

**Биоиндикационные основы экоконтроля состояния сред обитания при утилизации химического оружия с применением лишенобиоты**

© 2015. И. А. Балясников<sup>1</sup>, к.с.-х.н., директор, Т. А. Рудакова, зав. лабораторией, Л. Н. Анищенко<sup>2</sup>, д.с.-х.н., профессор,

<sup>1</sup>Региональный центр государственного экологического контроля и мониторинга по Брянской области,

<sup>2</sup>Брянский государственный университет им. акад. И. Г. Петровского  
e-mail: rcegekim32@gmail.com, eco\_egf@mail.ru

Биоиндикационные основы оценки сред обитания на химически опасном техногенном объекте в Брянской области представлены с использованием комплексной лишенодиагностики. На основе использования количественных лишеноиндикационных индексов, также биохимических показателей доказана высокая информативность лишенобиоты применительно к средам обитания на объекте уничтожения химического оружия. Выявлены концентрации серы, фосфора и тяжёлых металлов в слоевищах лишайников в фоновом и импактном мониторинге территории химически опасного техногенного объекта. С момента начала сжигания реакционных масс на объекте не произошло исчезновения представителей чувствительных видов лишенобиоты, синтетические лишеноиндикационные индексы свидетельствуют о нормальном общем состоянии воздуха. Установлены индивидуальные накопительные особенности видов лишенобиоты, предложены тест-объекты на содержание серы: ксанторию постенную и пармелию бороздчатую. На основе концентрации серы общей, фосфора, трёх видов тяжёлых металлов в слоевищах эпифитных лишайников предложено зонирование территории объекта по утилизации химического оружия и карты распределения элементов при импактном биомониторинге. В целом состояние лесных экосистем реперных точек химически опасного техногенного объекта, оценено как «нормальное».

Biological bases of assessment of habitats on chemically dangerous object in the Bryansk region are represented using complex of lichenoidicators. Through the use of quantitative indexes of the lichenoidicators, biochemical indices proved to be highly informative lichen biota in relation to the habitats at the facility for destruction of chemical weapons. Concentrations of sulfur, phosphorus and heavy metals in thallus of a lichens in the background to impact the monitoring site chemically hazardous man-made object. Since the combustion reaction mass to the object had not been for the disappearance of representatives of the sensitive species of the lichen biota, synthetic lichen-indication index indicates normal General condition of the air. Individual cumulative features of species of the lichen biota proposed test objects on the sulphur content of *Xanthoria parietina* and *Parmelia sulcata*. The concentration of total sulfur, phosphorus, three types of heavy metals in thalli of the epiphytic lichens of the proposed zoning the site for the disposal of chemical weapons and maps of distribution of elements in the impact biomonitoring. Overall, the state of the forest ecosystem reference points chemically hazardous man-made object that is evaluated as «normal».

Ключевые слова: биомониторинг, комплексная лишеноиндикация, импактный и фоновый мониторинг, объект по утилизации химического оружия, Брянская область.

Keywords: biomonitoring, monitoring with lichens, background and impact monitoring, a facility for the disposal of chemical weapons, Bryansk region.

Создание и апробирование системы биомониторинга на объектах по утилизации химического оружия (ОУХО) – важный механизм в экоконтроле при подведении итогов фонового и импактного мониторинга компонентов сред обитания [1]. В Брянской области на химически опасном техногенном объекте (ОУХО 1204, Почепский район, Брянская область) широко применяются биоиндикационные исследования, собраны, обработаны и обнародованы фондовые и текущие материалы, выделены перспективные биоиндикаторы [2]. Особенно зарекомендовал себя лишеноиндикационный метод,

позволяющий прогнозировать во времени уровень загрязнения, динамику качества окружающей среды, состояние компонентов сообществ, проводить крупномасштабное картирование территорий, а также сочетать биоиндикационные и экоаналитические данные [3]. Несмотря на то, что метод лишеноиндикации используется исследователями не одно десятилетие [4, 5], перспектива его применения несомненна: получение комплексной количественной характеристики сред обитания, установление возможных причин неблагоприятных изменений в экосистемах различного происхождения.

