

УДК 581.5: 582.4

ХИМИЧЕСКАЯ ЛИХЕНОИНДИКАЦИЯ КАК ОСНОВА БИОМОНИТОРИНГА ВОЗДУХА В АНТРОПОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Анищенко Л.Н., Сквородникова Н.А., Борздыко Е.В.

ФГОУ ВПО «Брянский государственный университет имени акад. И.Г. Петровского»,
Брянск, e-mail: eco_egf@mail.ru

Исследования накопительной способности эпифитных лишайников по отношению к сере общей и тяжелым металлам в местообитаниях антропогенно преобразованных экосистем выполнялись в рамках международной программы использования растительных биоиндикаторов для диагностики состояния сред обитания. На основе результатов анализа 402 образцов биомассы эпифитных лишайников и коры деревьев (форофитов) рассчитывались коэффициенты накопления (Кн), позволяющие выделить виды-накопители (индикаторы, чувствительные). По содержанию серы общей рекомендовано использовать тест-объекты – *Xanthoria parietina* и *Parmelia sulcata*. Оценка информативности лишайнобиоты как показателя антропогенно измененных территорий применительно к объектам уничтожения ХО и урбэко системам высокая. Исследования состава лишайников по содержанию серы, ТМ и синтетических лишайноиндикационных индексов в подтверждение к химическим исследованиям компонентов окружающей природной среды позволят вести комплексный экомониторинг. Используя данные концентрации серы общей в слоевищах эпифитных лишайников фоновых видов, можно проводить зонирование территорий антропогенно преобразованных экосистем (зона с малым, средним и высоким содержанием серы).

Ключевые слова: сера общая, тяжелые металлы, коэффициент накопления, эпифитные лишайники, Брянская область

THE PECULIARITIES OF ACCUMULATION OF HEAVY METALS BY PLANTS AND LICHENS IN THE CONDITIONS OF COMBINED ANTHROPOGENIC LOAD

Anischenko L.N., Skovorodnikova N.A., Borzdyko E.V.

Bryansk State Academician I.G. Petrovsky University, Bryansk, e-mail: eco_egf@mail.ru

Research assimilative capacity of epiphytic lichens to otosheniy to the total sulfur and heavy metals in the habitats of anthropogenically modified ecosystems was carried out in the framework of the international programme for the use of plant bioindicators for diagnosing the condition of habitats. Based on the results of the analysis of 402 samples the biomass of epiphytic lichens and tree bark, were calculated accumulation factors (Kn), allowing you to select the types of drives (indicators, sensitive). The content of total sulphur is recommended to use the test-objects – *Xanthoria parietina* and *Parmelia sulcata* also. To evaluate the information content of the lichen biota, as an indicator of anthropogenically modified areas relating to CW destruction and urban ecosystems, high. Studies of the composition of lichens in sulfur content, TM and synthetic mapped indexes in the confirmation of chemical research components of the natural environment will lead to a comprehensive ecological monitoring. Using the data of the concentration of total sulphur in the epiphytic lichen thalli background species, it is possible to carry out the zoning of anthropogenically modified ecosystems (area with low, medium and high sulfur content).

Keywords: total sulfur, heavy metals, the accumulation rate, epiphytic lichens, Bryansk region

Виды лишайнобиоты активно заселяют самые разнообразные субстраты, как миксотрофные (автогетеротрофные) компоненты ценозов участвуют в биогеохимических циклах, активно синтезируя, накапливая и трансформируя вещества, в том числе и поллютанты [2, 3, 9]. Сведения о химическом составе лишайников различных экологических (субстратных) групп могут служить основой для выяснения биогеохимической роли этих видов и биомониторинговых работ. С биоиндикационных позиций фактические концентрации загрязнителей в среде малоинформативны, поэтому необходимо выяснять закономерности связи концентрации поллютантов в средах и лишайноиндикационными параметрами [3]. Для урбанизированных районов и территорий

техногенных объектов особенно актуальны исследования «показательных» эпифитных лишайногруппировок, их химического состава по содержанию веществ из перечня, сформированного для контроля воздуха (например, серы, фосфора, элементов группы тяжелых металлов). Лесные массивы и насаждения различного назначения представляют собой фильтр-барьер на пути распространяющихся загрязнителей, эпифитная лишайнобиота – естественные аккумуляторы различных соединений и биотесты. Основная цель работы – дать сравнительную характеристику валовой концентрации основных поллютантов в эпифитной лишайнобиоте антропогенно преобразованных ландшафтов Нечерноземья РФ для организации биомониторинга воздуха.

