

## Методы лишеноиндикации в оценке загрязнения атмосферного воздуха соединениями фосфора

© 2019. Е. А. Домнина<sup>1,2</sup>, к. б. н., доцент, с. н. с.,  
С. Ю. Огородникова<sup>2</sup>, к. б. н., с. н. с., С. В. Пестов<sup>1,2</sup>, к. б. н., доцент, н. с.,  
Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., г. н. с., профессор, зав. лабораторией,

<sup>1</sup>Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

<sup>2</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: svetao\_05@mail.ru

Изучено проективное покрытие и содержание общего фосфора в талломах лишайника *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. на участках, расположенных в районе функционирования объекта уничтожения фосфорсодержащих отравляющих веществ в Кировской области. Участки мониторинга представлены лесными фитоценозами (подзона южной тайги) и расположены на разном удалении от источника загрязнения (1,2–9,6 км). Содержание общего фосфора в талломах *H. physodes* за период наблюдений (2010–2019 гг.) изменялось в пределах 409–1532 мкг/г сухой массы. На основании кластерного анализа по содержанию фосфора выделяется две группы участков. К первому кластеру относятся участки с повышенным накоплением соединений фосфора в талломах лишайников, они расположены вблизи источника загрязнения в направлении преобладающих ветров. На участках, относящихся ко второму кластеру, выявлены незначимые различия по содержанию фосфора в талломах *H. physodes*. Среднее значение общего проективного покрытия гипогимнии на участках мониторинга находится в пределах 24–41%. На основании кластерного анализа данных по проективному покрытию выделяется также два кластера. К первому кластеру относятся участки с повышенным значением проективного покрытия (более 30%), они максимально удалены от источника загрязнения. Ко второму кластеру, который характеризуется меньшими значениями проективного покрытия, относятся участки, расположенные вблизи техногенного объекта, а также с подветренной стороны. Выявлена отрицательная корреляция между изученными показателями лишеноиндикации: по мере приближения к источнику загрязнения происходит снижение проективного покрытия и повышенное накопление соединений фосфора. Данная зависимость максимально проявилась в 2013–2015 гг. Показано, что с 2015 г. уровень фосфора в талломах лишайников, независимо от расположения участка наблюдений, снижался. Это обусловлено уменьшением поступления соединений фосфора в окружающую среду и вовлечением накопленного фосфора в процессы жизнедеятельности *H. physodes*.

**Ключевые слова:** лишайники, *Hypogymnia physodes*, содержание фосфора, проективное покрытие, биоиндикаторы, загрязнение воздуха.

## Lichenoindication methods for assessing atmospheric air pollution by phosphorus compounds

© 2019. E. A. Domnina<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-5063-8606, S. Yu. Ogorodnikova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8865-4743,  
S. V. Pestov<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-5464-793X, T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047

<sup>1</sup>Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>2</sup>Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982,

e-mail: svetao\_05@mail.ru

Projective cover and total phosphorus content in thalli of *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. in the area of operation of the facility for the destruction of phosphorus-containing toxic substances (Kirov region) was studied. Monitoring sites are represented by forest phytocenoses (subzone of the southern taiga) and are located at different distances from the source of pollution (1.2–9.6 km). The total phosphorus content in the thalli of *H. physodes* during the research period (2010–2019) varied in the range of 409–1532 µg/g dry weight. Based on the cluster analysis by the phosphorus content,

two groups of sites are distinguished. The first cluster includes areas with increased accumulation of phosphorus compounds in lichen thalli; they are located near the pollution source in the direction of prevailing winds. In areas belonging to the second cluster, insignificant differences in the phosphorus content in the thalli of *H. physodes* were revealed. The average value of the total projective cover of hypogymnia in monitoring sites is in the range of 24–41%. Based on a cluster analysis of data on projective cover, 2 clusters are also distinguished. The first cluster includes areas with an increased value of projective cover (more than 30%), they are maximally distant from the source of pollution. The second cluster, which is characterized by lower values of the projective cover, includes areas located near the technogenic object, as well as on the leeward side. A negative correlation between the studied lichen indices was revealed: as we approach the source of pollution, the projective cover decreases and the accumulation of phosphorus compounds increases. This dependence was maximally manifested in 2013–2015. It has been shown that since 2015, the phosphorus level in lichen thalli, regardless of the location of the observation site, has been decreasing. This is due to a decrease in the intake of phosphorus compounds in the environment and the involvement of accumulated phosphorus in the life processes of *H. physodes*.

**Keywords:** lichens, *Hypogymnia physodes*, phosphorus content, projective coating, bioindicators, air pollution.

В Кировской области на объекте «Марадыковский» с 2006 г. по 2015 г. проводилось уничтожение химического оружия [1]. В процессе деструкции фосфорсодержащих отравляющих веществ образуются неорганические соединения фосфора [2], которые могли поступать в окружающую среду в составе отходящих газов от печей сжигания реакционных масс.