Цель работы – представить комплексную лишеноиндикационную основу экоконтроля на химически опасном техногенном объекте (на примере ОУХО в Брянской области).

Полевые исследования проводились на территории зоны защитных мероприятий ОУХО в Почепском районе Брянской области. Практически 80% территории санитарно-защитной зоны ОУХО и большие площади за её пределами составляют лесные массивы. Поэтому в условиях ветровой тени затруднено получение достоверных данных по концентрациям загрязняющих веществ, поступающих в воздух при эксплуатации объекта. Уничтожение авиационных химических боеприпасов, снаряжённых заринном, зоманом и Ви-икс, хранящихся на арсенале воинской части, началось на ОУХО в 2010 г., сжигание реакционных масс проводится со второго квартала 2011 г. Результаты лишенологических исследований дополняют инструментальный контроль по маркерным элементам (сере, фосфору), тяжёлым металлам (ТМ), их распространению в слоевищах фоновой лишенобиоты, в системе контроля общего состояния атмосферного воздуха в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) объекта [6].

Для анализа химического состава собирались фоновые (наиболее распространённые) виды эпифитных лишайников, кора деревьев-форофитов. Содержание ТМ, серы и фосфора определялось в биомассе *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Physcia caesia* (Hoffm.) Fűrnr., *Evernia mesomorpha* Nyl., *E. 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 форофитов в каждом пункте составляло от 3 до 10, в зависимости от условий произрастания. Расположение деревьев для исследований выбиралось с учётом возможности проведения обследования участка ствола, на высоте до 2,0 метров, равномерно освещённых, без искривлений. На объектах эпифитную лишенофлору 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 лишеноиндикационные индексы рассчитаны ранее [2].

Собранные образцы подвергались общепринятой камеральной обработке для пробоподготовки к работе на спектрометре «Спектроскан-Макс» фирмы Spectron [8]. В качестве общего показателя применяется интегрированный показатель сравнения «сумма тяжёлых металлов». За все годы исследований проанализировано более 800 образцов биомассы лишенобиоты и столько же субстрата (коры). Определение серы по методу ЦИНАО выполнялось в соответствии с ГОСТ 26490-85, с адаптацией к растительному материалу [9]. При фотометрировании использовался спектрофотометр Спекс. Определение массовой доли общего фосфора в лишайниках проведено по МВИ № 031-03-183-05 «Методика выполнения измерений общего фосфора в почве фотометрическим методом», доработанной для исследования биологического (растительного) материала [10]. Фотометрирование проводилось на спектрофотометре UNICO 1201. Рассчитывались коэффициенты накопления (Кн) – как отношение концентрации элемента (ТМ, серы, фосфора) в биомассе лишайников к концентрации его в коре форофита [11, 12]. Видовые названия лишайников указаны по Списку лишенофлоры России [13].

На химически опасном техногенном объекте сера и фосфор – маркерные элементы продуктов деструкции отравляющих веществ (ОВ), которые могут аккумулироваться элементами биоты. По данным проекта ПДВ для производственных корпусов ОУХО высота дымовых труб составляет 20-30 метров, что гарантирует активное разбавление загрязнителей на таких высотах. Поэтому достижение опасных концентраций контролируемых веществ для человека или биоиндикаторов лишайников маловероятно, но техногенное воздействие на состояние воздуха прослеживается. Определение содержания в слоевищах лишайников фосфора, серы, ТМ, их накопления в дополнении к точным газохроматографическим методам определения ОВ, продуктов их деструкции и компонентов дегазирующих рецептур, позволит в полной мере проводить анализ техногенного воздействия на территорию СЗЗ, и в целом на административные районы области.

