

УДК 582.29:550.46

ВЛИЯНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ НА БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛИШАЙНИКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ВЕЛЬСКО-УСТЬЯНСКОГО ТЕКТОНИЧЕСКОГО УЗЛА (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© И.А. Паламарчук¹, О.С. Бровко¹, В.В. Беляев¹, К.Г. Боголицын^{1,2}, Т.А. Бойцова¹, Д.В. Жильцов¹,
А.А. Слобода¹, Н.А. Вальчук^{1*}

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н.П. Лаврова РАН, наб. Северной Двины, 23, Архангельск,
163000 (Россия), e-mail: valchuk.natalia@mail.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет, наб. Северной Двины,
23, Архангельск, 163000 (Россия)

Изучено влияние геоэкологических факторов, сформировавшихся в Вельско-Устьинском тектоническом узле Архангельской области, на состояние лишенобиоты. В качестве тест-систем выбраны два наиболее распространенных на изучаемой территории вида кустистых лишайников: эпигейный лишайник *Cladonia stellaris* и эпифитный – *Usnea subfloridana*. Отбор растительного материала производился в течение вегетационного периода (весна-осень) на шести пробных площадках (в центре, на периферии и за пределами тектонического узла – фоновая точка) в сосняках-брусничниках с одинаковым составом древостоя. Установлено, что зольность образцов лишайников *Cladonia stellaris* и *Usnea subfloridana* увеличивается в направлении от фоновой точки и далее от периферии к центру узла: для образцов, произрастающих в центре тектонического узла, зольность в 2–7 раз выше, чем в фоновой точке, и достигает 7%, а на периферии узла – в 1.5–2 раза выше, чем в фоновой точке, что свидетельствует о значительном накоплении металлов в талломах лишайников в зоне тектонических разломов. Аналогичная зависимость для обоих лишайников наблюдается по содержанию аскорбиновой кислоты, активности каталазы и антиоксидантной активности: в центре узла в лишайниках содержится до 190 мкг/г аскорбиновой кислоты, активность каталазы составляет до 17 е.о.н./г·с, а антиоксидантная активность – до 53%, в то время как в фоновой точке эти показатели не превышают 130 мкг/г, 7 е.о.н./г·с и 35% соответственно, что свидетельствует об активации свободно-радикального окисления при стрессе, и можно рассматривать как маркер развития неспецифической устойчивости лишайников при воздействии различных стрессоров.

Ключевые слова: лишайники, *Cladonia*, *Usnea*, тектонический узел, тяжелые металлы, каталазная активность, аскорбиновая кислота, фенольные соединения.

Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА РАН «Изучение межгеосферных процессов в районах тектонических структур и узлов их пересечений в геологических условиях древних платформ на примере Архангельской области» (№ АААА-А18-118012390305-7) и «Физико-химические, генетические и морфологические основы адаптации растительных объектов в условиях изменяющегося климата высоких широт» (№ АААА-А18-118012390231-9) с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» САФУ и ЦКП КТ РФ-Арктика (ФИЦКИА РАН).

Паламарчук Ирина Анатольевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров,
e-mail: irpalamarchuk@mail.ru
Бровко Ольга Степановна – кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров,
e-mail: brovko-olga@gambler.ru

Введение

Исследование процессов межгеосферного взаимодействия является одним из актуальных направлений комплексного изучения окружающей среды. К настоящему времени накоплены значительные данные, указывающие на наличие суще-

Окончание на С. 216

* Автор, с которым следует вести переписку.

ственной зависимости между процессами в биосфере Земли, гелиогеофизическими, метеорологическими и литосферными факторами, в первую очередь, тектоническими нарушениями и узлами их пересечений и конвективным тепловым потоком. Элементы блоковой структуры и литологические особенности пород играют определенную роль в дифференциации природных ландшафтов, контролируя их границы. Согласованность положения элементов современной блоковой структуры земной коры и поверхностных природных явлений подтверждает наличие системной связи между глубинными и поверхностными компонентами географической оболочки [1]. Переходные границы и маргинальные зоны в силу контрастности физико-географических характеристик природной среды являются участками, на которых формируются аazonальные природно-территориальные комплексы. Наиболее активным структурообразующим элементом геологической среды являются тектонические разломы. С увеличением числа пересекающихся разломов степень раздробленности, проницаемости и глубинности тектонического узла (ТУ) возрастает [2], что вызывает приток глубинных минерализованных вод, литосферных газов и способствует концентрации ряда элементов с приближением к разлому. В ТУ формируются комплексные аномалии, выраженные в геофизических, метеорологических, геохимических, геологических и иных параметрах. С учетом их интенсивности многие из этих аномалий могут оказывать значимое воздействие на биологические системы различного иерархического уровня, и, вероятно, для таких территорий характерны особые закономерности накопления, миграции и физико-химической трансформации загрязняющих веществ, специфика пространственного распределения и динамики биоценозов, а также видового состава биоты. Однако механизм воздействия тектонических нарушений на экологическое состояние окружающей среды пока не изучен [3, 4].

Удобной моделью для изучения механизма воздействия тектонической структуры на биоту являются лишайники, вследствие их сильной реакции на изменение параметров окружающей среды при незначительной собственной изменчивости, а также способности быстрого поглощения и накопления различных элементов всей поверхностью таллома. Лишайники являются важнейшим компонентом лесных биогеоценозов. Несмотря на медленный рост, лишайники могут образовывать сплошной напочвенный покров, в особенности кустистые и листоватые виды. Из-за отсутствия у них истинных корней воду и сопутствующие поллютанты лишайники впитывают всей поверхностью слоевища из воздуха и дождевых вод, не обладая механизмами освобождения от них. Поэтому лишайники являются прекрасными индикаторами состояния окружающей среды как естественных биоценозов, так и территорий антропогенного загрязнения.