Лишайники, благодаря анатомо-морфологическим и физиологическим особенностям, активно и пассивно поглощают из воздуха различные поллютанты. Лишайники являются чувствительными аккумулятивными индикаторами промышленных загрязнений и применяются для ранней диагностики негативных изменений состояния окружающей среды, когда реакции других компонентов ещё не выражены [3], а также, позволяют отслеживать загрязнение воздуха в динамике.

Для оценки степени атмосферного загрязнения используют различные индикаторные свойства лишенобиоты: химический состав, физиолого-биохимические показатели жизнедеятельности, анатомия, морфология, видовой состав, популяционная структура [4–10]. Показано изменение проективного покрытия лишайников под влиянием загрязняющих веществ [6, 11, 12]. Ряд исследований посвящён изучению поглощения поллютантов лишайниками при их переносе в экологически неблагоприятные районы [13–16]. Авторами работы [17] отмечается, что при приближении к объекту загрязнения, увеличивается содержание фосфора в лишайниках. Накопление фосфора в лишайниках отмечено в зоне влияния горно-металлургических предприятий и связано с поглощением из атмосферы [18]. Ранее нами также было показано, что эпифитные лишайники, в отличие от хвой сосны и мхов в большей степени накапливают соединения фосфора [19]. Фосфор может поступать в лишайники в составе твёрдых взвешенных частиц [20].

Целью работы было изучить пространственные закономерности накопления соединений фосфора в талломах лишайника *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. и его проективного покрытия в районе функционирования объекта уничтожения фосфорсодержащих отравляющих веществ.

### Объекты и методы исследования

Исследования проводили в 2010–2019 гг. на территории Оричевского района Кировской области (подзона южной тайги). Участки мониторинга представлены находились в лесных фитоценозах на разном удалении от объекта уничтожения химического оружия (ОУХО). Фоновый участок расположен на значительном расстоянии (9,6 км) на юго-запад от источника загрязнения. Характеристика участков представлена в таблице 1.

Почвы района исследования являются подзолами, которые характеризуются низким содержанием соединений фосфора [2]. Основным источником поступления соединений фосфора в слоевище лишайников являются атмосферные выпадения.

В качестве объекта исследования был выбран эпифитный листоватый лишайник *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. Гипогимния доминирует в эпифитном покрове основных лесобразующих пород (сосна, ель) на изучаемой территории. Лишайник *H. physodes*, по сравнению с другими видами, устойчив к действию поллютантов и может существовать в условиях загрязнения атмосферного воздуха промышленными выбросами длительное время [21].

Известно, что содержание фосфора в талломах *H. physodes*, произрастающих на коре сосны, больше, чем в образцах, отобранных с коры ели и берёзы [22]. В связи с этим, в условиях загрязнения воздуха соединениями фосфора, наибольший интерес представляет

Таблица 1 / Table 1

Характеристика участков мониторинга / Characteristics of monitoring sites

Номер участка Site number	Расстояние от источника загрязнения, км The distance from the source of pollution, km	Сторона света Side of the world	Тип фитоценоза Type of phytocenosis
4	1,22	северо-восток northeast	березово-сосняк разнотравный birch-pinery with motley grass
9	1,63	восток east	сосняк мёртвopокровный pinery with dead covering
18	1,49	юг-юго-запад south-southwest	сосняк бруснично-зеленомошный с вейником lingonberry-green moss pinery with reed
19	1,49	юг-юго-запад south-southwest	сосняк зеленомошный green moss pinery
28	1,09	север-северо-запад north-northwest	сосняк чернично-брусничный с вейником blueberry-lingonberry pinery with reed
30	1,36	север-северо-запад north northwest	сосняк чернично-брусничный с вейником blueberry-lingonberry pinery with reed
34	3,12	юг-юго-запад south-southwest	сосняк чернично-брусничный с вейником blueberry-lingonberry pinery with reed
47	2,16	запад-юго-запад west-southwest	березово-сосняк вейниково-черничный с костяникой birch-pinery with reed, blueberry and stone berry
112	9,63	юго-запад southwest	сосняк бруснично-вейниковый pinery with lingonberry and reed

накопление фосфора в слоевищах *H. physodes*, отобранных с сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Общее проективное покрытие эпифитными лишайниками на участке рассчитывали на основе оценки проективного покрытия на 10 деревьях сосны с северной и южной стороны на высоте 1,5 м [11].

На каждом участке с деревьев сосны отбирали талломы *H. physodes*. Талломы очищали от коры и высушивали до воздушно-сухого состояния. Содержание фосфора в лишайниках определяли по ГОСТ 26657-97. В муфельной печи при температуре 525 °С проводили минерализацию проб лишайников. В результате сухого озоления соединения фосфора, содержащиеся в составе лишайника, переходят в фосфаты. Количество фосфатов в золе лишайников определяли фотометрически на спектрофотометре UNICO 2800 (США). Рассчитывали содержание фосфора в лишайниках в мкг/г сухой массы. Определение фосфора в лишайниках на разных участках мониторинга проводили в трёхкратной биологической повторности и в двухкратной аналитической повторности. В таблицах и рисунках представле-

ны средние арифметические значения и стандартные ошибки.

