

DOI 10.17516/1997-1389-0377

УДК 630*632.15

The Content of Phosphorus in the Needles of *Pinus sylvestris* L. Affected by Industrial Air Pollution

Svetlana Yu. Ogorodnikova^{*a},

Elena A. Domnina^{a, b} and Sergey V. Pestov^{a, b}

^a*Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch RAS
Syktyvkar, Russian Federation*

^b*Vyatka State University
Kirov, Russian Federation*

Received 17.03.2021, received in revised form 12.03.2022, accepted 14.03.2022

Abstract. A facility for disposal of toxic substances had been functioning in Kirov Oblast between 2006 and 2015. Destruction of phosphorus-containing substances resulted in formation of inorganic phosphorus compounds, which could enter the environment as components of gaseous emissions. The aim of the present work was to study the spatial patterns of accumulation of phosphorus compounds in the needles of *Pinus sylvestris* L. in the production area. The study was carried out at monitoring sites, which were represented by forest communities (southern taiga subzone) located at different distances from the pollution source (0.96–9.63 km). The total phosphorus in second-year pine needles was determined by the spectrophotometric method. During the research period (2011–2017), total phosphorus in the needles of *P. sylvestris* varied between 730 and 2229 µg/g. Based on results of cluster analysis, the sites were classified into two groups, which differed in levels of phosphorus accumulation in the needles of *P. sylvestris*. The first group included sites with increased accumulation of total phosphorus in pine needles, which were located near the source of pollution in the direction of the prevailing winds. In sites belonging to the second group, the needles contained reduced amounts of phosphorus compounds. During the research period, variations in the amount of phosphorus in pine needles followed a similar pattern. From 2011 to 2016, the accumulation of phosphorus in the needles increased at monitoring sites of both groups. A decrease in total phosphorus in needles in 2017 was caused by a decrease in the release of phosphorus compounds to the environment and the involvement of accumulated phosphorus in the life processes of *P. sylvestris*. The increased accumulation of phosphorus compounds in needles in the sites near the source of air pollution was not favorable for vital processes of *P. sylvestris* needles and

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: svetao_05@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8865-4743 (Ogorodnikova S.); 0000-0002-5063-8606 (Domnina E.); 0000-0003-4454-677X (Pestov S.)

resulted in a reduction in their lifespan. Thus, the needles of *P. sylvestris* can be used as an accumulative indicator in areas affected by industrial air pollution by phosphorus compounds.

Keywords: *Pinus sylvestris*, needles, air pollution, phosphorus accumulation.

Acknowledgements. The work was carried out according to the state order of the Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, on the topic «Structure and state of the components of technogenic ecosystems in the southern taiga subzone» № FUUU-2022-0069.

Citation: Ogorodnikova S. Yu., Domnina E. A., Pestov S. V. The content of phosphorus in the needles of *Pinus sylvestris* L. affected by industrial air pollution. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(1), 107–119. DOI: 10.17516/1997-1389-0377

Содержание фосфора в хвое *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения

С. Ю. Огородникова^а, Е. А. Домнина^{а, б}, С. В. Пестов^{а, б}

^аИнститут биологии Коми
научного центра Уральского отделения РАН

Российская Федерация, Сыктывкар

^бВятский государственный университет

Российская Федерация, Киров

Аннотация. На территории Кировской области в 2006–2016 гг. функционировал объект по уничтожению отравляющих веществ. В процессе деструкции фосфорсодержащих веществ образуются неорганические соединения фосфора, которые могли поступать в окружающую среду в составе газообразных выбросов. Целью работы было изучить пространственные закономерности накопления соединений фосфора в хвое сосны обыкновенной в районе функционирования производства. Исследования проводили на участках мониторинга, которые представлены лесными фитоценозами (подзона южной тайги) и расположены на разном удалении от источника загрязнения (0,96–9,63 км). Спектрофотометрическим методом определено содержание общего фосфора в хвое сосны второго года жизни. За период наблюдений (2011–2017 гг.) содержание общего фосфора в хвое *P. sylvestris* изменялось в диапазоне 730–2229 мкг/г. По результатам проведенного кластерного анализа были выделены две группы участков, которые различаются по особенностям накопления фосфора в хвое *P. sylvestris*. В первую группу входят участки с повышенным накоплением общего фосфора в хвое сосны, они расположены вблизи источника загрязнения в направлении господствующих ветров. На участках, относящихся ко второй группе, установлено пониженное содержание соединений фосфора в хвое. За период исследований выявлена сходная динамика изменения количества фосфора в хвое сосны. С 2011 по 2016 г. накопление фосфора в хвое возрастало на участках мониторинга, относящихся к разным группам. Снижение уровня общего фосфора в хвое в 2017 г. обусловлено уменьшением поступления

соединений фосфора в окружающую среду и вовлечением накопленного фосфора в процессы жизнедеятельности *P. sylvestris*. Повышенное накопление соединений фосфора в хвое на участках вблизи источника загрязнения воздуха не оказывало положительного действия на процессы жизнедеятельности и сопровождалось снижением продолжительности жизни хвои *P. sylvestris*. Таким образом, хвоя *P. sylvestris* может использоваться в качестве аккумулятивного индикатора в условиях аэротехногенного загрязнения соединениями фосфора.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris*, хвоя, загрязнение воздуха, накопление фосфора.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги» № FUUU-2022-0069.