В зоне защитных мероприятий ОУХО проективное покрытие эпифитных лишеносинузий близко к максимуму, каких-либо следов их массового разрушения, кроме естественных моментов отмирания, не отмечается. Результаты состояния воздуха по синтетическим лишеноиндикационным 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, берёзы тополя, ольхи, дуба). Сумма ТМ составляет 2500 мг/кг массы таллома, причём на долю железа приходится 70,4%, а марганца – 12,3%. Такие элементы как мышьяк, кобальт, ванадий находятся вне диапазона определения прибором, содержание их на исследуемой территории минимально. Так как лишайники – накопительные биоиндикаторы, то наибольшее содержание в их слоевищах зарегистрировано для свинца, цинка и меди. Также установлено, что содержание этих ТМ регулируется уровнем загрязнённости ими воздуха [14]. Наблюдаемую территорию ОУХО разделяют на две группы зон по валовому содержанию ТМ в слоевищах лишайнобиоты: для свинца – зоны до 20,0 мг/кг и вторая – выше, для меди – до 30,0 мг/кг и выше, для цинка – до 35,0 мг/кг и выше (рис. 1-3). Валовые концентрации трёх ТМ не превышают фоновые для Брянской области.

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. 4). Сера входит в состав слоевищ эпифитных лишайников ОУХО в концентрации 17,0-70,0 мг/кг (рис. 5). Относительно разных видов форофитов, максимальное количество серы обнаружено в ольхе чёрной, в некоторых случаях оно больше содержания серы в лишайнике, минимальное – в коре берёзы.

Содержание серы общей в слоевищах эпифитных лишайников стабильная величина. Для ОУХО более информативно будет сравнение данных по точкам, расположенным непосредственно на границе промплощадки, на границе СЗЗ и границе зоны защитных мероприятий (ЗЗМ) (рис. 5).

Фосфор в составе слоевищ лишайников определялся с 2008 г. как маркер присутствия ФОВ [6]. Результаты имеют общую тенденцию к увеличению, однако с момента пуска завода по уничтожению ХО в 2011 г. не произошло скачкообразного роста его концентраций (рис. 7). Следовательно, прогнозируемого «плохого сценария» развития экологической ситуации с момента сжигания отходов не произошло. Содержание фосфора в коре деревьев меньше в 2-4 раза.

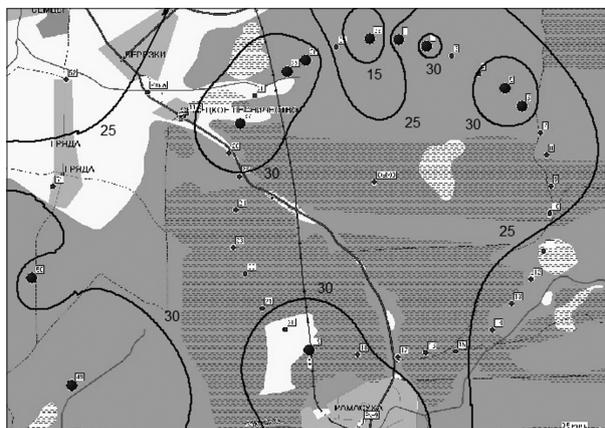


Рис. 1. Изолинии валового содержания меди (мг/кг) в слоевищах эпифитной лишайнобиоты реперных точек ОУХО.

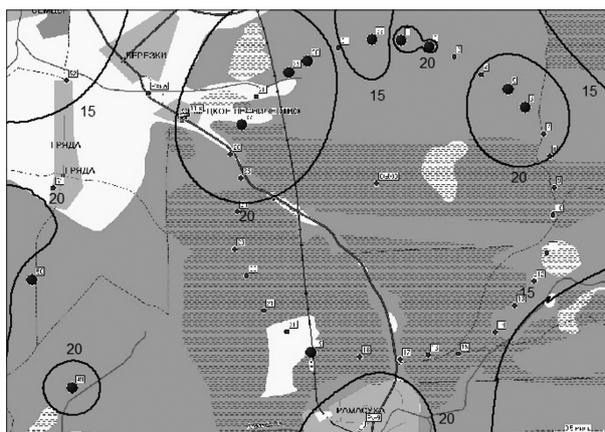


Рис. 2. Изолинии валового содержания свинца (мг/кг) в слоевищах эпифитной лишайнобиоты реперных точек ОУХО.