Материалы и методы исследований

Полевые исследования проводились на территории крупного города Нечерноземья РФ – Брянска, в зоне защитных мероприятий химически опасного техногенного объекта по утилизации химического оружия (ОУХО) в Почепском районе Брянской области в условиях промышленного, транспортно-го и рекреационного воздействия на биосистемы. Состояние воздушного бассейна при эксплуатации ОУХО в Почепском районе Брянской области и крупной урбоземосистемы – один из основных контролируемых параметров при оценке факторов воздействия на окружающую среду. В условиях крупных городов накопление лишайнотестами ТМ и серы напрямую связано с общим загрязнением воздуха в связи с приоритетностью этих поллютантов по данным государственной статистической отчетности. Практически 80% территории санитарно-защитной зоны ОУХО и большие площади за ее пределами составляют лесные массивы. Определение содержания загрязняющих веществ, выделяемых в атмосферный воздух в процессе эксплуатации объекта, в условиях ветровой тени затрудняет получение достоверных данных. Изучение синузид лишайников и их накопительной способности загрязнителей в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) позволит комплексно отслеживать экологическую обстановку и дополнить инструментальный контроль состава промышленных выбросов определением качества атмосферного воздуха.

Определение содержания в слоевищах лишайников маркера отравляющих веществ – серы, контроль их поглотительной и накопительной способности по отношению к ТМ позволят в полной мере проводить анализ техногенного воздействия на территорию СЗЗ. Уничтожение авиационных химических боеприпасов, снаряженных заринном, зоманом, Ви-икс, хранящихся в арсенале воинской части, началось на ОУХО в 2010 г., сжигание реакционных масс проводится со второго квартала 2011 г.

Для анализа химического состава собирались фоновые (наиболее распространённые) виды эпифитных лишайников, кора деревьев-форофитов. Содержание тяжелых металлов (ТМ) и серы определялось в биомассе *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Physcia caesia* (Hoffm.) Fűrnr., *Evernia prunastri* (L.) Ach., *Parmeliopsis ambigua* (Wulf.) Nyl., *Xanthoria parietina* (L.) Belt., *Parmelia sulcata* Tayl. Образцы коры отбирались в момент сбора лишайников в соответствии с методическими документами [7]. В районе ОУХО пробы изымались на реперных точках в пределах СЗЗ методом маршрутного хода. Число изученных стволов foroфитов в каждом пункте составляло от 3 до 10, в зависимости от условий произрастания. На территории Брянска в каждом из четырёх административных районов обследовано по 60 foroфитов, собран биоматериал. Расположение деревьев для исследований выбиралось с учетом возможности проведения обследования участка ствола на высоте до 2,0 метров, деревья были равномерно освещенные, без искривлений. На объектах эпифитную лишайнофлору изучали на видах деревьев: *Tilia cordata* Mill., *Betula pendula* Roth, *Acer platanoides* L., *Pinus sylvestris* L., *Populus tremula* L., *P. nigra* L., *Quercus robur* L., *Aesculus hippocastanum* L., *Fraxinus excelsior* L., *Sorbus aucuparia* L., *Alnus glutinosa* (L.) Gaerth. Синтетические лишайноиндикационные индексы рассчитаны ранее [1].

Собранные образцы подвергались общепринятой камеральной обработке для пробоподготовки к работе на спектрометре «Спектроскан-Макс» фирмы Spectron [5]. В качестве общего показателя применяется интегрированный показатель сравнения «сумма тяжелых металлов». Проанализировано 402 образца биомассы лишайнотесты и столько же субстрата (коры). Определение серы по методу ЦИНАО выполнялось в соответствии с ГОСТ 26490-85, с адаптацией к растительному материалу [6]. Пробоподготовка состояла в следующем. При определении брался средний образец слоевища лишайника массой 0,2–0,3 г из общей отобранной пробы. После высушивания в сушильном шкафу при температуре 105°C в течение 3-х часов фарфоровый стаканчик в течение 12 часов остывал в эксикаторе, наполненном силикагелем, и в последующем взвешивался (определение влажности). Озоление лишайника проводилось в муфельной печи при температуре 400°C в течение 4-х часов (одновременно проводилось озоление 3–10 образцов). Сожженные образцы заливались водным 1,0 н раствором KCl, фильтраты вытяжек анализировались в соответствии с ходом анализа. При фотометрировании использовался спектрофотометр Спекс. Рассчитывались коэффициенты накопления (Кн) – как отношение концентрации элемента (ТМ, серы) в биомассе лишайников к концентрации его в коре foroфита [4]. Видовые названия лишайников указаны по Списку лишайнофлоры России [8].