Цитирование: Огородникова, С. Ю. Содержание фосфора в хвое *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения / С. Ю. Огородникова, Е. А. Домнина, С. В. Пестов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(1). С. 107–119. DOI: 10.17516/1997-1389-0377

Введение

Хозяйственная деятельность человека приводит к поступлению в окружающую среду разнообразных поллютантов. На территории Кировской области с 2006 по 2015 г. функционировал объект по уничтожению химического оружия «Марадыковский». Всего за период эксплуатации объекта было уничтожено около 7000 т отравляющих веществ, большая часть которых фосфорорганические отравляющие вещества (Горохов, 2007). В процессе утилизации фосфорсодержащих отравляющих веществ образуются неорганические соединения фосфора (пирофосфат натрия, оксид фосфора, фосфат калия и фосфат кальция), которые могли поступать в окружающую среду в составе газообразных выбросов (Ашихмина, 2002).

Важным объектом для оценки состояния лесов в Кировской области служит сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Это связано с широким ареалом, важной экологической ролью и хозяйственным значением. В Кировской области *P. sylvestris* является одной из основных лесообразующих пород, произрастает

повсеместно, включая подзоны средней, южной тайги и хвойно-широколиственных лесов (Леса Кировской области, 2008).

Сосна обыкновенная – удобный объект в мониторинговых исследованиях, что обусловлено ее широкой экологической амплитудой, разнообразными реакциями в ответ на химическое воздействие на всех этапах онтогенеза, а также высокой чувствительностью к антропогенным воздействиям, включая атмосферное загрязнение (Черненкоова, 2002; Mikhailova et al., 2020).

Поступление химических элементов в растения происходит несколькими путями: корневое питание (основной путь), газообмен, обменная адсорбция на поверхности листовой пластинки. Хвоя сосны обыкновенной благодаря особенностям поверхности, положения в кроне, текстуры и возраста листовых пластин хорошо сорбирует твердые взвешенные частицы. Известно, что сосна обыкновенная обладает очень высокой пылезадерживающей способностью, превышающей в 10–15 раз другие древесные породы (Черненкоова, 2002).

Хвоя сосны является часто используемым объектом экологического мониторинга. Для оценки влияния промышленных выбросов на состояние сосны обыкновенной используют показатели химического состава ассимиляционных органов, которые отличаются чувствительностью к изменению условий обитания (Dmuchowski, Bytnerowicz, 1995; Михайлова и др., 2003; Афанасьева и др., 2004; Torlopova, Robakidze, 2012; Mikhailova et al., 2020). Показано увеличение содержания фосфорных соединений в хвое сосны обыкновенной вблизи источников аэротехногенного загрязнения в условиях Северо-Запада России (Теребова и др., 2008).

Фосфор служит важным питательным элементом для всех живых организмов (Corbridge, 2013). Низкое содержание фосфора лимитирует рост и развитие растений (Кизеев и др., 2009; Gilbert, 2009). Многолетние исследования в сосновых лесах Европы свидетельствуют о недостаточном количестве фосфора в почвах, что отражается в уменьшении накопления фосфора в хвое сосны (Prietzl, Stetter, 2010).

Целью работы было изучить пространственные закономерности накопления соединений фосфора в хвое сосны обыкновенной в районе функционирования объекта уничтожения фосфорсодержащих отравляющих веществ.

Объекты и методы

Исследования проводили в 2011–2017 гг. на территории Оричевского района Кировской области в районе размещения объекта по уничтожению химического оружия «Марадьковский». За период с 2006 по 2015 г. на данном предприятии было утилизировано около 7000 т отравляющих веществ. Технология утилизации фосфорорганических отравляющих веществ включала две стадии:

гидролиз и сжигание. Фосфорсодержащие поллютанты могли поступать в окружающую среду в составе газообразных выбросов.

В соответствии с ботанико-географическим делением Кировская область входит в состав Уральско-Западносибирской таежной провинции Евразийской хвойно-лесной области. На всей территории края зональной растительностью, соответствующей климату, являются таежные леса. Однако большая протяженность области с севера на юг определяет различие этих лесов. В растительном покрове области выделяются три подзоны: средней тайги, южной тайги и хвойно-широколиственных лесов. Район исследований находится в подзоне южной тайги. Главные лесообразующие породы в области из числа хвойных – ель и сосна.

Участки мониторинга представлены различными типами сосновых лесов, которые характеризуются разреженным древостоем (сомкнутость крон 0,3), деревьями возраста 60–90 лет и высотой от 18 до 28 м. Пробные площади находятся на разном удалении (0,96–9,63 км) от объекта уничтожения химического оружия (ОУХО). Фоновый участок расположен на расстоянии 9,63 км на юго-запад от источника загрязнения. На исследуемой территории преобладают западные, юго-западные и южные ветра. Характеристика участков исследования представлена в табл. 1.