Карты распределения концентрации строили в программе QGIS 2.18. Для интерполяции данных использовали метод обратных взвешенных расстояний (IDW) [23].

### Результаты и обсуждение

Лесные экосистемы играют важную роль в накоплении загрязняющих веществ (газов, твёрдых взвешенных частиц) из атмосферного воздуха. В составе поллютантов содержатся не только вредные вещества, но и необходимые для живых организмов биогенные элементы. Фосфор характеризуется значительной биогеохимической активностью [18], он относится к числу элементов биологического накопления, коэффициент его биологического поглощения больше 1 [22].

Известно, что большая часть необходимых для жизнедеятельности минеральных веществ улавливается лишайниками из воздуха и дождевой воды. Вместе с водой слоевище лишайника всей своей поверхностью впитывает растворённые в воде соединения, в том числе

Таблица 2 / Table 2

Содержание общего фосфора в талломах *H. physodes* (мкг/г сухой массы), отобранных на разных участках мониторинга / Total phosphorus content in the thalli of *H. physodes* (µg/g dry weight), selected at different monitoring sites

Год Year	Номер участка / Site number							
	4	9	18	19	28	30	47	112
2010	860±122	697±93	909±323	978±464	982±104	999±46	1528±160	433±44
2011	1392±121	1570±60	866±123	817±65	1108±104	931±33	785±6	944±49
2012	663±41	667±2	511±46	409±50	490±2	450±33	574±94	637±39
2013	1468±155	1138±9	641±12	698±25	–	493±29	631±116	535±3
2014	1476±150	1203±34	723±57	763±65	744±23	515±27	603±52	701±41
2015	1532±170	977±113	760±26	788±71	737±14	588±81	762±70	730±6
2016	1112±82	1208±46	811±49	707±70	701±21	661±26	694±38	728±11
2017	1103±97	902±76	821±64	789±29	768±32	603±27	529±37	603±97
2019	880±7	963±105	707±30	642±29	–	–	577±17	722±58

Примечание: «–» нет данных.  
Note: “–” no data.

и загрязняющие вещества [4], поглощение которых из дождевой воды сопровождается накоплением в слоевище. Гипогимния также поглощает вещества из окружающей среды.

Данные по накоплению фосфора в талломах *H. physodes* приведены в таблице 2. Содержание общего фосфора в талломах за период наблюдений варьировало в пределах 433–1532 мкг/г, что согласуется с данными других исследователей [13, 22].

На основе многолетних данных построена карта-схема содержания фосфора в эпифитных лишайниках, произрастающих на участках в районе размещения ОУХО (рис. 1, см. цв. вкладку). На карте-схеме исследуемой территории выделяется область с повышенным накоплением соединений фосфора в талломах лишайников только на участках 4 и 9.

На основании проведенного кластерного анализа выделяются две группы участков по содержанию фосфора (рис. 2). К первому кластеру относятся участки 4 и 9, они отличаются повышенным накоплением соединений фосфора в талломах лишайников и находятся вблизи источника загрязнения в юго-западном и северо-восточном направлении (направления преобладающих ветров). Повышенное содержание соединений фосфора в сравнении с фоном в талломах *H. physodes* на участках 4 и 9, вероятно, обусловлено поступлением фосфорсодержащих соединений в атмосферу в ходе функционирования ОУХО.

Положение участков внутри второго кластера (участки 18, 19, 28, 30, 47, 112) связано с незначимыми ненаправленными изменениями содержания фосфора в талломах гипогимнии.

Проведён анализ содержания соединений фосфора в талломах лишайников по годам. В 2010 г. зависимости между содержанием общего фосфора в эпифитных лишайниках и расположением участка относительно ОУХО не установлено (рис. 3). С 2011 г. прослеживается тенденция повышенного накопления соединений фосфора в талломах лишайников, отобранных с участков 4 и 9, относящихся к первому кластеру, по сравнению с остальными участками наблюдений (кластер 2), включая фоновую территорию. Максимальное содержание фосфора в талломах гипогимнии отмечено