Результаты исследований и их обсуждение

Сера – не чистый поллютант, относящийся к выбросам техногенных объектов, в больших количествах входит в состав пыли, состоящей как из неорганических так и биологических компонентов. В зоне защитных мероприятий ОУХО проективное покрытие эпифитных лишайносинузид близко к максимуму, каких-либо следов их массового разрушения, кроме естественных моментов отмирания, не отмечается. Негативное влияние в виде опасных концентраций в воздухе загрязняющих веществ, по материалам лишайномониторинга, аккумулируется в пределах промплощадки объекта от невысоких источников загрязнения. Высота дымовых труб основных производственных корпусов объекта по уничтожению составляет по данным проекта ПДВ от 20 до 30 метров. Разбавление загрязнителей на таких высотах происходит активно. С учетом невысоких концентраций ЗВ в самих газозвдушных смесях достижение опасных концентраций для человека или тем более лишайников маловероятно.

Результаты состояния воздуха по синтетическим лишайноиндикационным индексам – индексу полеотолерантности (ИП) и индексу атмосферной чистоты (ИАЧ) – в СЗЗ можно оценить как нормальное (ИАЧ = 12–20, ИП = 3,0–5,5).

За годы наблюдений (2010–2014 гг.) сдвига по превышению концентраций по содержанию ТМ в районе ОУХО не выявлено. В среднем

определяемые концентрации ТМ сопоставимы с составом коры форофитов (исследовалась кора сосны, березы тополя, ольхи, дуба). Сумма ТМ составляет 2500 мг/кг массы таллома, причем на долю железа приходится 70,4%, а марганца –12,3%. Такие элементы, как мышьяк, кобальт, ванадий, медь, находятся вне диапазона определения прибором, содержание их на исследуемой территории минимально. Для условий урбоэкосистемы сумма ТМ составляет в среднем 9800 мг/кг, на долю железа и марганца приходится 94,5%. Так как лишайники – накопительные биоиндикаторы, то наибольшее

содержание в их слоевищах зарегистрировано для свинца, цинка и меди.

Индивидуальные особенности видов отмечаются как по содержанию серы, так и ТМ. Например, содержание серы в талломе *Xanthoria parietina* выше, чем у *Parmelia sulcata*, в 1,3 раза (рис. 2). Сера входит в состав слоевищ эпифитных лишайников ОУХО в концентрации 17,0–70,0 мг/кг, городской среды – 20,0–140 мг/кг (рис. 1, 2). Относительно разных пород форофитов максимальное количество серы обнаружено в ольхе чёрной, в некоторых случаях оно больше содержания серы в лишайнике, минимальное – в коре березы.