Почвы района исследования являются подзолами, которые характеризуются низким накоплением соединений фосфора. За период с 2007 по 2014 г. содержание общего фосфора в почвах изменялось в пределах 10,6–34,4 мг/100 г. Приведенные значения соответствуют фоновым содержаниям общего фосфора на исследуемой территории и существенно ниже содержания общего фосфора в почвах Кировской области (Ашихмина

Таблица 1. Характеристика участков отбора проб хвои *P. sylvestris*Table 1. Characteristics of the sites for sampling *P. sylvestris* needles

Номер участка	Расстояние от источника загрязнения, км	Направление от источника загрязнения	Тип фитоценоза	Характеристики древостоя		
				возраст, лет	высота, м	формула
4	1,22	СЗ	березово-сосняк разнотравный	80	23	7СЗБ
8	1,63	В	сосняк зеленомошно-мертвопокровный	85	24	6СЗЕ1Б
16	1,49	Ю	сосняк бруснично-зеленомошный с вейником	80	25	7СЗБ1Е
19	1,49	Ю	сосняк зеленомошный	90	25	8С2Е
25	0,96	ЮЗ	сосново-березняк чернично-зеленомошный	70	20	6БЗСОс+Е
28	1,09	З	сосняк чернично-брусничный с вейником	90	28	8С1Б1Е
30	1,36	З	сосняк чернично-брусничный с вейником	85	25	7СЗБ
34	3,12	С	сосняк чернично-брусничный с вейником	90	28	5С5Б
46	2,71	ЮЗ	сосняк вейниково-брусничный	70	20	7СЗБ
65	3,86	ЮЗ	сосняк зеленомошно-мертвопокровный	60	18	8С1Б1Е
112	9,63	ЮЗ	сосняк бруснично-вейниковый	75	22	9С1Б

и др., 2016). По данным 2014 г., уровень подвижного фосфора в почвах на участках мониторинга не превышает 20 мг/кг, что характеризует почвы как очень бедные в отношении этого элемента питания растений (Ашихмина и др., 2015). В связи с низким содержанием подвижных соединений фосфора в почве атмосферная эмиссия служит одним из путей поступления и накопления фосфора в хвое *P. sylvestris*.

В качестве объекта изучения была выбрана хвоя *P. sylvestris* второго года жизни. В отличие от хвои первого года жизни хвоя последующих лет содержит меньшее количество соединений фосфора, что обусловлено физиологическими особенностями молодых активно растущих органов (Fife, Nambiar, 1984; Тюкавина, Кунников, 2015; Робакидзе

и др., 2020). Повышенное накопление соединений фосфора в хвое 2-го года жизни можно рассматривать как результат сорбции загрязняющих веществ из воздуха на протяжении 2 лет.

На каждом участке мониторинга отбирали хвою сосны второго года жизни из нижней части кроны 10–12 деревьев. Показано, что в ней накапливается большее количество поллютантов, что обусловлено переносом поверхностно-адсорбированных веществ осадками из верхней части кроны (Мартьянук, Ромашкевич, 1984).

Хвою, отобранную с разных деревьев на участке мониторинга, объединяли, из объединенной пробы отбирали три усредненные навески хвои, выполняли анализ хвои в двукратной аналитической

повторности. Химический анализ хвои проводили на базе научно-исследовательской экоаналитической лаборатории Вятского государственного университета (аттестат аккредитации № RA.RU. 518374). Хвою высушивали до воздушно-сухого состояния. Содержание фосфора в хвое определяли по ГОСТ 26657–97. В муфельной печи проводили минерализацию проб хвои при температуре 525 °С. В результате сухого озоления соединения фосфора, содержащиеся в составе хвои, переходят в фосфаты. Количество фосфатов в золе хвои определяли фотометрически на спектрофотометре UNICO 2800 (США). Рассчитывали содержание фосфора в хвое в мкг/г сухой массы. В таблицах представлены средние арифметические значения и стандартные ошибки. Обработку массивов полученных данных измерений и статистический анализ проводили с использованием стандартного пакета Microsoft Office Excel и Past 2.18.

Карту распределения концентрации общего фосфора в хвое сосны строили в программе QGIS2.18. Для интерполяции данных использовали метод обратных взвешенных расстояний (IDW) (Pavlova, 2017). Роза ветров построена для метеостанции Котельнич по данным монографии (Переведенцев и др., 2010).

Результаты и обсуждение

Изучено содержание общего фосфора в хвое *P. sylvestris* на участках, расположенных на разном удалении от источника аэротехногенного загрязнения – объекта уничтожения химического оружия (табл. 2). Накопление общего фосфора в хвое сосны за период исследований (2011–2017 гг.) варьировало в пределах 730–2229 мкг/г сухой массы (0,07–0,22 % от сухой массы), что вполне согласуется с данными других исследовате-

лей (Kurczyńska et al., 1997; Афанасьева и др., 2004; Ilg et al., 2009; Mikhailova et al., 2010; Тюкавина, Кунников, 2015). Среднее содержание общего фосфора в хвое сосны за годы исследований составило 1372 мкг/г (0,14 % от сухой массы). Обеспеченность хвои фосфором на исследуемой территории выше уровня дефицита, который для хвои первого года составляет 1,1–1,2 г/кг (1100–1200 мкг/г) (Sukhareva, 2012).

