В различных условиях произрастания (в частности, техногенной нагрузки) содержание фенольных соединений в листьях брусники сосновых и еловых лесов характеризуется большой вариабельностью полученных результатов, при этом степень максимальной индивидуальной изменчивости меньше ($CV_{\text{инд}}=19.1\%$), чем географической ($CV_{\text{геогр}}=23.5\text{--}69.5\%$). В этой связи рекомендуем в дальнейшем для подобных исследований использовать только листья различных кустарничков, как представляющие наиболее информативные показатели.

3. Химический состав *V. vitis-idaea* значительно изменяется с увеличением возраста листьев, что выражается в уменьшении концентраций целлюлозы, лигнина и стехиометрических показателей (лигнин/целлюлоза, лигнин/N), а также в повышении содержания фенольных соединений и конденсированных танинов.

4. Можно подчеркнуть биогеоэкологическую изменчивость в содержании фенолов и флавоноидов. *V. vitis-idaea* демонстрирует более ярко выраженную реакцию на влияние ели, чем сосны, т.е. концентрации фенолов и флавоноидов в листьях брусники еловых лесов выше, чем сосновых. *V. vitis-idaea* реагирует на изменение биогеоэкоценозов в основном за счет усиления синтеза фенольных соединений, в том числе конденсированных танинов в ельнике кустарничково-зеленомошном (вершина склона) по сравнению с ельником зеленомошно-деренно-кустарничковым (середина склона).

Список литературы

1. Лукина Н.В., Черненькова Т.В. Техногенные сукцессии в лесах Кольского полуострова // Экология. 2008. №5. С. 329–337.
2. Артемкина Н.А. Изменение химического состава различных видов растений в зависимости от их возраста // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы VI Всероссийской конференции с международным участием. Барнаул, 2014. С. 259–261.
3. Охрименко Л.П., Калинин Г.И., Лукша Е.А., Коломиец Н.Э. Исследование фенольных соединений листьев голубики, брусники, толокнянки, черники и зимолоубки, произрастающих в Республике Саха (Якутия) // Химия растительного сырья. 2009. №3. С. 109–115.
4. Hokkanen J., Mattila S., Jaakola L., Pirttilä A.M., Tolonen A. Identification of phenolic compounds from lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.), bilberry (*V. myrtillus* L.) and hybrid bilberry (*V. × intermedium* Ruthe) leaves // Journal of agricultural and food chemistry. 2009. Vol. 57. N20. Pp. 9437–9447. DOI: 10.1021/jf9022542.
5. Saleem A., Harris C.S., Asim M., Cuerrier A., Martineau L., Haddad P.S., Arnason J.T. A RP-HPLC-DAD-APCI/MSD Method for the Characterisation of Medicinal *Ericaceae* used by the Eeyou Istchee Cree First Nations // Phytochemical Analysis. 2010. Vol. 21. N4. Pp. 328–339. DOI: 10.1002/pca.1203.
6. Струсовская О.Г. Оценка ресурсов листьев *Vaccinium vitis-idaea* (*Ericaceae*) на островах Соловецкого архипелага // Растительные ресурсы. 2012. Т. 48. №2. С. 207–211.
7. Hansen A.H., Jonasson S., Michelsen A., Julkunen-Tiitto R. Long-term experimental warming, shading and nutrient addition affect the concentration of phenolic compounds in arctic-alpine deciduous and evergreen dwarf shrubs // Oecologia. 2006. Vol. 147. Pp. 1–11. DOI: 10.1007/s00442-005-0233-y.
8. Кашулин П.А., Калачева Н.В., Артемкина Н.А., Черноус С.А. Фотохимические процессы в растениях на Севере и окружающая среда // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2009. Т. 12. №1. С. 137–142.
9. Mäkipää R. Response patterns of *Vaccinium myrtillus* and *V. vitis-idaea* along nutrient gradients in boreal forest // Journal of Vegetation Science. 1999. Vol. 10. Pp. 17–26. DOI: 10.2307/3237156.
10. Becerra-Moreno A., Redondo-Gil M., Benavides J., Nair V., Cisneros-Zevallos L., Jacobo-Velázquez D.A. Combined effect of water loss and wounding stress on gene activation of metabolic pathways associated with phenolic biosynthesis in carrot // Frontiers in Plant Science. 2015. Vol. 6. Article 837. DOI: 10.3389/fpls.2015.00837.
11. Артемкина Н.А. Содержание фенольных соединений в *V. vitis-idaea* L. сосновых лесов Кольского полуострова // Химия растительного сырья. 2010. №3. С. 153–160.
12. Артемкина Н.А. Содержание фенольных соединений и элементный состав в *Vaccinium vitis-idaea* (*Ericaceae*) в еловых лесах Кольского полуострова в условиях техногенного загрязнения // Растительные ресурсы. 2010. Т. 46, вып. 2. С. 86–98.