В основе первичных реакций растительной клетки на негативное воздействие лежит возникновение окислительного стресса [5–10]. К важнейшим ответным реакциям растений на стрессовое воздействие среды относится физиолого-биохимическая перестройка метаболических процессов в тканях растений. Известно, что изменение содержания (активности) компонентов антиоксидантной системы (АОС) наблюдается в ответ на действие неблагоприятных факторов среды, таких как засуха [11], засоление [12], действие низкой температуры [13], повышение концентрации поллютантов в окружающей среде [14–18] и т.д. Однако работ, рассматривающих изменения АОС в онтогенетическом развитии лишайников в условиях дизъюнктивных нарушений геологических структур, практически нет.

Целью данных исследований являлось изучение влияния узлов пересечения тектонических дислокаций на физиолого-биохимические показатели лишайников *Cladonia stellaris* и *Usnea subfloridana*.

Экспериментальная часть

Исследования проводились на шести пробных площадях (ПП), заложенных в 2014–2016 гг. в сосняках брусничных на территории Вельско-Устьянского ТУ в Архангельской области. ПП размером 30×30 м были заложены по две в каждой зоне ТУ (центр, периферия) на расстоянии до 200 м друг от друга: в центре узла (ПП 1 и ПП 2), на периферии (15 км

Беляев Владимир Васильевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы, e-mail: beljaew29@mail.ru

Боголицын Константин Григорьевич – доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии, e-mail: k.bogolitsin@narfu.ru

Бойцова Татьяна Александровна – кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, e-mail: tboitsova@yandex.ru

Жильцов Дмитрий Владимирович – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, e-mail: dnorton.usa@gmail.com

Слобода Анатолий Анатольевич – младший научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, e-mail: sloboda.iepn@yandex.ru

Вальчук Наталья Александровна – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, e-mail: valchuk.natalia@mail.ru

от центра – ПП 3 и ПП 4), а также за пределами ТУ (50 км от центра, фоновая точка – ПП 5 и ПП 6) (рис. 1). ПП подбирались максимально схожие по лесорастительным и таксационным характеристикам. Высота над уровнем моря различается незначительно: ПП 1 и ПП 2 \approx 70 м, ПП 3 и ПП 4 \approx 80 м, ПП 5 и ПП 6 \approx 90 м.

В качестве биоиндикаторов (тест-систем) при изучении механизма влияния ТУ на биоту выбраны два вида лишайников, доминирующих в районе исследования. Из почвенных (эпигейных) лишайников изучали вид *Cladonia stellaris*, из эпифитных – *Usnea subfloridana*. Отбор образцов лишайников производили в течение вегетационного периода (весна, лето, осень) 2017 г. на указанных выше ПП. С каждой ПП отбирали по 3–5 проб обоих видов лишайников. Всего проанализировано 160 образцов лишайников. Определение видов лишайников проводилось по стандартным методикам с использованием определителя [19, 20].

Содержание влаги в талломах лишайников определяли гравиметрическим методом, содержание минеральных веществ – гравиметрически после сухого озоления (500 °С) согласно [21]. Элементный анализ лишайников проводили на элементном анализаторе EuroEA 3000, конфигурация [CNHS] (*EuroVector*, Италия). Содержание ряда тяжелых металлов и биогенных элементов выполняли на последовательном волнодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре XRF-1800 (*Shimadzu*, Япония).

Фенольные соединения (ФС) извлекали из целых талломов лишайников, используя дистиллированную воду и 96% этиловый спирт в качестве экстрагентов. Экстракцию водорастворимой фракции ФС проводили при 30 °С в течение часа при постоянном перемешивании на шейкере (LOIP LS – 110). Экстракцию общих низкомолекулярных ФС спиртом проводили на аппарате Сокслета. Количественное содержание ФС в экстрактах определяли спектральным методом Свейна – Хиллиса с реактивом Фолина – Чокальтеу [22] на спектрофотометре UV-1800 (*Shimadzu*, Япония).

Содержание аскорбиновой кислоты (АК) определяли спектральным методом на спектрофотометре UV-1800 (*Shimadzu*, Япония) с использованием 2,6-дихлорфенолиндофенола (краска Гильманса) согласно [23].

Активность каталазы в водных вытяжках лишайников оценивали кинетическим методом на спектрофотометре UV-1800 (*Shimadzu*, Япония) при длине волны 240 нм по начальной скорости реакции ферментативного окисления пероксида водорода в течение 30 сек в расчете на 1 г сухой массы лишайника [24].

Для оценки антиоксидантной активности (АОА) водных экстрактов целых талломов лишайников использовали фотометрический экспресс-метод, основанный на ингибировании реакции аутоокисления адреналина в щелочной среде [25]. Измерения проводили на спектрофотометре UV-1800 (*Shimadzu*, Япония) в течение 3 мин при длине волны 347 нм.

Все аналитические измерения были выполнены в трех повторностях. Результаты экспериментов представлены в виде средней арифметической величины и ее стандартной ошибки. Для установления статистической взаимосвязи между параметрами использовали *t* – критерий Стьюдента при доверительном уровне $P_i = 95\%$. Средние значения с одинаковыми буквенными обозначениями, представленные в таблице и на рисунках 2, 4 и 5, статистически неразличимы при $p < 0.05$ с учетом сезонных изменений и родовой принадлежности лишайников.