По результатам кластерного анализа выделяются две группы участков, которые различаются накоплением фосфора в хвое сосны обыкновенной (рис. 1).

Среднепогодное содержание общего фосфора в хвое *P. sylvestris* на участках первой группы (25, 46, 65, 112) варьировало в пределах 1028–1302 мкг/г сухой массы. Данные участки расположены на значительном удалении от источника загрязнения, а также в противоположной стороне от направления преобладающих ветров.

Ко второй группе относятся участки 4, 8, 16, 19, 28, 30, 34, они отличаются повышенным содержанием соединений фосфора в хвое сосны в годы исследований.

Повышенное накопление соединений фосфора в хвое сосны на участках, относящихся ко второй группе, может быть связано с поступлением фосфорсодержащих соединений в атмосферу в ходе функционирования ОУХО. Ранее показано, что в атмосферных осадках, отобранных на участках, расположенных в северном направлении от ОУХО, содержание соединений фосфора было выше по сравнению с фоновыми значениями (Шаров, 2019).

В условиях аэротехногенного загрязнения, по-видимому, накопление общего фосфора в хвое происходит за счет адсорбции взвешенных частиц на поверхности листовой пластинки. Это подтверждается данными

Таблица 2. Содержание общего фосфора (среднее \pm SE, n=3) в хвое *P. sylvestris* (мкг/г сухой массы), отобранной на участках мониторинга

Table 2. The content of total phosphorus (mean \pm SE, n=3) in *P. sylvestris* needles ($\mu\text{g} / \text{g}$ dry weight) sampled at the monitoring sites

Год	Номер участка										
	4	8	16	19	25	28	30	34	46	65	112
2011	1343 \pm 16	1053 \pm 11	1093 \pm 31	1100 \pm 123	1116 \pm 10	1369 \pm 78	1337 \pm 117	1167 \pm 47	1150 \pm 2	1122 \pm 107	1107 \pm 23
2012	1303 \pm 10	1385 \pm 8	1257 \pm 85	1464 \pm 86	1146 \pm 4	1369 \pm 37	1459 \pm 36	1246 \pm 156	932 \pm 13	756 \pm 87	730 \pm 17
2013	1426 \pm 58	1689 \pm 65	1421 \pm 74	1639 \pm 64	1022 \pm 74	1503 \pm 26	1506 \pm 58	1524 \pm 28	1395 \pm 29	927 \pm 63	1500 \pm 21
2014	1549 \pm 92	1472 \pm 58	1746 \pm 117	1559 \pm 128	982 \pm 47	1434 \pm 79	1658 \pm 89	1640 \pm 54	1330 \pm 74	1099 \pm 78	1528 \pm 207
2015	1673 \pm 148	1672 \pm 56	1490 \pm 254	1976 \pm 23	1320 \pm 75	1663 \pm 163	1615 \pm 105	1687 \pm 60	1264 \pm 22	1269 \pm 101	1535 \pm 53
2016	1796 \pm 71	1950 \pm 83	1694 \pm 41	1827 \pm 164	1353 \pm 162	1955 \pm 209	1651 \pm 26	1311 \pm 17	1393 \pm 73	1099 \pm 95	1518 \pm 72
2017	1386 \pm 106	2229 \pm 51	1719 \pm 111	1873 \pm 69	1316 \pm 37	1691 \pm 72	1668 \pm 81	1541 \pm 19	1450 \pm 202	927 \pm 14	1198 \pm 93