13. Юдина В.Ф., Колупаева К.Г., Белоногова Т.В., Муратов Ю.М., Богданова Г.А. Брусника. М.: Лесная промышленность, 1986. 80 с.
14. Stark S., Julkunen-Tiitto R., Holappa E., Mikkola K., Nikula A. Concentrations of Foliar Quercetin in Natural Populations of White Birch (*Betula pubescens*) Increase with Latitude // *Journal of Chemical Ecology*. 2008. Vol. 34. Pp. 1382–1391. DOI: 10.1007/s10886-008-9554-8.
15. Sundqvist M.K., Wardle D.A., Olofsson E., Giesler R., Gundale M.J. Chemical properties of plant litter in response to elevation: subarctic vegetation challenges phenolic allocation theories // *Functional Ecology*. 2012. Vol. 26. N3. Pp. 1090–1099. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2012.02034.x.
16. Vyas P., Curran N.H., Igamberdiev A.U., Debnath S.C. Antioxidant properties of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) leaves within a set of wild clones and cultivars // *Canadian Journal of Plant Science*. 2015. Vol. 95. N4. Pp. 663–669. DOI: 10.1139/CJPS-2014-400.
17. Артемкина Н.А., Орлова М.А., Лукина Н.В. Химический состав хвои *Juniperus sibirica* (CUPRESSACEAE) в экотоне лес-тундра, Хибинские горы // *Экология*. 2016. №4. С. 243–250. DOI: 10.7868/S0367059716040077.
18. Martz F., Jaakola L., Julkunen-Tiitto R., Stark S. Phenolic Composition and Antioxidant Capacity of Bilberry (*Vaccinium myrtillus*) Leaves in Northern Europe Following Foliar Development and Along Environmental Gradients // *Journal of Chemical Ecology*. 2010. Vol. 36. N9. Pp. 1017–1028. DOI: 10.1007/s10886-010-9836-9.
19. Swain J., Hillis W.E. The phenolic constituents of *Prunus domestica*. I. The quantitative analysis of phenolic constituents // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1959. Vol. 10. N1. Pp. 63–68. DOI: 10.1002/jsfa.2740100110.
20. Ossipova S., Ossipov V., Haukioja E., Loponen J., Pihlaja K. Proanthocyanidins of mountain birch leaves: quantification and properties // *Phytochemical Analysis*. 2001. Vol. 12. N2. Pp. 128–133. DOI: 10.1002/pca.568.
21. Rowland A.P., Roberts J.D. Lignin and cellulose fractionation in decomposition studies using acid-detergent fibre methods // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1994. Vol. 25. N3–4. Pp. 269–277. DOI: 10.1080/00103629409369035.
22. Артемкина Н.А., Горбачева Т.Т. Поступление мономерных фенольных форм в почву из растительного опада и подстилки в ельниках зеленомошных // *Лесоведение*. 2006. №3. С. 50–56.
23. Горбачева Т.Т., Лукина Н.В., Артемкина Н.А. Динамика содержания полифенолов при разложении опада и подстилки в ельниках зеленомошных Кольского полуострова // *Лесоведение*. 2006. №3. С. 15–23.
24. Northup R.R., Dahlgren R.A. and McColl J.G. Polyphenols as regulators of plant-litter-soil interactions in northern California's pygmy forest: a positive feedback? // *Biogeochemistry*. 1998. Vol. 42. N1. Pp. 189–220. DOI: 10.1007/978-94-017-2691-7_10.
25. Фуксман И.Л., Пойкалайнен Я., Шредерс С.М., Канючкова Г.К., Чиненова Л.А. Физиолого-биохимическая индикация состояния сосны обыкновенной в связи с воздействием промышленных поллютантов // *Экология*. 1997. №3. С. 213–217.