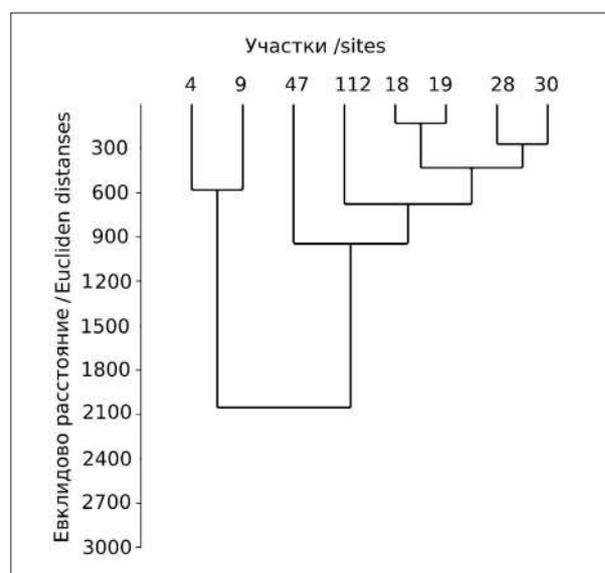
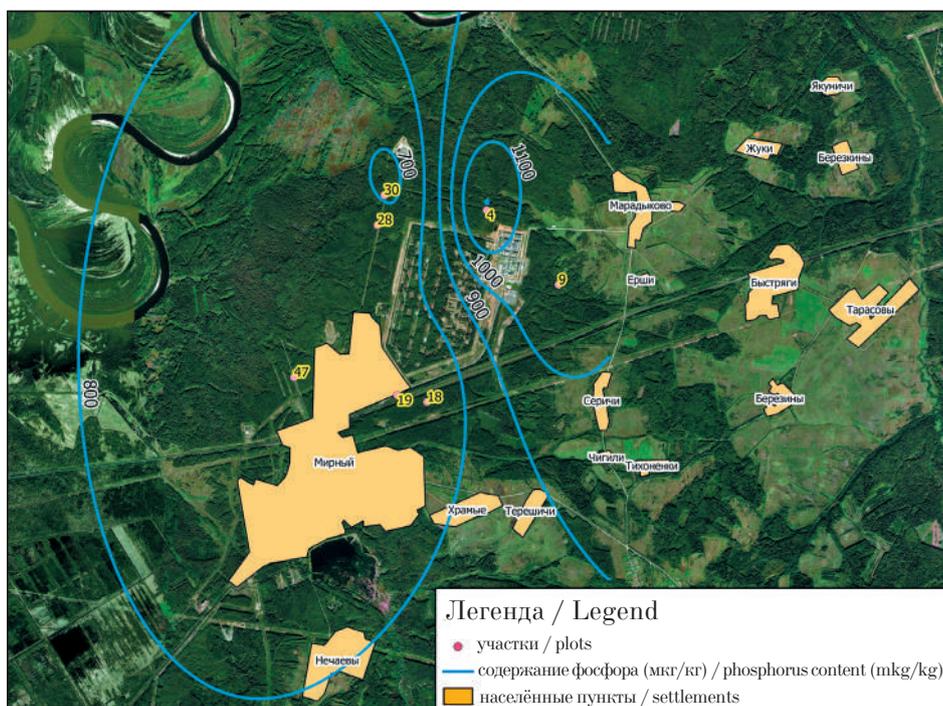
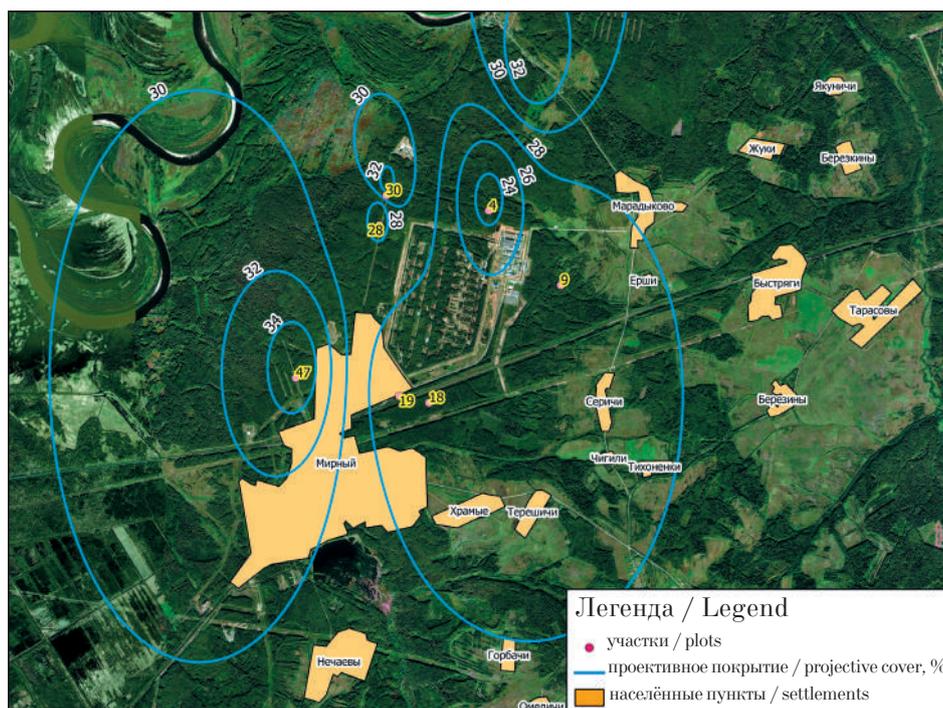