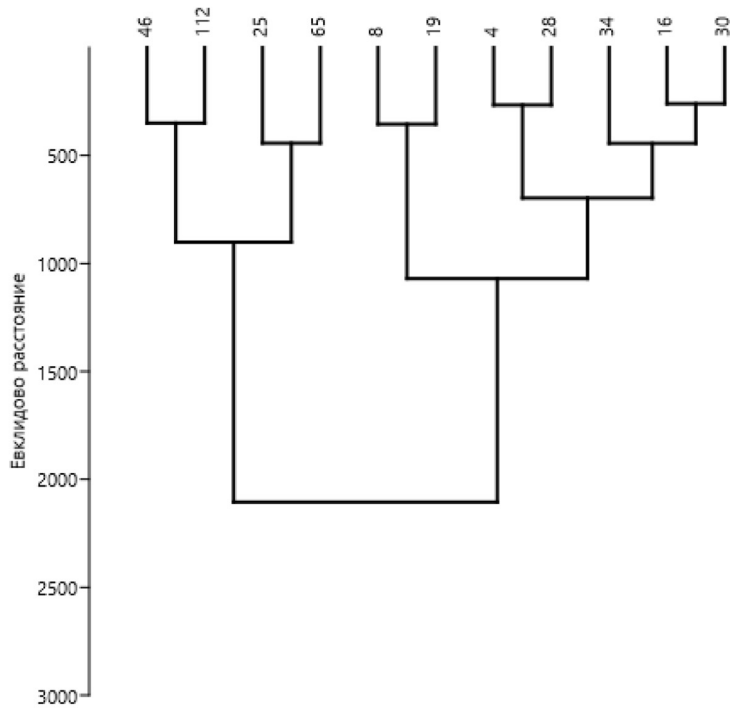


Рис. 1. Кластерная диаграмма сходства участков мониторинга по среднегодовым данным содержания общего фосфора в хвое *P. sylvestris*

Fig. 1. Cluster diagram of the similarity of the monitoring sites based on the long-term average data on the content of total phosphorus in the needles of *P. sylvestris*

по аккумуляции соединений фосфора талломами эпифитного лишайника *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. На основе многолетних данных выявлены зоны повышенного содержания общего фосфора в талломах лишайников, расположенные с северной стороны от ОУХО (Domnina et al., 2019).

На участках, расположенных в непосредственной близости от ОУХО, отмечено ухудшение санитарного состояния хвойных деревьев (усыхание и опадение хвои, оголение части веток). Наибольший процент поврежденной хвои был обнаружен на участках (4, 8, 19, 30, 34), находящихся в непосредственной близости от источника загрязнения и расположенных в северном и западном направлениях. На протяжении периода наблюдений (2011–2017 гг.) продолжительность жизни хвои сосны обыкновенной на этих участках

составляла 2–3 года, что меньше продолжительность жизни хвои в благоприятных условиях (3–5 лет) (Алексеев, 1990).

Сопоставление данных по содержанию соединений фосфора и продолжительности жизни хвои свидетельствует о том, что повышенное накопление фосфора не оказывает положительного влияния на жизнедеятельность хвои сосны. По-видимому, это обусловлено ингибирующим действием на *P. sylvestris* поллютантов, входящих в состав техногенных выбросов от ОУХО.

Отмечена сходная динамика изменения количества фосфора в хвое сосны по годам среди участков мониторинга (рис. 2). С 2011 по 2016 г. накопление фосфора в хвое возрастало на участках мониторинга, относящихся к разным группам. Для участков первой группы рост количества фосфора в хвое за-

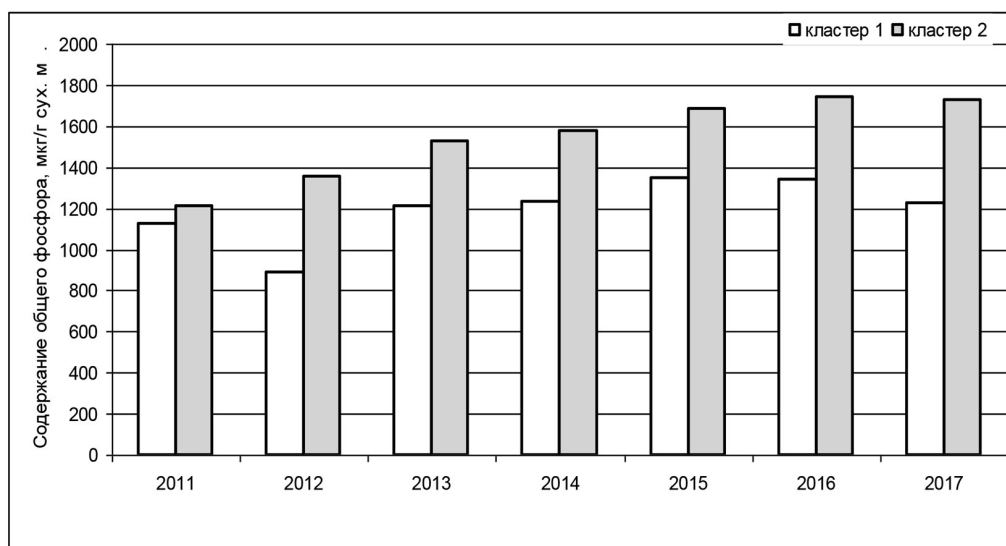


Рис. 2. Среднее содержание фосфора в хвое *P. sylvestris* на участках мониторинга, относящихся к разным кластерам

Fig. 2. Average phosphorus content in *P. sylvestris* needles at monitoring sites of different clusters

медлился с 2015 г. На участках второй группы содержание общего фосфора максимально возрастало в 2011–2016 гг., далее скорость накопления фосфора в хвое сосны снизилась. Возможно, это связано с уменьшением объемов поступления в атмосферный воздух фосфорсодержащих соединений от ОУХО. Ранее нами была выявлена сходная динамика накопления общего фосфора в талломах лишайников на участках, расположенных в непосредственной близости от ОУХО (Domnina et al., 2019).