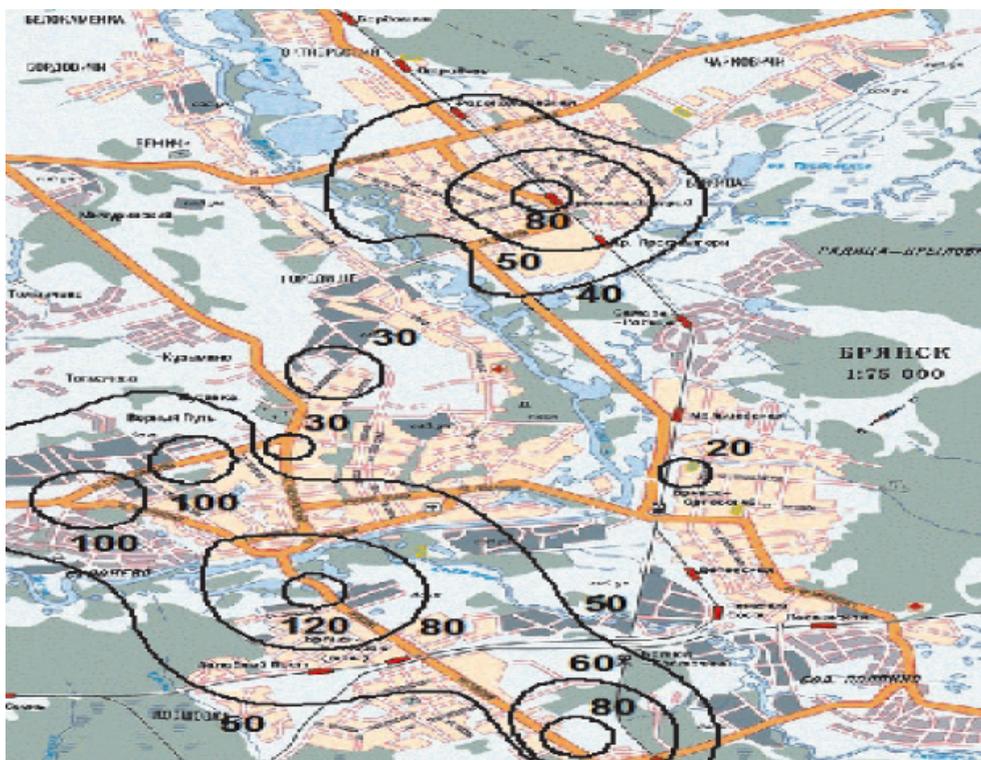


Рис. 1. Содержание серы общей (мг/кг) в слоевищах *Xanthoria parietina* в местообитаниях урбоэкосистемы

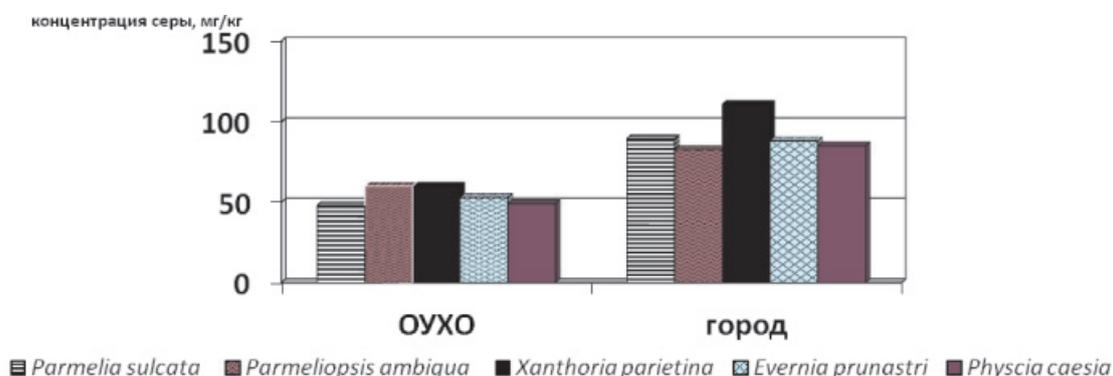


Рис. 2. Валовая концентрация серы (мг/кг) в слоевищах эпифитных лишайников Брянской области (ОУХО и г. Брянск, средние значения)

По содержанию серы общей на территории города методом изолиний выделено три зоны: с минимальным содержанием, средним и высоким (от 80 до 100,0 мг/кг). Наибольшее содержание серы общей зарегистрировано в слоевищах ксантории постенной и пармелии бороздчатой (г. Брянск). Валовая концентрация серы у всех исследованных видов, кроме *Parmeliopsis ambigua*, статистически достоверно различается для образцов, собранных на реперных точках ОУХО и местообитаний в урбоэкосистеме (рис. 2).

Содержание серы общей в слоевищах эпифитных лишайников – стабильная ве-

личина. Тем не менее, поскольку продукты деградации отравляющих веществ территории ОУХО устойчивы и в природной среде могут накапливаться во всех средах, возможно увеличение определяемого содержания и серы в слоевищах лишайников. Для ОУХО более информативно будет сравнение данных по точкам, расположенным непосредственно на границе промплощадки, на границе СЗЗ и границе ЗЗМ (рис. 3).

Как в городской среде, так и в СЗЗ химически опасного техногенного объекта информативным показателем накопительной способности лишайнобиоты служат коэффициенты накопления (таблица).