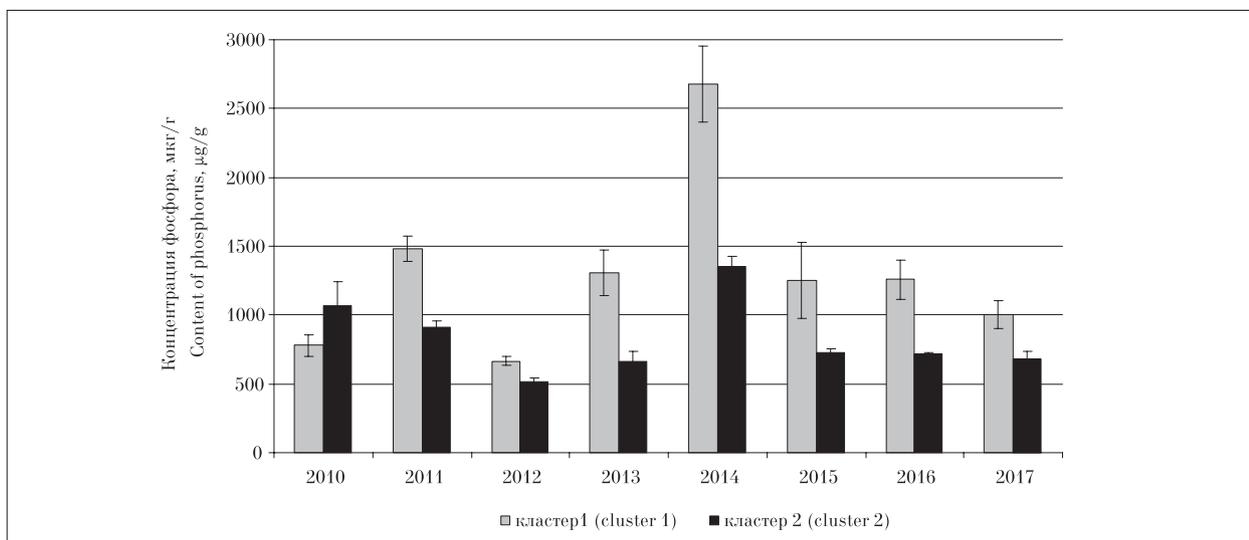
Рис. 2. Сходство участков мониторинга по среднемулетним данным содержания фосфора в лишайниках  
Fig. 2. Cluster diagram of similarity of monitoring sites according to long-term average data of phosphorus content in lichens



**Рис. 1.** Среднегодовое содержание фосфора, мкг/г на участках  
 вблизи объекта уничтожения химического оружия на цветную вкладку  
**Fig. 1.** The long-term average phosphorus content,  $\mu\text{g/g}$  in areas near  
 the chemical weapons destruction facility



**Рис. 4.** Среднегодовое проективное покрытие лишайников (%) на участках  
 вблизи объекта уничтожения химического оружия цветная вкладка  
**Fig. 4.** The average long-term projective cover of lichens (%) in areas near  
 the chemical weapons destruction facility



**Рис. 3.** Содержание фосфора в талломах *H. physodes*, отобранных на участках, относящихся к разным кластерам / **Fig. 3.** The phosphorus content in the thalli of *H. physodes*, selected in areas belonging to different clusters

**Таблица 3 / Table 3**

Общее проективное покрытие лишайникового покрова (%) на участках мониторинга  
Total projective cover of lichen cover (%) at monitoring sites

Год Year	Номер участка / Site number								
	4	9	18	19	28	30	34	47	112
2008	26	24	29	24	24	35	34	40	34
2009	26	29	29	26	23	29	37	37	37
2010	–	18	27	26	22	28	28	33	32
2011	29	34	22	31	33	39	41	37	41
2012	19	31	21	27	33	36	30	36	36
2013	19	32	22	29	31	35	34	36	40
2014	26	32	32	24	29	39	40	39	42
2015	21	30	37	26	31	40	41	38	37
2016	22	14	15	24	19	14	18	14	16
2017	–	–	28	35	–	–	36	42	47

Примечание: «–» нет данных.  
Note: “–” no data.