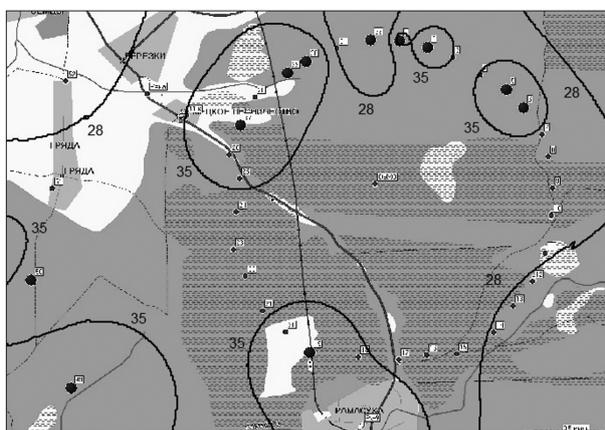


Рис. 3. Изолинии валового содержания цинка (мг/кг) в слоевищах эпифитной лишайнобиоты реперных точек ОУХО.

По содержанию фосфора общего в слоевищах эпифитного лишайника гипогимнии вздутой выделено три группы зон (рис. 8). Значительная часть территории характеризуется средней концентрацией фосфора (концентрация к абс. сухому весу, мг/кг).

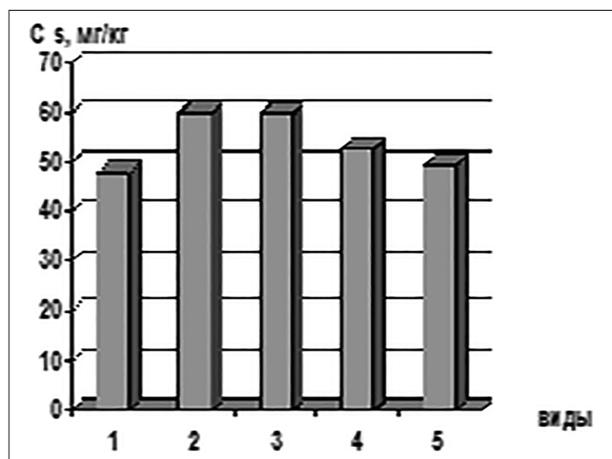


Рис. 4. Валовая концентрация серы (мг/кг) в слоевищах эпифитных лишайников реперных точек ОУХО (средние значения).

Виды лишайников: 1 – *Parmelia sulcata*, 2 – *Parmeliopsis ambigua*, 3 – *Xanthoria parietina*, 4 – *Evernia prunastri*, 5 – *Physcia caesia*.

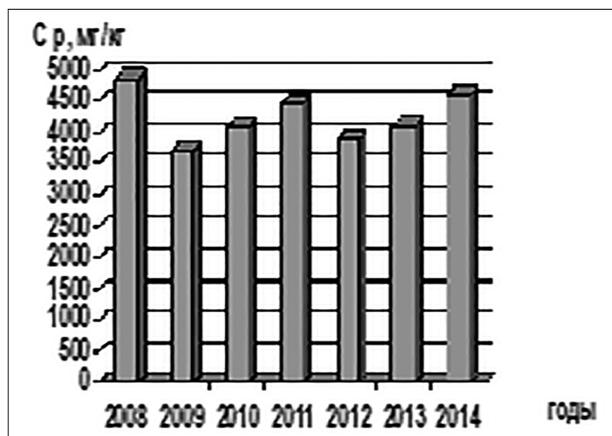


Рис. 7. Содержание фосфора в слоевищах *Hypogymnia physodes* (концентрация к абс. сухому весу, мг/кг) в реперных точках ОУХО в 2008-2014 гг.