Рост накопления соединений фосфора в хвое с 2011 по 2016 г. связан с поступлением соединений фосфора в окружающую среду в ходе функционирования ОУХО. Известно, что работы по уничтожению химического оружия были завершены в 2015 г. Снижение уровня общего фосфора в хвое в 2017 г. обусловлено уменьшением поступления соединений фосфора в окружающую среду и вовлечением накопленного фосфора в процессы жизнедеятельности *P. sylvestris*.

На основании проведенных исследований выявлена область с повышенным накоплением соединений фосфора в хвое сосны, которая расположена рядом с источником аэротехногенного загрязнения (1,1–1,6 км) и в направлении доминирующей составляющей розы ветров (на север от ОУХО) (рис. 3). Среднемноголетнее содержание общего фосфора в хвое *P. sylvestris* на данной территории составляло 1500 мкг/г. Расположение участков по направлению господствующих ветров, особенности фитоценозов (разреженный древостой, значительная высота деревьев), а также низкая обеспеченность почв фосфором способствуют аккумуляции соединений фосфора, поэтому содержание общего фосфора в хвое сосны здесь выше.

В западном направлении от ОУХО накопление фосфора в хвое сосны выражено в меньшей степени и не превышает 1300 мкг/г, что достоверно ниже по сравнению с территорией вблизи ОУХО.

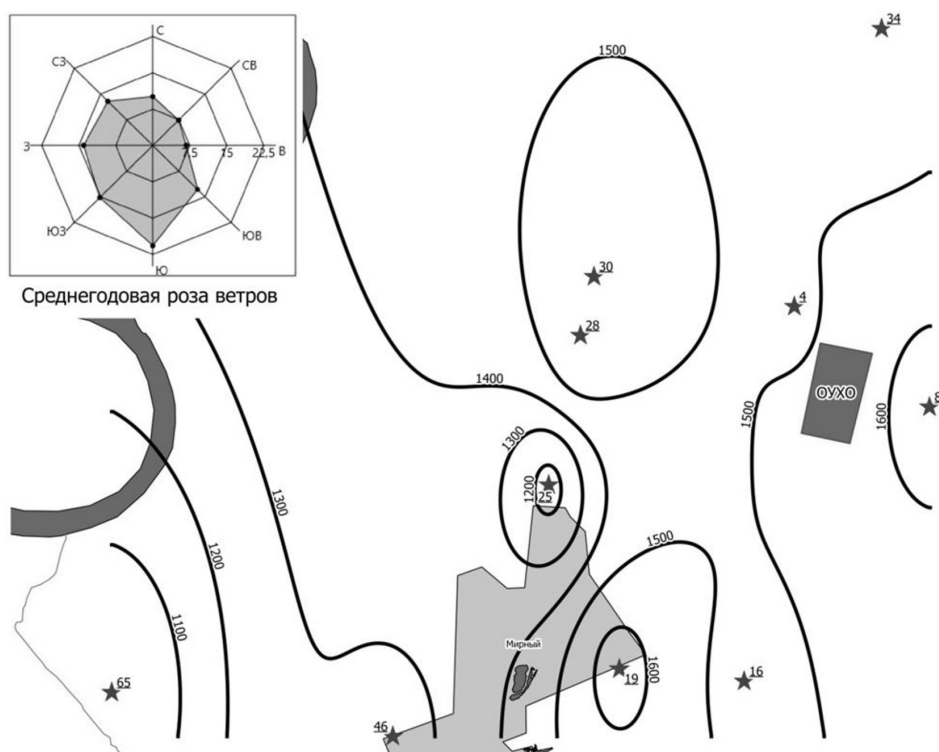


Рис. 3. Среднегодовое содержание фосфора ($\mu\text{г}/\text{г}$) в хвое *P. sylvestris* на участках мониторинга
 Fig. 3. Average long-term phosphorus content ($\mu\text{g}/\text{g}$) in the needles of *P. sylvestris* at the monitoring sites

Заключение

В результате проведенных исследований в районе функционирования ОУХО были выявлены зоны, характеризующиеся повышенным накоплением соединений фосфора в хвое сосны. Они расположены вблизи источника атмосферной эмиссии в направлении преобладающих ветров, дующих на север и северо-восток. Данные по накоплению фосфора в хвое *P. sylvestris* коррелируют с содержанием соединений фосфора в талломах эпифитного лишайника *H. physodes* и атмосферных

осадках, что свидетельствует об аэротехногенном загрязнении. Повышенное накопление соединений фосфора в хвое на участках вблизи источника загрязнения воздуха не оказывало положительного действия на процессы жизнедеятельности и сопровождалось снижением продолжительности жизни хвои *P. sylvestris*. На основании полученных данных можно заключить, что хвоя *P. sylvestris* может использоваться в качестве аккумулятивного индикатора в условиях аэротехногенного загрязнения соединениями фосфора.