Поступила в редакцию 29 мая 2018 г.

После переработки 29 октября 2018 г.

Принята к публикации 22 ноября 2018 г.

Для цитирования: Артемкина Н.А. Фенольные соединения *Vaccinium vitis-idaea* и их ответ на воздействие различных факторов окружающей среды // *Химия растительного сырья*. 2019. №2. С. 59–66. DOI: 10.14258/jcrpm.2019024090.

Artemkina N.A. PHENOLIC COMPOUNDS *VACCINIUM VITIS-IDAEA* AND THEIR RESPONSE TO THE INFLUENCE OF VARIOUS ENVIRONMENTAL FACTORS

Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 14a, Apatity, 184209 (Russia), e-mail: artemkina@inep.ksc.ru

Cowberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) is one of the dominants of the herbaceous-shrubby layer of the forest vegetation of the Kola Peninsula. Plays an important role in the involvement of nutrients cycle, as well in the formation of soil fertility due to the ability to synthesize a large number of phenolic compounds, especially condensed tannins. Some regularities of changing the content in phenolic compounds, flavonoids and lignin in various tissues of *Vaccinium vitis-idaea* growing under industrial air pollution conditions have been studied. It was found that the concentration of lignin in mature leaves *Vaccinium vitis-idaea* decrease when approaching the source of pollution in spruce and pine forests. Biogeocenosis and age influence factors on the chemical leaves composition *Vaccinium vitis-idaea* have been revealed. Cowberry accumulates phenolic compounds, including tannins, in the leaves of older age classes. Concentrations of cellulose and lignin are decreased in perennial (mature) leaves. As the result of investigation, the phenolic compounds are proved to play the significant role in *Vaccinium vitis-idaea* adaptation to the influence of abiotic and biotic environmental factors. Phenolic compounds, flavonoids and lignin of *Vaccinium vitis-idaea* leaves behave differently under conditions of air pollution of different intensity.

Keywords: *Vaccinium vitis-idaea*, *Ericaceae*, phenolic compounds, flavonoids, tannins, lignin, Kola peninsula, North taiga forests, biotic and abiotic factors.