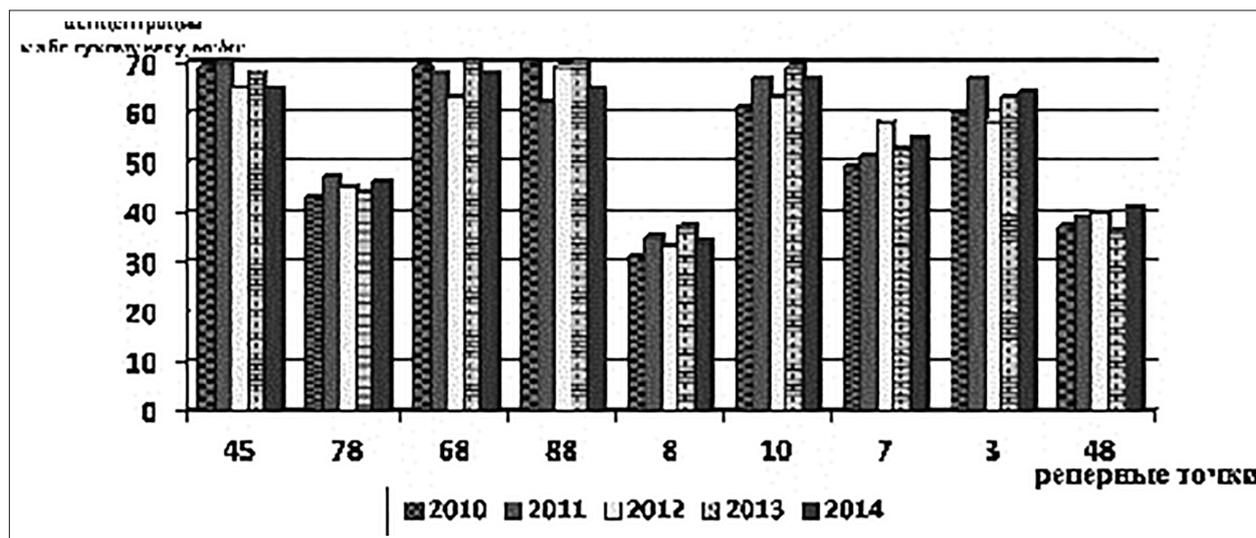


Рис. 5. Валовая концентрация серы общей (мг/кг) в слоевищах *Hypogymnia physodes* на реперных точках ОУХО (Почепский район, Брянская область).

Содержание фосфора в талломах эпифитной лишайной биоты – видовой признак. Концентрация фосфора (к абс. сухому весу, мг/кг) в биомассе *Parmelia sulcata* и *Xanthoria parietina* наименьшее и достоверно отличается от величин концентраций у других исследованных эпифитных лишайников (рис. 9).

Минимальное содержание фосфора выявлено у нитрофильного вида ксантории постенной, также у пармелии бороздчатой, предпочитающего умеренно богатые элементами субстраты, умеренно кислые (рН 4,9-5,6). Виды рода эверния, гипогимния вздутая предпочитают кору относительно бедную элементами питания, довольно кислую (рН 4,1-4,8), содержат наибольшие концентрации свободного фосфора.

Тем не менее, поскольку продукты деградации ОВ территории ОУХО устойчивы и могут накапливаться во всех средах, возможно увеличение определяемого содержания серы и фосфора в слоевищах лишайников.

В ССЗ химически опасного техногенного объекта информативным показателем накопительной способности лишайников служат коэффициенты накопления (Кн) (табл. 1).