Список литературы / References

Алексеев В. А. (1990) *Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение*. Л., Наука, Ленинградское отделение, 197 с. [Alekseev V. A. (1990) *Forest ecosystems and atmospheric pollution*. L., Nauka, Leningrad Branch, 197 p. (in Russian)]

Афанасьева Л. В., Кашин В. К., Плешанов А. С., Михайлова Т. А., Бережная Н. С. (2004) Элементный состав хвои и морфометрические параметры сосны обыкновенной в условиях ат-

мосферного промышленного загрязнения в Западном Забайкалье. *Хвойные бореальной зоны*, 2: 112–119 [Afanasyeva L. V., Kashin V. K., Pleshanov A. S., Mikhailova T. A., Berezhnaya N. S. (2004) Elemental composition of needles and morphometric parameters of Scots pine under atmospheric industrial pollution in Western Transbaikalia. *Conifers of the Boreal Zone* [Khvoinye boreal'noi zony], 2: 112–119 (in Russian)]

Ашихмина Т. Я. (2002) *Комплексный экологический мониторинг объектов хранения и уничтожения химического оружия*. Киров, Вятка, 544 с. [Ashikhmina T. Ya. (2002) *Integrated environmental monitoring of chemical weapons storage and destruction facilities*. Kirov, Vyatka, 544 p. (in Russian)]

Ашихмина Т. Я., Тимонов А. С., Кантор Г. Я., Пантелеева О. Г., Домнина Е. В., Дабах Е. В., Огородникова С. Ю., Новойдарский Ю. В., Титова В. А. (2015) Изучение воздействия объекта уничтожения химического оружия «Марадьковский» на состояние природных сред и объектов. *Теоретическая и прикладная экология*, 3: 88–95 [Ashikhmina T. Ya., Timonov A. S., Kantor G. Ya., Panteleeva O. G., Domnina E. V., Dabakh E. V., Ogorodnikova S. Yu., Novoydarskiy Yu. V., Titova V. A. (2015) Research of the impact of the chemical weapons decommission plant «Maradykovskiy» on the state of natural environment and its objects. *Theoretical and Applied Ecology* [Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya], 3: 88–95 (in Russian)]

Ашихмина Т. Я., Дабах Е. В., Тимонов А. С., Кардакова Е. М. (2016) Содержание соединений фосфора в почве на территории санитарно-защитной зоны и зоны защитных мероприятий объекта «Марадьковский». *Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем*. Киров, Радуга-Пресс, с. 51–55 [Ashikhmina T. Ya., Dabakh E. V., Timonov A. S., Kardakova E. M. (2016) The content of phosphorus compounds in the soil in the territory of the sanitary protection zone and the zone of protective measures of the Maradykovsky facility. *Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems*. Kirov, Raduga-Press, p. 51–55 (in Russian)]

Горохов Н. Г. (2007) Реализация программы уничтожения химического оружия в Кировской области. *Теоретическая и прикладная экология*, 2: 20–22 [Gorokhov N. G. (2007) Realization of Chemical Weapon Destruction in Kirov region. *Theoretical and Applied Ecology* [Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya], 2: 20–22 (in Russian)]

ГОСТ 26657–97 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания фосфора. Электронный ресурс: www.consultant.ru [GOST 26657–97 Feed, compound feed, compound feed raw materials. Methods for determining the phosphorus content. Online resource: www.consultant.ru (in Russian)]

Кизеев А. Н., Жиров В. К., Никанов А. Н. (2009) Влияние промышленных эмиссий предприятий Кольского полуострова на ассимиляционный аппарат сосны. *Экология человека*, 1: 9–14 [Kizeev A. N., Zhiron V. K., Nikanov A. N. (2009) Impact of industrial emissions of Kola peninsula enterprises on pine assimilatory apparatus. *Human Ecology* [Ekologiya cheloveka], 1: 9–14 (in Russian)]

Леса Кировской области (2008) Киров, ОАО «Кировская областная типография», 400 с. [*Forests of Kirov Oblast* (2008) Kirov, Kirov Oblast Printing House, 400 p. (in Russian)]

Мартынюк А. А., Ромашкевич Е. В. (1984) Особенности накопления серы в хвое сосны в условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами. *Труды ВНИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства*. Пушкино, с. 59–64 [Martynyuk A. A., Romashkevich E. V. (1984)

Peculiarities of sulfur accumulation in pine needles under conditions of air pollution by industrial emissions. *Proceedings of All-Russian Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization*. Pushkino, p. 59–64 (in Russian)]

Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Игнатъева О. В., Афанасьева Л. В. (2003) Изменение баланса элементов в хвое сосны обыкновенной при техногенном загрязнении. *Сибирский экологический журнал*, 10(6): 755–762 [Mikhailova T. A., Berezhnaya N. S., Ignatiyeva O. V., Afanasiyeva L. V. (2003) Elements balance alteration in the scots pine needles under air pollution. *Siberian Journal of Ecology* [Sibirskii ekologicheskii zhurnal], 6: 755–762 (in Russian)]

Переведенцев Ю. П., Френкель М. О., Шаймарданов М. З. (2010) *Современные изменения климатических условий и ресурсов Кировской области*. Казань, Казан. гос. ун-т, 242 с. [Perevedentsev Yu. P., Frenkel M. O., Shaimardanov M. Z. (2010) *Modern changes in climatic conditions and resources of Kirov Oblast*. Kazan, Kazan State University, 242 p. (in Russian)]