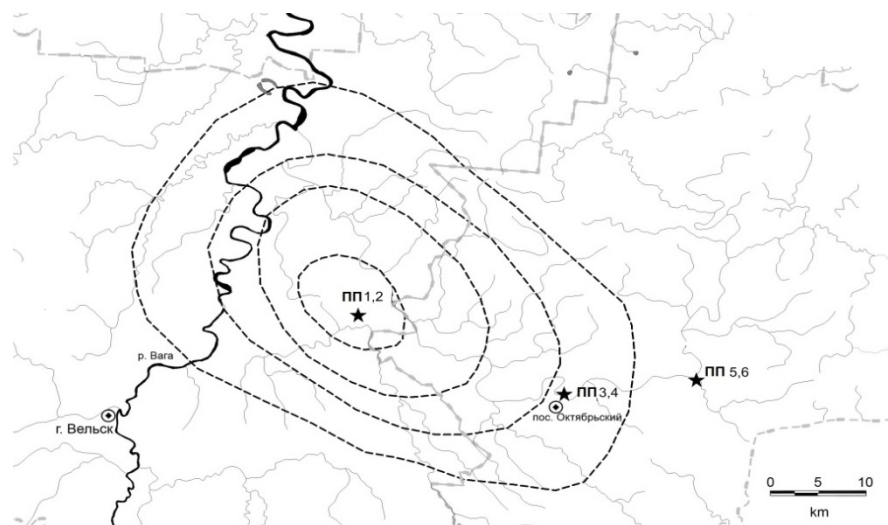


Рис. 1. Места проведения исследований (ПП) в Вельском и Устьянском районах Архангельской области (Вельско-Устьянский ТУ): ---- изолинии плотности ТУ

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что определяемые показатели для лишайников, произрастающих в пределах одной зоны ТУ, статистически не различаются и могут быть усреднены, однако при переходе от одной зоны к другой наблюдаются существенные отличия. Так зольность образцов лишайников *Cladonia stellaris*, произрастающих в центре ТУ (ПП 1, 2), в 2 раза выше, чем в фоновой точке (ПП 5, 6), а на периферии узла (ПП 3, 4) – в 1.5 раза выше. Для лишайников *Usnea subfloridana*, произрастающих в центре ТУ, зольность в 7 раза выше, чем в фоновой точке, а на периферии узла – в 2 раза выше, что свидетельствует о значительном накоплении металлов в талломах лишайников в зоне тектонических разломов (табл.). Уменьшение зольности лишайников от центра к периферии узла, вероятно, обусловлено литохимическими особенностями осадочных пород, слагающих верхнюю часть разреза ТУ, и аэрогенным переносом веществ с них в составе пылевых частиц на поверхность талломов.

В подтверждении данного предположения проанализирован элементный состав лишайников *Usnea subfloridana* и *Cladonia stellaris*. В локальных точках ТУ (периферия – центр) в талломах лишайников в наибольшем количестве представлены типичные литогенные макроэлементы (%): К (0.8–1.1), Са (1.4–4.5), Mg (0.4–0.8), Na (0.1–0.2), S (0.6), P (0.3–0.4), Fe (0.1–0.3), Al (0.3–1.0) и Si (1.0–4.5) соответственно. Такие микроэлементы, как Cu (0.5) и Mn (0.1) могут выполнять каталитические функции и участвуют в ферментативных реакциях [26]. В фоновой точке количественное содержание литогенных макроэлементов (%) значительно снижено: К (0.4), Са (0.8), Mg (0.2), Na (0.05), S (0.3), P (0.2), Fe (0.05), Al (0.1) и Si (0.6).

Лишайники отличаются незначительным накоплением минеральных веществ. Согласно литературным данным [26], средняя зольность лишайников колеблется в пределах от 0.7 до 2–4% и различается в зависимости от их видовой принадлежности, возраста, субстрата произрастания и условий обитания. Следует отметить, что зольность эпифитного лишайника *Usnea subfloridana* значительно выше, чем эпигейного *Cladonia stellaris*, что связано не только с видовым различием лишайников, но и их приуроченностью к субстрату. Субстратом для лишайников *Usnea subfloridana* служит кора дерева – форофита (Ель обыкновенная – *Picea abies*). Вода, стекающая по стволам деревьев во время дождя, может содержать больше химических элементов, чем дождевая вода непосредственно из атмосферы. Она включает минеральные растворенные и органические вещества с поверхности листьев или хвои (их выделения) и коры дерева – форофита [22]. Аномально высокая зольность (4.7–7.0%) для образцов лишайников *Usnea subfloridana*, произрастающих в центре тектонического узла (ПП 1, 2), свидетельствует об особых стрессовых условиях, сформировавшихся в центре узла.

Для установления влияния на метаболизм лишайников узлов пересечения тектонических дислокаций проведен сравнительный анализ ферментативной (каталазной) активности и содержания неферментативных водорастворимых низкомолекулярных антиоксидантов (АК и водорастворимой фракции ФС) для лишайников, произрастающих в разных точках разлома. Поскольку содержание тяжелых металлов в талломах лишайников в направлении от фоновой точки к центру ТУ увеличивается, происходит увеличение генерации активных форм кислорода в клетках, в том числе в результате окислительно-восстановительных реакций, в ответ на эти процессы происходит активизация фермента каталазы и увеличение содержания АК и ФС.