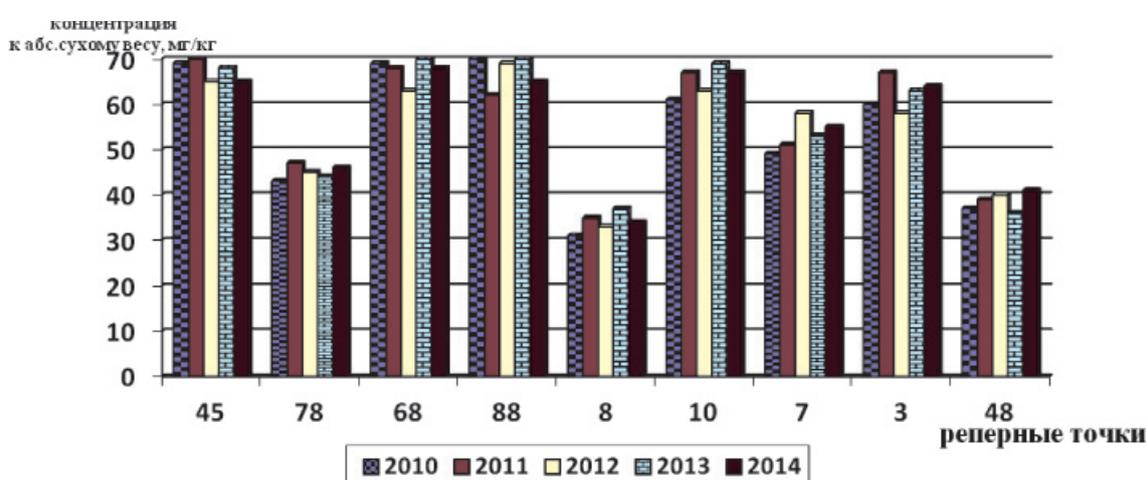


Рис. 3. Валовая концентрация серы общей (мг/кг) в слоевищах *Hypogymnia physodes* на реперных точках ОУХО (Почепский район, Брянская область)

Коэффициенты накопления (средние значения)
для серы эпифитной лишайнобиоты на различных форофитах

Виды форофитов	ОУХО						Урбоэкосистема					
	Кн для видов эпифитной лишайнобиоты											
	1*	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
<i>Tilia cordata</i>		0,73			1,45	0,55		0,82			1,98	1,53
<i>Betula pendula</i>		0,48			2,04	1,30		0,76			3,45	2,68
<i>Pinus sylvestris</i>	1,15		1,02	0,63			2,45		1,96	0,68		
<i>Quercus robur</i>			0,57		1,10				0,84		0,89	
<i>Fraxinus excelsior</i>		0,36			1,22	0,93		0,51			1,05	1,36
<i>Alnus glutinosa</i>					0,75							
<i>Sorbus aucuparia</i>					1,76	1,17					1,74	1,89
<i>Acer platanoides</i>					1,58	1,20					1,67	2,0
<i>Populus tremula</i>					1,48	1,24					1,79	1,79
<i>P. nigra</i>								0,69			2,0	1,75
<i>Aesculus hippocastanum</i>								0,93			1,48	1,30

Примечание. * Виды лишайнобиоты: 1 – *Hypogymnia physodes*, 2 – *Physcia caesia*, 3 – *Evernia prunastri*, 4 – *Parmeliopsis ambigua*, 5 – *Xanthoria parietina*, 6 – *Parmelia sulcata*.

Виды-исключители (не накапливают серу) – *Parmeliopsis ambigua*, *Physcia caesia*. Тест-объект по наибольшей накопительной способности серы (вид-индикатор) с Кн больше 2 – *Xanthoria parietina*, *Parmelia sulcata*. Коэффициенты накопления для эпифитной лишайнобиоты в СЗЗ меньше, чем для видов лишайников, собранных в местообитаниях города.

Выводы

В целом оценка информативности лишайнобиоты как показателя антропогенно измененных территорий применительно к объектам уничтожения ХО и урбоэкосистемам высокая. Исследования состава лишайников по содержанию серы, ТМ и синтетических лишайноиндикационных индексов в подтверждение к химическим исследованиям компонентов окружающей природной среды позволят вести комплексный экомониторинг. После завершения процесса уничтожения химического оружия и сворачивания обширной программы химических исследований лишайноиндикация позволит оценить способность к самовосстановлению территорий вокруг объекта по уничтожению химического оружия в г. Почеп Брянской области. По содержанию серы общей рекомендовано использовать тест-объекты – ксанторию постенную и пармелию бороздчатую. Используя данные концентрации серы общей в слоевищах эпифитных лишайников фоновых видов, можно проводить зонирование территорий антропогенно преобразованных экосистем (зона с малым, средним и высоким содержанием серы).