Робакидзе Е. А., Бобкова К. С., Наймушина С. И. (2020) Элементный состав доминирующих видов растений в среднетаежных сосняках разного возраста (на примере Республики Коми). *Растительные ресурсы*, 56(1): 53–65 [Robakidze E. A., Bobkova K. S., Naimushina S. I. (2020) Elemental composition of dominating plant species in different aged middle-taiga pine forests of the Republic of Komi. *Plant Resources* [Rastitelnye resursy], 56(1): 53–65 (in Russian)]

Теребова Е. Н., Сазонова Т. А., Галибина Н. А. (2008) Состояние хвои *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в условиях промышленного загрязнения (Костомукшский горно-обогатительный комбинат, Республика Карелия). *Растительные ресурсы*, 44(2): 56–68 [Terebova E. N., Sazonova T. A., Galibina N. A. (2008) *Pinus sylvestris* (Pinaceae) needles state under conditions of industrial pollution (Kostomuksha ore mining and processing enterprise, Republic of Karelia). *Plant Resources* [Rastitel'nyye resursy], 44(2): 56–68 (in Russian)]

Тюкавина О. Н., Кунников Ф. А. (2015) Содержание минеральных элементов в фитомассе сосны обыкновенной и в древесине тополя бальзамического в г. Архангельске. *Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки*, 3: 80–86 [Tyukavina O. N., Kunnikov F. A. (2015) The contents of mineral elements in the phytomass of scots pine and balsam poplar wood in Arkhangelsk. *Bulletin of Northern (Arctic) Federal University. Series: Natural Sciences* [Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye nauki], 3: 80–86 (in Russian)]

Черненкова Т. В. (2002) *Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение*. М., Наука, 191 с. [Chernenkova T. V. (2002) *Response of forest vegetation to industrial pollution*. Moscow, Nauka, 191 p. (in Russian)]

Шаров С. А. (2019) *Пути миграции, трансформации и аккумуляции загрязняющих веществ в окружающей среде в районе предприятия по уничтожению химического оружия и обоснование комплекса реабилитационных мероприятий*. Автореферат ... канд. хим. наук. Казань, КФУ, 16 с. [Sharov S. A. (2019) *Ways of migration, transformation and accumulation of pollutants in the environment in the area of a chemical weapons destruction facility and justification of a complex of rehabilitation measures*. Abstract ... cand. chem. sciences. Kazan, Kazan Federal University, 16 p. (in Russian)]

Corbridge D. E. C. (2013) *Phosphorus: Chemistry, Biochemistry and Technology*. New York, CRC Press, 1473 p.

Dmuchowski W., Bytnerowicz A. (1995) Monitoring environmental pollution in Poland by chemical analysis of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) needles. *Environmental Pollution*, 87(1): 87–104

Domnina E. A., Ogorodnikova S. Yu., Pestov S. V., Ashikhmina T. Ya. (2019) Lichenoidication methods for assessing atmospheric air pollution by phosphorus compounds. *Theoretical and Applied Ecology*, 4: 37–44

Fife D. N., Nambiar E. K. S. (1984) Movement of nutrients in radiata pine needles in relation to the growth of shoots. *Annals of Botany*, 54(3): 303–314

Gilbert N. (2009) The disappearing nutrient. *Nature*, 461(7265): 716–718

Ilg K., Wellbrock N., Lux W. (2009) Phosphorus supply and cycling at long-term forest monitoring sites in Germany. *European Journal of Forest Research*, 128(5): 483–492

Kurczyńska E. U., Dmuchowski W., Włoch W., Bytnerowicz A. (1997) The influence of air pollutants on needles and stems of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. *Environmental Pollution*, 98(3): 325–334

Mikhailova T. A., Kalugina O. V., Nesterenko O. I., Afanaseva L. V. (2010) Trends of chemical element content in needles of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under various natural conditions and emission load. *Contemporary Problems of Ecology*, 3(2): 173–179

Mikhailova T. A., Kalugina O. V., Shergina O. V. (2020) Monitoring of technogenic pollution and pine forests weakening. *Russian Journal of Forest Science*, 3: 265273

Pavlova A. I. (2017) Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53(2): 171–177

Prietzl J., Stetter U. (2010) Long-term trends of phosphorus nutrition and topsoil phosphorus stocks in unfertilized and fertilized Scots pine (*Pinus sylvestris*) stands at two sites in Southern Germany. *Forest Ecology and Management*, 259(6): 1141–1150

Sukhareva T. A. (2012) Elemental composition of the leaves of wood plants under the conditions of technogenic pollution. *Chemistry for Sustainable Development*, 3: 327–333

Torlopova N. V., Robakidze E. A. (2012) Chemical composition of pine needles under the influence of aerial technogenic pollution from the Syktyvkar Timber Industry Complex. *Contemporary Problems of Ecology*, 5(3): 307–313