Содержание минеральных веществ (зольность) и ФС в лишайниках *Cladonia stellaris* и *Usnea subfloridana*

Пробные площади	Вегетационный период	Зольность, %		Содержание общих ФС, мг/г	
		<i>Cladonia stellaris</i>	<i>Usnea subfloridana</i>	<i>Cladonia stellaris</i>	<i>Usnea subfloridana</i>
ПП 1, 2	весна	1.22±0.03	4.74±0.27	1.03±0.08	1.30±0.09 ^d
	лето	1.31±0.01	6.99±0.45	0.81±0.06	1.94±0.14
	осень	1.12±0.01	6.82±0.22	0.67±0.05 ^c	1.15±0.08
ПП 3, 4	весна	0.89±0.02	2.32±0.11	0.71±0.05 ^a	1.02±0.07 ^{d,e}
	лето	1.09±0.01	1.03±0.05 ^l	0.57±0.04 ^b	1.37±0.10 ⁱ
	осень	0.75±0.02	1.73±0.04	0.48±0.03 ^b	0.71±0.05
ПП 5, 6	весна	0.58±0.01	1.09±0.10	0.60±0.04 ^a	0.79±0.06 ^c
	лето	0.56±0.02	0.97±0.05 ^l	0.52±0.03 ^b	1.19±0.08 ⁱ
	осень	0.54±0.01	0.88±0.03	0.53±0.04 ^{b,c}	0.44±0.03

Известно, что важнейшим ферментом первой линии антиоксидантной защиты является супероксид-дисмутаза (СОД), которая катализирует реакцию дисмутации супероксидного анион-радикала. В результате работы СОД образуется пероксид водорода. Основным внутриклеточным ферментом, который разлагает токсичный для клеток пероксид водорода на воду и молекулярный кислород, является каталаза, работающая в составе второй линии защиты. Этот фермент обладает абсолютной субстратной специфичностью и способен взаимодействовать только с одним строго определенным субстратом – пероксидом водорода [24]. Наши исследования показали, что каталазная активность лишайников увеличивается от фоновой точки к центру узла как для лишайника *Usnea subfloridana*, так и для *Cladonia stellaris* (рис. 2), что свидетельствует об активации свободно-радикального окисления в условиях стресса.

Известно, что АК, благодаря способности легко отдавать электроны, является ведущим неферментативным антиоксидантом с буферным механизмом действия [16, 18]. В центре и на периферии ТУ количественное содержание АК в лишайниках значительно выше (рис. 3), чем в фоновой точке.

Выявленная закономерность свидетельствует об активации свободно-радикального окисления при стрессе, что можно рассматривать как маркер развития неспецифической устойчивости лишайников при воздействии различных стрессоров [18].

ФС являются одними из наиболее распространенных вторичных метаболитов, образование которых свойственно практически всем растительным клеткам. Они принимают участие в самых разнообразных физиологических процессах, таких как фотосинтез, дыхание, формирование клеточных стенок, устойчивости растений к действию тяжелых металлов [5]. В литературе описано более 1000 характерных для лишайников ФС, так называемых «лишайниковых веществ» [28], из которых наиболее часто встречающейся в талломах лишайников и хорошо изученной является усниновая кислота [29, 30].

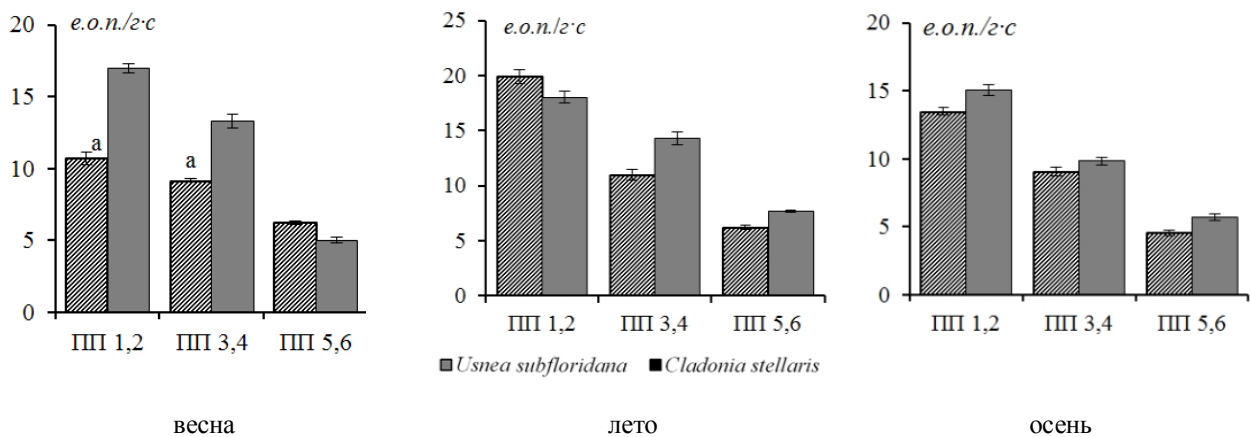


Рис. 2. Каталазная активность лишайников *Usnea subfloridana* и *Cladonia stellaris* в различных точках разлома

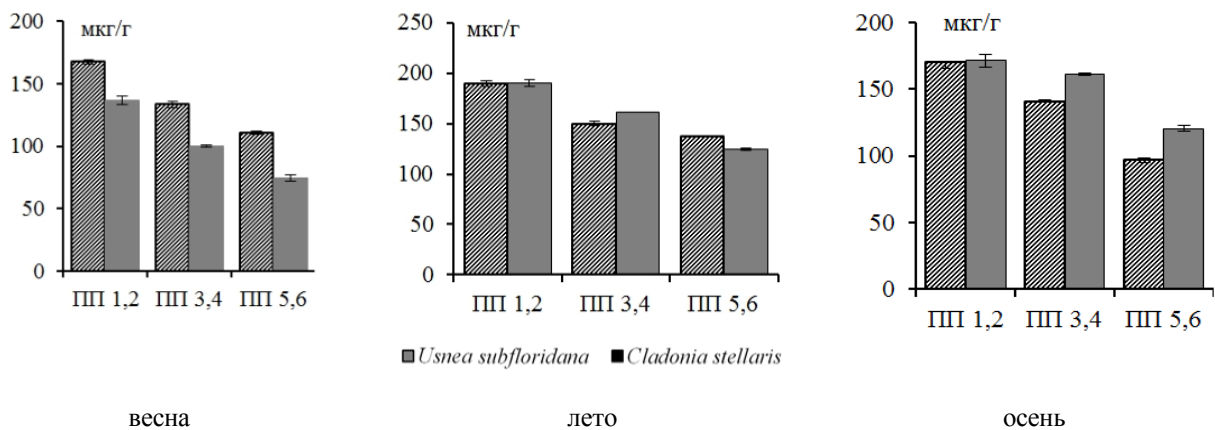


Рис. 3. Содержание АК в лишайниках *Usnea subfloridana* и *Cladonia stellaris* в различных точках разлома