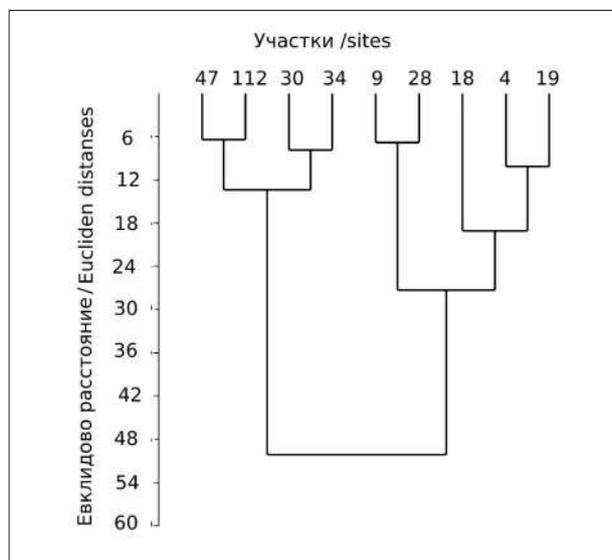
в 2014 г., возможно, это связано с наибольшим выбросом фосфорсодержащих соединений в ходе работы ОУХО. В последующие годы исследований (2015–2017 гг.) уровень фосфора в талломах лишайников, независимо от расположения участка наблюдений, снижался и продолжает снижаться по данным 2018–2019 гг. Известно, что лишайники – организмы с замедленным протеканием физиологических процессов. Можно предположить, что соединения фосфора, поглощённые лишайниками в период деятельности ОУХО, используются ими для обеспечения их жизнедеятельности и по настоящее время.

На участках мониторинга изучено общее проективное покрытие (ПП) лишайникового

покрова (табл. 3). Сравнение данных по ПП за 2008–2017 гг. позволяет заключить, что этот показатель находится в пределах средних значений по участку за период наблюдений. Среднее значение общего ПП было в пределах 24–41%, что в целом соответствует значениям, полученным при фоновом обследовании.

Выявлена тенденция увеличения ПП лишайникового покрова по мере удаления от ОУХО. В период наблюдений повышенное значение ПП лишайниками отмечали на участках максимально удалённых от ОУХО. Самое высокое значение ПП отмечено на фоновом участке 112.

На основе многолетних данных построена карта-схема ПП эпифитными лишайниками

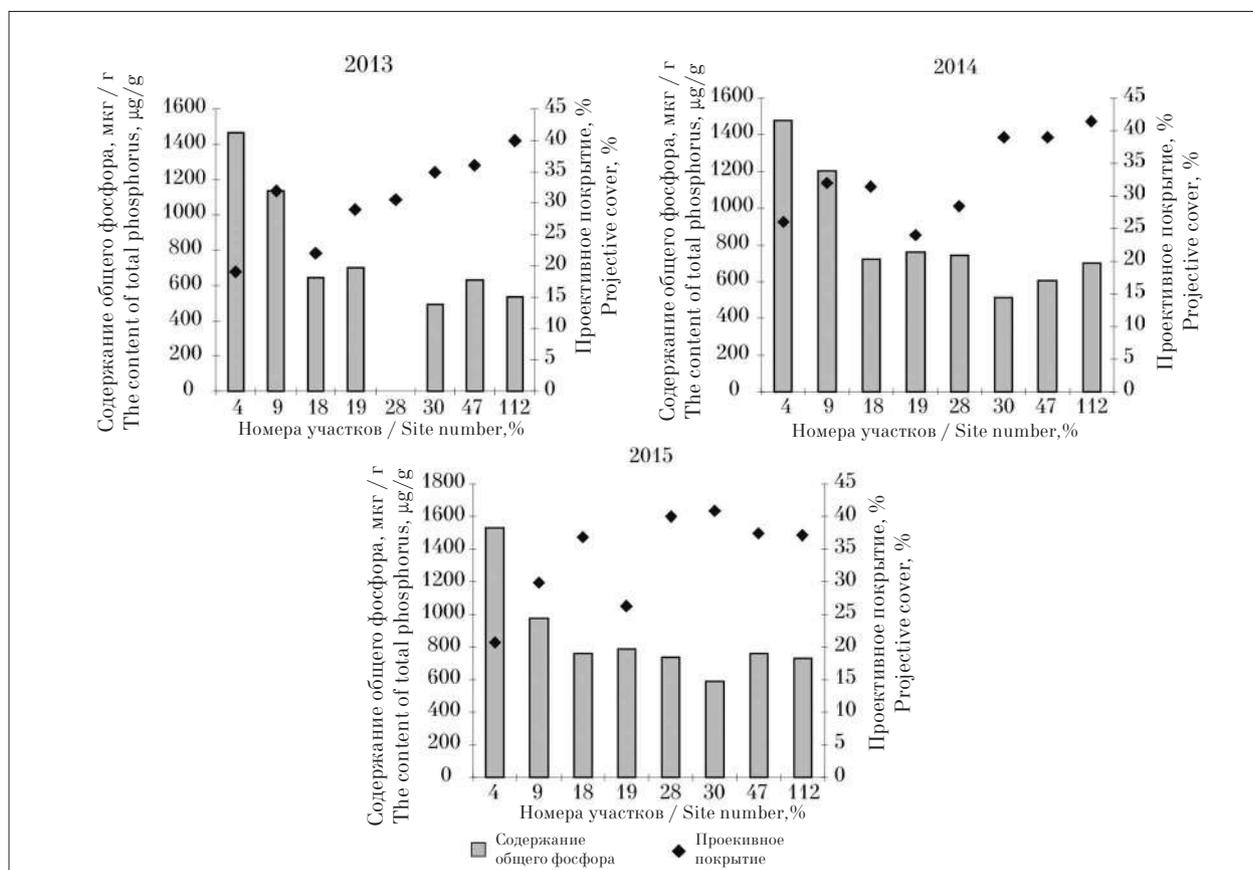


**Рис. 5.** Сходство участков пробоотбора по среднегодовым данным проективного покрытия лишайников  
**Fig. 5.** Site similarity according to long-term average data of projective cover of lichens

на участках мониторинга (рис. 4, см. цв. вкладку). На карте-схеме выделяется область с низкими значениями ПП – участки 4, 9, 18, 19, 28.