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*. Кн для эпифитной лишайников в СЗЗ меньше, чем для видов лишайников, собранных в местообитаниях города. Ни один из видов лишайников не накапливает фосфор, это виды-исключители. Ксантория постенная

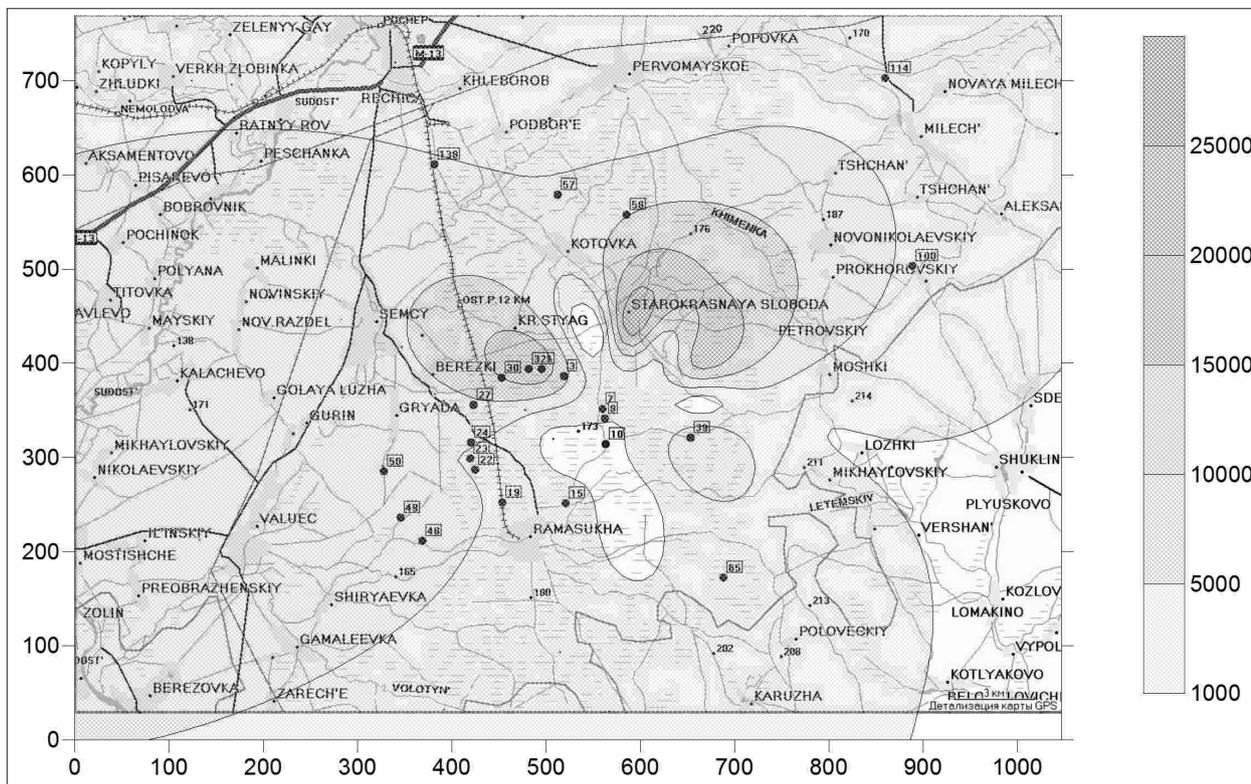


Рис. 8. Графическое изображение содержания общего фосфора в лишайниках (*Hypogymnia physodes*) с интерполяцией на карту местности на ОУХО ([6])

Виды: 1 – *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., 2 – *Evernia mesomorpha* Nyl., 3 – *Evernia prunastri* (L.) Ach., 4 – *Parmelia sulcata* Tayl., 5 – *Xanthoria parietina* (L.) Belt.