Установлено, что содержание общих ФС в лишайниках увеличивается от фоновой точки к центру ТУ (табл.), при этом относительный вклад водорастворимой фракции ФС в составе общих ФС снижается (рис. 4), что вероятно связано с усилением окислительных и снижением восстановительных процессов у лишайников, произрастающих в локальных зонах дизъюнктивных нарушений геологических структур и является показателем их адаптивной перестройки.

Следует отметить, что на фоне близкой общей картины относительного содержания водорастворимой фракции ФС в талломах лишайников, показатели конкретного вегетационного периода количественно отличаются (рис. 4). В условиях выраженного дефицита влаги (в летний период влажность лишайников снижена на 2%) доля водорастворимых ФС в лишайниках снижена по сравнению весенним и осенним периодами.

Также показано, что для водных экстрактов лишайников, содержащих в своем составе АК и ФС, АОА снижается от центра узла к фоновой точке, как для *Usnea subfloridana*, так и для *Cladonia stellaris* (рис. 5).

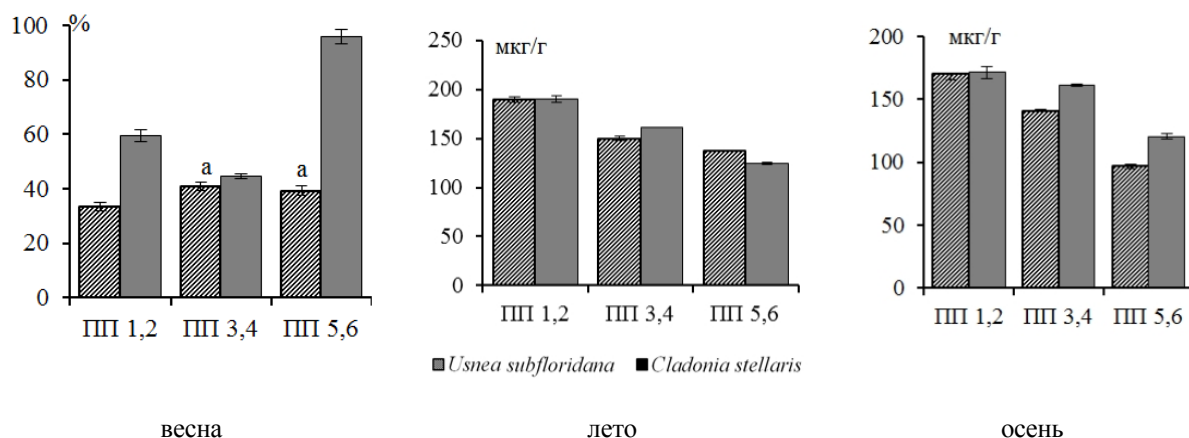


Рис. 4. Доля водорастворимой фракции в составе ФС в лишайниках *Usnea subfloridana* и *Cladonia stellaris*, произрастающих в различных точках разлома, %

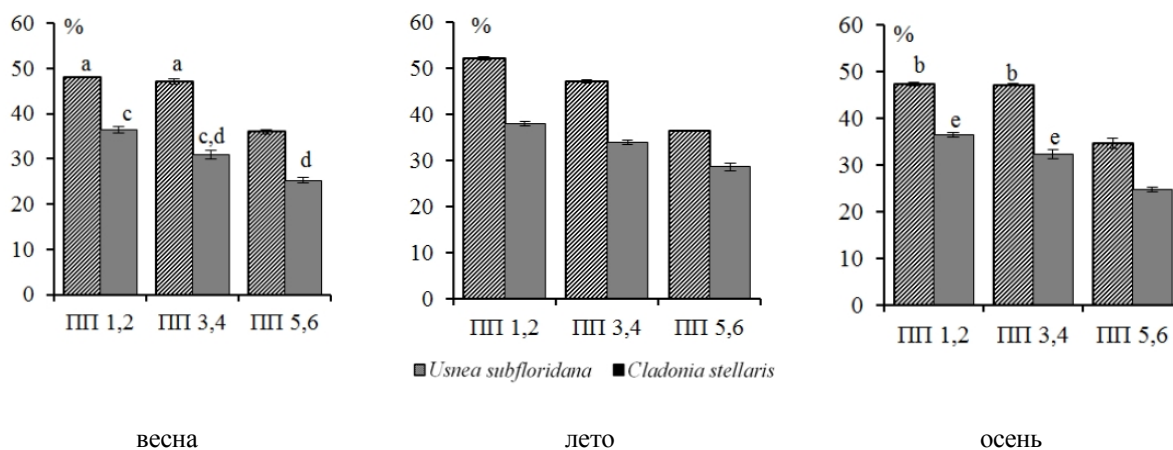


Рис. 5. АОА водных экстрактов лишайников *Usnea subfloridana* и *Cladonia stellaris* в различных точках разлома

Синергизм кооперативного антиоксидантного действия компонентов матрицы лишайника выражается в изменении активности как энзиматических (каталаза), так и относительного содержания неэнзиматических антиоксидантов (фенольные соединения, витамины и т.д.), что позволяет использовать ее как тест, диагностирующий воздействие стрессоров на состояние лишайниковых сообществ.