На основании кластерного анализа данных по ПП можно выделить 2 кластера (рис. 5). К первому кластеру относятся участки 30, 34 и 47. На этих участках ПП было значительно выше, чем на других участках. Исключение составляет 2016 г., когда ПП лишайников на этих участках было несколько ниже, чем на остальных. Ко второму кластеру, который характеризуется меньшими значениями ПП, относятся участки: 4, 9, 18, 19, 28. Низкие значения ПП (менее 30%) могут быть обусловлены особенностями фитоценозов (видовой состав растений, освещённость, сомкнутость крон и др.), а также состоянием атмосферного воздуха в районе деятельности ОУХО. Участки 4 и 9, которые обособлены в кластер 2, находятся ближе остальных к ОУХО, а также расположены с подветренной стороны.

Проведено изучение зависимости между показателями состояния эпифитной лишайной биоты в районе исследования: ПП и содержание общего фосфора. По данным 2013–2015 гг. выявлена корреляция между показателями ПП и содержанием общего фосфора в лишайниках на участках, расположенных на разном удалении от ОУХО (рис. 6). Корреляция меж-



**Рис. 6.** Содержание общего фосфора и проективное покрытие лишайников на участках мониторинга (2013–2015 гг.) / **Fig. 6.** The content of total phosphorus and the projective coverage of lichens in monitoring sites (2013–2015)

ду изученными показателями за 2014 г. составляет  $-0,56$ , (зависимость достоверна при  $p < 0,15$ ), за 2013 г.  $-0,64$  (зависимость достоверна при  $p < 0,1$ ), за 2015 г.  $-0,79$  (зависимость достоверна при  $p < 0,1$ ).

В 2013–2015 гг. на участках, расположенных с подветренной стороны от ОУХО, отмечено снижение ПП лишайниками и увеличение содержания общего фосфора в талломах. Вероятно, при функционировании ОУХО происходило попадание фосфорсодержащих соединений в атмосферный воздух, что негативно сказывалось на жизнедеятельности лишайников и вызывало сокращение площади ПП. В другие годы исследования зависимости между изучаемыми показателями не выявлено.

### Заключение

Таким образом, с 2010 г. по настоящее время изучается состояние эпифитной лишенобиоты в районе функционирования ОУХО и в период ликвидации последствий его деятельности в Кировской области. На основе многолетних данных выявлены зоны повышенного накопления соединений фосфора в талломах лишайников, расположенные с подветренной стороны от источника загрязнения. С 2011 по 2015 гг. прослеживается закономерное повышенное содержание соединений фосфора в лишайниках, отобранных на участках вблизи ОУХО. Установлено, что величина ПП лишайниками максимальна на участках, наиболее удалённых от ОУХО.

Выявлена отрицательная корреляция между изученными показателями лишеноиндикации: по мере приближения к ОУХО происходит снижение ПП и повышенное, в сравнении с фоном, накопление соединений фосфора. Данная зависимость свидетельствует о влиянии объекта «Марадыковский» на состояние эпифитной лишенобиоты, которое особенно проявилось в 2013–2015 гг. Выявленная зависимость, показанная разными методами лишеноиндикации, позволяет рекомендовать их применение для диагностики загрязнения атмосферы соединениями фосфора.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.*