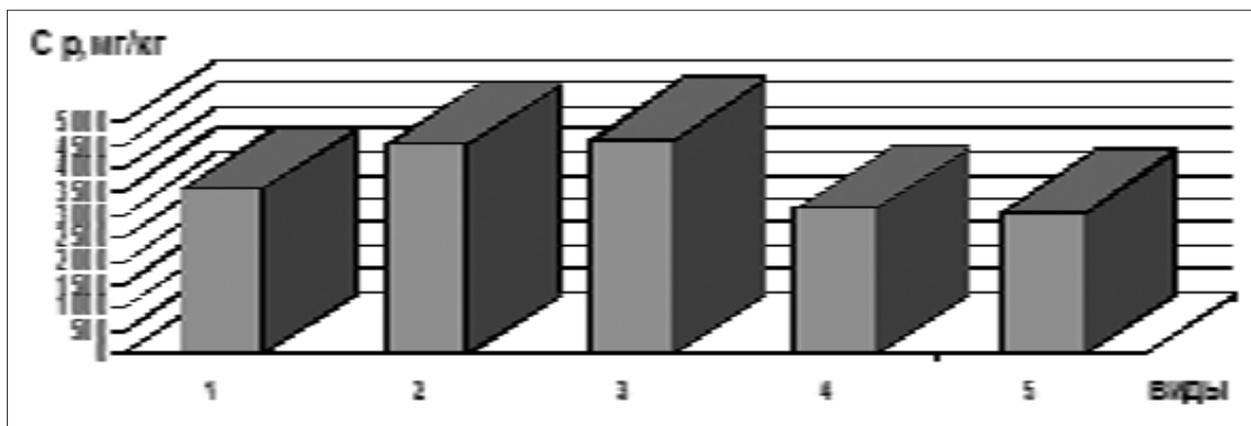


Рис. 9. Средние значения концентрации к абс. сухому весу (мг/кг) фосфора в слоевищах лишайников по видам в реперных точках ОУХО в 2008–2014 гг.

(форофит – дуб черешчатый) практически приближается по значению коэффициента накопления к нейтральным видам.

В целом по мере удаления реперных точек от объекта по утилизации и промышленной зоны уменьшение содержание серы, фосфора, ТМ в слоевищах лишайников не выявлено, различия в концентрациях статистически недостоверно. Полученные данные химического состава слоевищ эпифитных лишайников – основа для биохимической оценки нарушен-

ности экосистем по Б.В. Виноградову (1998) и выделения зон состояния экосистем [15]. Биохимические критерии, отображающие степень концентрирования различных веществ и их соединений в лишайнобиоте лесных экосистем на ОУХО, показывают экологическую зону «норма».

В целом, оценка информативности лишайнобиоты, как показателя антропогенно измененных территорий, применительно к объектам уничтожения ХО, высокая. Ис-

Таблица 1

Коэффициенты накопления (средние значения) для серы (1) и фосфора (2) в талломах эпифитной лишенобиоты на различных форофитах

Виды форофитов	1					2					
	коэффициент накопления для видов эпифитной лишенобиоты										
	1*	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Tilia cordata</i>		0,73			1,45	0,55		0,34		0,44	0,42
<i>Betula pendula</i>		0,48			2,04	1,30		0,52		0,67	0,51
<i>Pinus sylvestris</i>	1,15		1,02	0,63			0,38		0,27		
<i>Quercus robur</i>			0,57		1,10				0,38	0,89	
<i>Fraxinus excelsior</i>		0,36			1,22	0,93		0,51		0,33	0,41
<i>Alnus glutinosa</i>					0,75						
<i>Sorbus aucuparia</i>					1,76	1,17				0,62	0,58
<i>Acer platanoides</i>					1,58	1,20				0,38	0,35
<i>Populus tremula</i>					1,48	1,24				0,62	0,37

Примечание. \* Виды лишенобиоты: 1. *Hypogymnia physodes*, 2. *Physcia caesia*, 3. *Evernia prunastri*, 4. *Parmeliopsis ambigua*, 5. *Xanthoria parietina*, 6. *Parmelia sulcata*, 7. *Hypogymnia physodes*, 8. *Evernia mesomorpha*, 9. *Evernia prunastri*, 10. *Xanthoria parietina*, 11. *Parmelia sulcata*.