Выводы

Таким образом, результаты исследований показали, что узлы пересечения тектонических дислокаций существенно влияют на свойства таких компонентов фитоценозов, как лишайники. Увеличение зольности лишайников в направлении от периферии к центру узла может быть обусловлено литохимическими особенностями осадочных пород, слагающих верхнюю часть разреза тектонического узла и аэрогенным

переносом веществ с них в составе пылевых частиц на поверхность талломов лишайников. Ионы тяжелых металлов, аккумулируясь в различных органах растений, воздействуют на их физиолого-биохимические показатели. При этом увеличивается количественное содержание аскорбиновой кислоты, возрастает активность фермента каталазы. В локальных точках (периферия и центр) тектонического узла начинают преобладать окислительные процессы, что приводит к изменению доли водорастворимой фракции в составе общих низкомолекулярных фенольных соединений.

Список литературы

1. Ранцман Е.Я., Гласко М.П. Морфоструктурные узлы – места экстремальных природных явлений. М., 2004. 224 с.
2. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Разломно-блоковая тектоника и ее роль в эволюции литосферы // Литосфера и гидросфера Европейского Севера России. Геоэкологические проблемы. Екатеринбург, 2001. С. 68–113.
3. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беляев В.В., Бурлаков П.С. Влияние тектонических нарушений (дегазация, наведенные токи, вариации геомагнитного поля) севера Русской плиты на окружающую среду (на примере Архангельской области) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2009. №2(14). С. 77–89.
4. Беляев В.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Влияние узлов тектонических дислокаций на характер выпадения осадков в лесных экосистемах // Вестник Поморского государственного университета. Серия «Естественные и точные науки». 2009. №2. С. 45–50.
5. Бровко О.С., Паламарчук И.А., Слобода А.А., Бойцова Т.А., Гагушкина А.А., Вальчук Н.А. Влияние стрессовых воздействий на компонентный состав лишайника рода *Cladonia* Евроарктического региона // Успехи современного естествознания. 2016. №8. С. 20–24.
6. Магомедова М.А. Лишайники как компонент северных экосистем и объект мониторинга // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. Т. 16. С. 105–121.
7. Марковская Е.Ф., Сергиенко Л.А., Шкляревич Г.А., Сониная А.В. и др. Природный комплекс побережий Белого моря: учеб. пособие. Петрозаводск, 2010. 135 с.
8. Beschel R.E. A project to use Lichens as indicators of climate and time // Arctic Alpine Res. 1957. Vol. 10. N1. Pp. 200–215.
9. Rydzak J. Lichens as indicators of the ecological conditions of the habitat // Ann. Univ. M. Curie-Sklodowska. 1968. N23. Pp. 131–164.
10. Красногорская Н.Н., Журавлёва С.Е., Цвиленва Н.Ю., Миннулина Г.Р., Даугова А.Т. Биомониторинг атмосферного воздуха – инструмент охраны окружающей среды урбанизированных территорий // Фундаментальные исследования. 2004. №5. С. 35–37.
11. Zhang J., Kirkham M.B. Drought-Stress Induced Changes in Activities of Superoxide Dismutase, Catalase, and Peroxidase in Wheat Species // Plant Cell Physiol. 1994. Vol. 35. Pp. 785–791. DOI: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a078658.
12. Meloni D.A., Oliva M.A., Martinez C.A., Cambraia J. Photosynthesis and Activity of Superoxide Dismutase, Peroxidase and Glutathione Reductase in Cotton under Salt Stress // Environ. Exp. Bot. 2003. Vol. 49. Pp. 69–76. DOI: 10.1016/S0098-8472(02)00058-8.
13. Aroca R., Irigoyen J.J., Sanchez-Diaz M. Photosynthetic characteristics and protective mechanisms against oxidative stress during chilling and subsequent recovery in two maize varieties differing in chilling sensitivity // Plant Sci. 2001. Vol. 161. Pp. 719–726. DOI: 10.1016/S0168-9452(01)00460-5.
14. Prasad K.V.S.K., Saradhi P.P., Sharmila P. Concerted Action of Antioxidant Enzymes and Curtailed Growth under Zinc Toxicity in Brassica juncea // Environ. Exp. Bot. 1999. Vol. 42. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/S0098-8472(99)00013-1.
15. Полеская О.Г., Каширина Е.И., Алехина Н.Д. Изменение активности антиоксидантных ферментов в листьях и корнях пшеницы в зависимости от формы и дозы азота в среде // Физиология растений. 2004. Т. 51. С. 686–691.
16. Чиркова Т.В. Физиологические основы устойчивости растений. СПб., 2002. 244 с.
17. Alscher R.G., Donahue J.L., Cramer C.L. Reactive Oxygen Species and Antioxidant: Relationships in Green Cells // Physiol. Plant. 1997. Vol. 100. Pp. 224–233.
18. Chapin F. S. Integrated responses of plants to stress. A centralized system of physiological responses // BioScience. 1991. Vol. 41. Pp. 29–37. DOI: 10.2307/1311538.
19. Голубкова Н.С. Определитель лишайников СССР. Вып. 5: Кладониевые – Акароспоровые. Л., 1978. 305 с.
20. Копачевская Е.Г. Определитель лишайников СССР. Вып. 1. Пертузариевые, Леканоровые, Пармелиевые. Л., 1971. 412 с.
21. ГОСТ 24027.2-80 Сырье лекарственное растительное. Методы определения влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирного масла. М., 1999. 10 с.
22. Swain T., Hillis W.E. The phenolic constituents of *prunus domestica* 1. The Quantitative Analysis of Phenolic Constituents // J. Sci. Food Agric. 1959. Vol. 10. N1. Pp. 63–68. DOI 10.1002/jsfa.2740100110
23. Воскресенская О.Л., Алябышева Е.А., Половникова М.Г. Большой практикум по биоэкологии Ч. 1: учеб. пособие. Йошкар-Ола, 2006. 107 с.
24. Бойцова Т.А., Паламарчук И.А., Бровко О.С., Вальчук Н.А., Слобода А.А., Жильцов Д.В. К вопросу о каталазной активности лишайников // Успехи современного естествознания. 2017. №11. С. 7–11.