### References

1. Kapashin V.P., Kholstov V.I., Kondratiev V.B. 20 years since the adoption of the federal target program “Destruction of chemical weapons stocks in the Russian Federation” // *Theoretical and Applied Ecology*. 2016. No. 4. P. 6–11 (in Russian).
2. Ashikhmina T.Ya. Integrated environmental monitoring of chemical weapons storage and destruction facilities. Kirov: Vyatka, 2002. 544 p. (in Russian).
3. Lishtva A.V. Lichenology. Irkutsk: Izd-vo Irkut. gos. un-ta, 2007. 121 p. (in Russian).
4. Byazrov L.G. Lichens in environmental monitoring. Moskva: Nauchnyy mir, 2002. 336 p. (in Russian).
5. Meysurova A.F., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. Toxic effect of nitrogen and sulfur dioxides on the chemical composition of *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.: IR spectroscopic analysis // *Contemporary Problems of Ecology*. 2011. V. 4. No. 2. P. 186–194. doi: 10.1134/S199542551102010X
6. Mikhailova I.N., Vorobeichik E.L. Dimensional and age structure of populations of epiphytic lichen *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. under conditions of atmospheric pollution // *Russian Journal of Ecology*. 1999. V. 30. No. 2. P. 111–118.
7. Golovko T.K., Shelyakin M.A., Zakhozhiy I.G., Tabalenkova G.N., Pystina T.N. Reaction of lichens to environmental pollution during mining of bauxite ore in the taiga zone // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 2. P. 44–52 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-044/2-053/1
8. Hauck M., Zöller T. Copper sensitivity of soredia of the epiphytic lichen *Hypogymnia physodes* // *Lichenologist*. 2003. No. 35 (3). P. 271–274. doi: 10.1016/S0024-2829(03)00023-9
9. Klos A., Ziembik Z., Rajfur M., Dolhanczuk-Srodka A., Bochenek Z., Bjerke J.W., Tommervik H., Zagajewski B., Ziokowski D., Jerz D., Zielinska M., Krems P., Godyn P., Marciniak M., Swisłowski P. Using moss and lichens in biomonitoring of heavy-metal contamination of forest areas in southern and north-eastern Poland // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 627. P. 438–449. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.211
10. Saitova Z.R., Farkhutdinov R.G. Physiological and biochemical parameters of lichen *Physcia stellaris* Nyl. in an industrial city // *Lichens: from molecules to ecosystems: Programma i tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii*. Syktyvkar, 2019. P. 74–75. doi: 10.31140/book-2019-04
11. Gorshkov V.V. The effect of atmospheric pollution by sulfur oxides on the epiphytic lichen cover of northern taiga pine forests // *Forest ecosystems and atmospheric pollution*. Leningrad: Nauka, 1990. P. 144–159 (in Russian).
12. Golubkova N.S., Malysheva N.V. The impact of urban growth on lichens and lichen indication of air

- pollution in Kazan // *Botanicheskiy zhurnal*. 1978. V. 63. No. 8. P. 1145–1154 (in Russian).
13. Bennett J.P., Dibben M.J., Lyman K.J. Element concentration in the lichen *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. after 3 years of transplanting along lake Michigan // *Environmental and experimental botany*. 1996. V. 36. No. 3. P. 255–270. doi: 10.1016/0098-8472(96)01022-2
14. Purvis O.W., Longden J., Shaw G., Chimonides P.D.J., Jeffries T.E., Jones G.C., Mikhailova I.N., Williamson B.J. Biogeochemical signatures in the lichen *Hypogymnia physodes* in the mid Urals // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. V. 90. P. 151–162. doi: 10.1016/j.jenvrad.2006.06.008
15. Rusu A.-M., Jones G.C., Chimonides P.D.J., Purvis O.W. Biomonitoring using the lichen *Hypogymnia physodes* and bark samples near Zlatna, Romania immediately following closure of a copper ore-processing plant // *Environmental Pollution*. 2006. V. 143. P. 81–88. doi: 10.1016/j.envpol.2005.11.002
16. Bergamaschi L., Rizzio E., Giaveri G., Loppi S., Gallorini M. Comparison between the accumulation capacity of four lichen species transplanted to a urban site // *Environmental Pollution*. 2007. No. 148. P. 468–476. doi: 10.1016/j.envpol.2006.12.003
17. Vyugovsky A.A. Assessment of territory pollution in the places of destruction of chemical weapons by the method of lichen indication: Avtoreferat.... kand. biol. nauk. Bryansk, 2010. 18 p. (in Russian).
18. Sukhareva T.A. Elemental composition of the thalli of the lichen *Cladonia stellaris* under atmospheric pollution // *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2016. No. 4. P. 70–82 (in Russian). doi: 10.17076/eco259
19. Domnina E.A., Ogorodnikova S.Yu. Phosphorus content in biological objects in the area of the Maradykovsky chemical weapons storage and destruction facility // *Fundamental and Applied Biomorphology in Botanical and Environmental Studies: Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Kirov: OOO “Raduga-Press”, 2014. P. 319–322 (in Russian).
20. Kauppi M. The influence of nitrogen-rich pollution components on lichens // *Acta Univ. Ouluen*. 1980. No. 101. Ser. A, Biologica. No. 9. 25 p.
21. Gorbach N.V., Getko N.V. The content of sulfate ions in lichens as an indicator of air pollution by sulfur compounds // *Lichenindication of the state of the environment*. Tallin: Izd-vo AN ESSR, 1978. P. 82–86 (in Russian).
22. Soldatenkova Yu.P. Some data on the composition of ash elements in *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. // *Lichenindication of the state of the environment*. Tallin: Izd-vo AN ESSR, 1978. P. 98–102 (in Russian).
23. Pavlova A.I. Analysis of methods for interpolating point heights to create digital elevation models // *Avtometriya*. 2017. V. 53. No. 2. P. 86–94 (in Russian). doi: 10.15372/AUT20170210