следования состава лишайников по содержанию серы, фосфора, ТМ и синтетических лишеноиндикационных индексов позволят вести комплексный экомониторинг и оценить способность к самовосстановлению экосистем после завершения процесса уничтожения химического оружия и сворачивания обширной программы химических исследований вокруг объекта по уничтожению ХО. С момента начала сжигания реакционных масс на ОУХО не произошло исчезновения представителей чувствительных видов лишенобиоты, синтетические лишеноиндикационные индексы свидетельствуют о нормальном общем состоянии воздуха.

Установлены индивидуальные особенности видов лишенобиоты как по содержанию фосфора, так и серы. По коэффициенту накопления серы общей рекомендовано использовать тест-объекты – ксанторию постенную и пармелию бороздчатую. Не удалось предложить маркерные виды лишайников для мониторинга фосфора. Используя данные концентрации серы общей, фосфора, трёх видов ТМ в слоевищах эпифитных лишайников фоновых видов, проведено зонирование территории ОУХО. По фоновому валовому содержанию ТМ в биомассе лишайников можно сделать предположение об отсутствии поступления загрязнителей с трансграничным перемещением воздушных масс, а также о стабильной работе очистных сооружений. В целом полученные биохимические показатели фоновой лишенобиоты позволили оценить состояние лесных экосистем территории ОУХО как нормальное (по Б.В. Виноградову).

### Литература

1. Ашихмина Т.Я., Менялин С.А., Мамаева Ю.И., Новикова Е.А., Кантор Г.Я. Экологический контроль и мониторинг окружающей природной среды в районе объекта уничтожения химического оружия «Марадыковский» Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 1. С. 57–63.
2. Анищенко Л.Н., Балясников 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.
3. Анищенко Л.Н., Балясников И.А., Рудакова Т.А. Лишеноиндикация состояния атмосферного воздуха на химически опасных техногенных объектах // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 4. С. 79–84.
4. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. – М.: Изд-во «Научный Мир», 2002. 336 с.
5. Аржанова В.С., Скирина И.Ф. Значение и роль лишеноиндикационных исследований при эколого-геохимической оценке состояния окружающей среды // География и природные ресурсы. 2000. №4. С. 33–40.
6. Акименков Н.В., Бачегов С.А. Анализ работы ЦЭАЛ в рамках программы мониторинга и контроля окружающей природной среды в санитарно-защитной зоне и зоне защитных мероприятий комплекса объектов по хранению и уничтожению химического оружия в г. Почеп Брянской области в 2006-2010 гг. // III Междунар. науч.-практ. конф.: Сб. статей. Брянск: Изд-во Курсив, 2010. С. 40–48.
7. Руководство ЕМЕП по отбору проб и химическому анализу / пер. с англ.; Под ред. А. Г. Рябошапко. Kjeller, 2001: [site of NILU]. URL: <http://tarantula.nilu.no/projects/ccc/manual/index.html> (дата обращения: 22.06.2015).

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

9. Почвы. Определение подвижной серы по методу ЦИНАО. ГОСТ 26490-85.

10. МВИ № 031-03-183-05. Методика выполнения измерений общего фосфора в почве фотометрическим методом. ФГУ «ГосНИИЭНП». Саратов. 2004.

11. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз,

реакция населения, пути реабилитации / Под ред. В. А. Ипатьева. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 1999. 396 с.

12. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 340 с.

13. Список лишенофлоры России. СПб. 2010. 194 с.

14. Шарунова И. П. Межвидовая и внутривидовая изменчивость накопления тяжелых металлов эпифитными лишайниками в градиенте токсической нагрузки.: дисс. ... канд.биол. наук. Екатеринбург. 2008. 119 с.

15. Виноградов Б.В. Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.