25. Рябинина Т.В., Зотова Е.Е., Ветрова Е.Н., Пономарева Н.И, Илюшина Т.И. Новый подход в оценке антиоксидантной активности растительного сырья при исследовании процесса аутоокисления адреналина // Химия растительного сырья. 2011. №3. С. 117–121.
26. Битюцкий Н.П. Микроэлементы высших растений. СПб., 2011. 368 с.
27. Шевченко В.П. Стародымова Д.П., Кутенков С.А. Содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Карелии как индикатор атмосферного переноса загрязняющих веществ // Современные проблемы науки и образования. 2011. №3. С. 35–43.
28. Molnar K., Farkas E. Current results on biological activities of lichen secondary metabolites: a review // Z. Naturforsch. 2010. Vol. 65. Pp. 157–173. DOI: 10.1515/znc-2010-3-401.
29. Соколов Д.Н., Лузина О.А., Салахутдинов Н.Ф. Усниновая кислота: получение, строение, свойства и химические превращения // Успехи химии. 2012. Т. 81, №8. С. 747–768.
30. Brovko O.S., Ivakhnov A.D., Palamarchuk I.A., Boitsova T.A. Supercritical Fluid Extraction of Usnic Acid from Lichen of Cladonia Genus // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2017. Vol. 11. N8. Pp. 1306–1311. DOI: 10.1134/S1990793117080024.

Поступила в редакцию 6 марта 2018 г.

После переработки 20 апреля 2018 г.

Принята к публикации 22 апреля 2018 г.

Для цитирования: Паламарчук И.А., Бровко О.С., Беляев В.В., Боголицын К.Г., Бойцова Т.А., Жильцов Д.В., Слобода А.А., Вальчук Н.А. Влияние геоэкологических факторов среды на биохимические показатели лишайников на территории Вельско-Устьянского тектонического узла (Архангельская область) // Химия растительного сырья. 2018. №4. С. 215–224. DOI: 10.14258/jcrpm.2018043803.

Palamarchuk I.A.¹, Brovko O.S.¹, Belyaev V.V.¹, Bogolitsyn K.G.^{1,2}, Boitsova T.A.¹, Zhiltsov D.V.¹, Sloboda A.A.¹, Valchuk N.A.^{1*} INFLUENCE OF THE ENVIRONMENTAL GEOECOLOGICAL FACTORS ON THE BIOCHEMICAL INDICATORS OF LICHENS IN THE TERRITORY OF THE VELSK-USTYANSK TECTONIC NODE (ARKHANGELSK REGION)

¹N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, nab. Severnaya Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000 (Russia), e-mail: valchuk.natalia@mail.ru

²Northern (Arctic) Federal University, nab. Severnaya Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000 (Russia)

The influence of geoecological factors formed in Velsk-Ustyansk tectonic node of the Arkhangelsk region on the state of lichenobiotics was studied. Two of the most common species of bushy lichens are selected as the test systems. The objects of research are two species of bushy lichens, which were used as a test system. From the soil lichens, the species *Cladonia stellaris* was studied. From the epiphytic lichens, the species *Usnea subfloridana* was studied. The material was collected in the vegetation period (spring-autumn) from the three test plots (in the center, at the periphery and outside the tectonic node - the background point) in the pine-bilberry forest stands with the same composition. It was established that the ash content of lichen samples *Cladonia stellaris* and *Usnea subfloridana* increases in the direction from the background point and further from the periphery to the center of the node. The ash content for samples growing in the center of the tectonic node is in 2-7 times higher than in the background point and reaches of 7 %. The ash content for samples growing in the periphery of the site is in 1.5–2 times higher than in the background point. This dependence indicates a significant accumulation of the metals in the lichen thallomes in the zone of tectonic faults. The similar dependence for both lichens is observed in the content of ascorbic acid, catalase activity and antioxidant activity. It was shown that in the center of the node the lichen contains up to 190 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ of ascorbic acid, the catalase activity is up to 17 $\text{u.o.d. g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, and antioxidant activity is up to 53%, while at the background point these indices do not exceed 130 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 7 $\text{u.o.d. g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ and 35%, respectively. Thus, it can be concluded that under stress condition there is a free-radical oxidation that can be regarded as a marker of development of a non-specific stable in lichens under the influence of various stressors.

Keywords: lichens, *Cladonia*, *Usnea*, tectonic node, heavy metals, catalase activity, ascorbic acid, phenolic compounds.