References

1. Lukina N.V., Chernen'kova T.V. *Ekologiya*, 2008, no. 5, pp. 329–337. (in Russ.).
2. Artemkina N.A. *Novyye dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: materialy VI Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. [New achievements in chemistry and chemical technology of plant raw materials: materials of the VI All-Russian Conference with international participation]. Barnaul, 2014, pp. 259–261. (in Russ.).
3. Okhrimenko L.P., Kalinkina G.I., Luksha Ye.A., Kolomiyets N.E. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2009, no. 3, pp. 109–115. (in Russ.).
4. Hokkanen J., Mattila S., Jaakola L., Pirttilä A.M., Tolonen A. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2009, vol. 57, no. 20, pp. 9437–9447, DOI: 10.1021/jf9022542.
5. Saleem A., Harris C.S., Asim M., Cuerrier A., Martineau L., Haddad P.S., Arnason J.T. *Phytochemical Analysis*, 2010, vol. 21, no. 4, pp. 328–339, DOI: 10.1002/pca.1203.
6. Strusovskaya O.G. *Rastitel'nyye resursy*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 207–211. (in Russ.).
7. Hansen A.H., Jonasson S., Michelsen A., Julkunen-Tiitto R. *Oecologia*, 2006, vol. 147, pp. 1–11, DOI: 10.1007/s00442-005-0233-y.
8. Kashulin P.A., Kalacheva N.V., Artemkina N.A., Chernous S.A. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 12, no. 1, pp. 137–142. (in Russ.).
9. Mäkipää R. *Journal of Vegetation Science*, 1999, vol. 10, pp. 17–26, DOI: 10.2307/3237156.
10. Becerra-Moreno A., Redondo-Gill M., Benavides J., Nair V., Cisneros-Zevallos L., Jacobo-Velázquez D.A. *Frontiers in Plant Science*, 2015, vol. 6, article 837, DOI: 10.3389/fpls.2015.00837.
11. Artemkina N.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2010, no. 3, pp. 153–160, (in Russ.).
12. Artemkina N.A. *Rastitel'nyye resursy*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 86–98. (in Russ.).
13. Yudina V.F., Kolupayeva K.G., Belonogova T.V., Muratov Yu.M., Bogdanova G.A. *Brusnika*. [Lingonberry]. Moscow, 1986, 80 p. (in Russ.).
14. Stark S., Julkunen-Tiitto R., Holappa E., Mikkola K., Nikula A. *Journal of Chemical Ecology*, 2008, vol. 34, pp. 1382–1391, DOI: 10.1007/s10886-008-9554-8.
15. Sundqvist M.K., Wardle D.A., Olofsson E., Giesler R., Gundale M.J. *Functional Ecology*, 2012, vol. 26, no. 3, pp. 1090–1099, DOI: 10.1111/j.1365-2435.2012.02034.x.
16. Vyas P., Curran N.H., Igamberdiev A.U., Debnath S.C. *Canadian Journal of Plant Science*, 2015, vol. 95, no. 4, pp. 663–669, DOI: 10.1139/CJPS-2014-400.
17. Artemkina N.A., Orlova M.A., Lukina N.V. *Ekologiya*, 2016, no. 4, pp. 243–250, DOI: 10.7868/S0367059716040077 (in Russ.).
18. Martz F., Jaakola L., Julkunen-Tiitto R., Stark S. *Journal of Chemical Ecology*, 2010, vol. 36, no. 9, pp. 1017–1028, DOI: 10.1007/s10886-010-9836-9.
19. Swain J., Hillis W.E. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1959, vol. 10, no. 1, pp. 63–68, DOI: 10.1002/jsfa.2740100110.
20. Ossipova S., Ossipov V., Haukioja E., Loponen J., Pihlaja K. *Phytochemical Analysis*, 2001, vol. 12, no. 2, pp. 128–133, DOI: 10.1002/pca.568.
21. Rowland A.P., Roberts J.D. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, vol. 25, no. 3–4, pp. 269–277, DOI: 10.1080/00103629409369035.
22. Artemkina N.A., Gorbacheva T.T. *Lesovedeniye*, 2006, no. 3, pp. 50–56. (in Russ.).
23. Gorbacheva T.T., Lukina N.V., Artemkina N.A. *Lesovedeniye*, 2006, no. 3, pp. 15–23. (in Russ.).
24. Northup R.R., Dahlgren R.A. and McColl J.G. *Biogeochemistry*, 1998, vol. 42, no. 1, pp. 189–220, DOI: 10.1007/978-94-017-2691-7_10.
25. Fuksman I.L., Poykalaynen YA., Shreders S.M., Kanyuchkova G.K., Chinenova L.A. *Ekologiya*, 1997, no. 3, pp. 213–217. (in Russ.).

Received May 29, 2018

Revised October 29, 2018

Accepted November 22, 2018

For citing: Artemkina N.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2019, no. 2, pp. 59–66. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2019024090.