Список литературы

1. Анищенко Л.Н., Баясников И.А., Рудакова Т.А. Блок биомониторинга в экоаналитическом контроле химически опасных техногенных систем (на примере объекта по утилизации химического оружия 1204, Брянская область) // Теоретическая и прикладная экология. – 2013. – № 3. – С. 40–46.
2. Аржанова В.С., Скирина И.Ф. Значение и роль лишайноиндикационных исследований при эколого-геохимической оценке состояния окружающей среды // География и природные ресурсы. – 2000. – № 4. – С. 33–40.
3. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. – М.: Изд-во «Научный Мир», 2002. – 336 с.
4. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В.А. Ипатьев, В.Ф. Багинский, И.М. Булавик и др.; под ред. В.А. Ипатьева. – Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 1999. – 396 с.

5. Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошкообразных пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа. М 049-П/04. – СПб.: ООО НПО «Спектрон», 2004. – 20 с.

6. Почвы. Определение подвижной серы по методу ЦИ-НАО. ГОСТ 26490-85.

7. Руководство ЕМЕП по отбору проб и химическому анализу / пер. с англ.; под ред. А.Г. Рябошапка. Kjeller, 2001: [site of NILU]. URL: <http://tarantula.nilu.no/projects/ccc/manual/index.html> (дата обращения: 22.06.2013).

8. Список лишайнофлоры России. – СПб., 2010. – 194 с.

9. Эколого-физиологические особенности лишайников горной системы Центральной части Северного Кавказа / Л.Х. Слонов, Т.Л. Слонов. – Нальчик: Изд-во «Эльбрус», 2009. – 159 с.

References

1. Anishhenko L.N., Bajasnikov I.A., Rudakova T.A. Blok biomonitoringa v jekoanaliticheskom kontrole himicheski opasnyh tehnogennyh sistem (na primere objekta po utilizacii himicheskogo oruzhija 1204, Brjanskaja oblast) // Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija. 2013. no. 3. pp. 40–46.
2. Arzhanova V.S., Skirina I.F. Znachenie i rol lihenoindikacionnyh issledovanij pri jekologo-geohimicheskoy ocenke sostojanija okruzhajushhej sredy // Geografija i prirodnye resursy. 2000. no. 4. pp. 33–40.
3. Bjazrov L.G. Lishajniki v jekologicheskom monitoringe. M.: Izd-vo «Nauchnyj Mir», 2002. 336 s.
4. Les. Chelovek. Chernobyl. Lesnye jekosistemy после аварии на Чернобыльской АЭС: sostojanie, prognoz, reakcija naselenija, puti rehabilitacii / V.A. Ipatjev, V.F. Baginskij, I.M. Bulavik i dr.; pod red. V.A. Ipatjeva. Gomel: In-t lesa NAN Belarusi, 1999. 396 p.
5. Metodika vypolnenija izmerenij massovoj doli metallov i oksidov metallov v poroshkoobraznyh probah pochv metodom rentgenofluorescentnogo analiza. M 049-P/04. SPb.: ООО NPO «Спектрон», 2004. 20 p.
6. Pochvy. Opredelenie podvizhnoj sery po metodu CINAО. GOST 26490-85.
7. Rukovodstvo EMEP po otboru prob i himicheskому анализу / per. s angl.; pod red. A.G. Rjaboshapko. Kjeller, 2001: [site of NILU]. URL: <http://tarantula.nilu.no/projects/ccc/manual/index.html> (data obrashhenija: 22.06.2013).
8. Spisok lihenoflory Rossii. SPb., 2010. 194 p.
9. Jekologo-fiziologicheskie osobennosti lishajnikov gornoj sistemy Centralnoj chasti Severnogo Kavkaza / L.H. Slonov, T.L. Slonov. Nalchik: Izd-vo «Jelbrus», 2009. 159 p.

Рецензенты:

Булохов А.Д., д.б.н., профессор, зав. кафедрой биологии, ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского», г. Брянск;

Ториков В.Е., д.с.-х.н., профессор кафедры общего земледелия, технологии производства, хранения и переработки продукции растениеводства, ФГБОУ ВПО «Брянская государственная сельскохозяйственная академия», с. Кокино.

Работа поступила в редакцию 18.03.2015.