References

1. Rantsman Ye.YA., Glasko M.P. *Morfostrukturnyye uzly – mesta ekstremal'nykh prirodnykh yavleniy*. [Morphostructural nodes are places of extreme natural phenomena]. Moscow, 2004, 224 p. (in Russ.).
2. Kutinov Yu.G., Chistova Z.B. *Litosfera i gidrosfera Yevropeyskogo Severa Rossii. Geoekologicheskiye problemy*. [Lithosphere and hydrosphere of the European North of Russia. Geoecological problems]. Yekaterinburg, 2001, pp. 68–113. (in Russ.).
3. Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Belyayev V.V., Burlakov P.S. *Vestnik KRAUNTS. Seriya: Nauki o Zemle*, 2009, no. 2(14), pp. 77–89. (in Russ.).
4. Belyayev V.V., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B. *Vestnik Pomorskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. «Yestestvennyye i tochnyye nauki»*, 2009, no. 2, pp. 45–50. (in Russ.).
5. Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Sloboda A.A., Boytsova T.A., Gagushkina A.A., Valchuk N.A. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2016, no. 8, pp. 20–24. (in Russ.).
6. Magomedova M.A. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. [Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems]. St. Petersburg, 1996, vol. 16, pp. 105–121. (in Russ.).
7. Markovskaya Ye.F., Sergiyenko L.A., Shklyarevich G.A., Sonina A.V. i dr. *Prirodnyy kompleks poberezhny Belogo morya: ucheb. posobiye*. [The natural complex of the coasts of the White Sea: studies. allowance]. Petrozavodsk, 2010, 135 p. (in Russ.).
8. Beschel R.E. *Arctic Alpine Res.*, 1957, vol. 10, no. 1, pp. 200–215.
9. Rydzak J. *Ann. Univ. M. Curie-Sklodowska*, 1968, no. 23, pp. 131–164.
10. Krasnogorskaya N.N., Zhuravlova S.Ye., Tsvilenva N.YU., Minnullina G.R., Dautova A.T. *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2004, no. 5, pp. 35–37. (in Russ.).
11. Zhang J., Kirkham M.B. *Plant Cell Physiol.*, 1994, vol. 35, pp. 785–791. DOI: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a078658
12. Meloni D.A., Oliva M.A., Martinez C.A., Cambraia J. *Environ. Exp. Bot.*, 2003, vol. 49, pp. 69–76. DOI: 10.1016/S0098-8472(02)00058-8
13. Aroca R., Irigoyen J.J., Sanchez-Diaz M. *Plant Sci.*, 2001, vol. 161, pp. 719–726. DOI: 10.1016/S0168-9452(01)00460-5
14. Prasad K.V.S.K., Saradhi P.P., Sharmila P. *Environ. Exp. Bot.*, 1999, vol. 42, pp. 1–10. DOI: 10.1016/S0098-8472(99)00013-1
15. Poleskaya O.G., Kashirina Ye.I., Alekhina N.D. *Fiziologiya rasteniy*, 2004, vol. 51, pp. 686–691. (in Russ.).
16. Chirkova T.V. *Fiziologicheskiye osnovy ustoychivosti rasteniy*. [Physiological basis of plant resistance]. St. Petersburg, 2002, 244 p. (in Russ.).
17. Alscher R.G., Donahue J.L., Cramer C.L. *Physiol. Plant.*, 1997, vol. 100, pp. 224–233.
18. Chapin F.S. *BioScience*, 1991, vol. 41, pp. 29–37. DOI: 10.2307/1311538
19. Golubkova N.S. *Opredelitel' lishaynikov SSSR. Vyp. 5: Kladoniyevyye – Akarosporovyye*. [Determinant of lichens of the USSR. Issue 5: Kladonievyye – Akarosporovyye]. Leningrad, 1978, 305 p. (in Russ.).
20. Kopachevskaya Ye.G. *Opredelitel' lishaynikov SSSR. Vyp. 1. Pertuzariyevyye, Lekanorovyye, Parmeliyevyye*. [Determinant of lichens of the USSR. Issue 1. Pertussary, Lekanorovyye, Parmeliyevyye]. Leningrad, 1971, 412 p. (in Russ.).

* Corresponding author.

21. GOST 24027.2-80 *Syr'ye lekarstvennoye rastitel'noye. Metody opredeleniya vlazhnosti, sodержaniya zoly, ekstraktivnykh i dubil'nykh veshchestv, efir'nogo masla*. [GOST 24027.2-80 Medicinal plant raw materials. Methods for determining humidity, ash content, extractive and tannins, essential oil]. Moscow, 1999, 10 p. (in Russ.).
22. Swain T., Hillis W.E. *J. Sci. Food Agric.*, 1959, vol. 10, no. 1, pp. 63-68. DOI 10.1002/jsfa.2740100110
23. Voskresenskaya O.L., Alyabysheva Ye.A., Polovnikova M.G. *Bol'shoy praktikum po bioekologii Ch.1: ucheb. posobiye*. [Great Workshop on Bioecology Part 1: studies. allowance]. Yoshkar-Ola, 2006, 107 p. (in Russ.).
24. Boytsova T.A., Palamarchuk I.A., Brovko O.S., Val'chuk N.A., Sloboda A.A., Zhil'tsov D.V. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2017, no. 11, pp. 7–11. (in Russ.).
25. Ryabinina T.V., Zotova Ye.Ye., Vetrova Ye.N., Ponomareva N.I., Ilyushina T.I. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2011, no. 3, pp. 117–121. (in Russ.).
26. Bityutskiy N.P. *Mikroelementy vysshikh rasteniy*. [Trace elements of higher plants]. St. Petersburg, 2011, 368 p. (in Russ.).
27. Shevchenko V.P., Starodymova D.P., Kutenkov S.A. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2011, no. 3, pp. 35–43. (in Russ.).
28. Molnar K., Farkas E. *Z. Naturforsch.*, 2010, vol. 65, pp. 157–173. DOI: 10.1515/znc-2010-3-401
29. Sokolov D.N., Luzina O.A., Salakhutdinov N.F. *Uspekhi khimii*, 2012, vol. 81, no. 8, pp. 747–768. (in Russ.).
30. Brovko O.S., Ivakhnov A.D., Palamarchuk I.A., Boitsova T.A. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2017, vol. 11, no. 8, pp. 1306–1311. DOI: 10.1134/S1990793117080024

Received March 6, 2018

Revised April 20, 2018

Accepted April 22, 2018

For citing: Palamarchuk I.A., Brovko O.S., Belyaev V.V., Bogolitsyn K.G., Boitsova T.A., Zhiltsov D.V., Sloboda A.A., Valchuk N.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2018, no. 4, pp. 215–224. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2018043803