

Элементный состав разновозрастной хвои сосны (*Pinus sylvestris* L.) в сосняках лишайниковых в условиях длительного аэротехногенного загрязнения выбросами АО «Сыктывкарский лесопромышленный комплекс»

Робакидзе Е. А.

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН
Сыктывкар, Россия
robakidze@ib.komisc.ru

Изложены результаты исследования влияния аэротехногенных выбросов целлюлозно-бумажного производства АО «Сыктывкарский лесопромышленный комплекс» (СЛПК) на элементный состав хвои сосны в сосняках лишайниковых, расположенных на разном расстоянии от источника загрязнения. Определено содержание калия, кальция, магния, фосфора, марганца, железа, натрия, алюминия, серы, азота и углерода. Проведен сравнительный анализ минерального состава разновозрастной хвои сосны в 1999 и 2019 гг. Выявлено, что возрастная динамика содержания большинства исследуемых элементов минерального питания для фонового района и зоны воздействия выбросов имеет общие тенденции. Суммарное содержание зольных элементов в пробах хвои всех четырех лет жизни в сосняках лишайниковых в 2019 году снизилось относительно 1999 года в среднем на 29 % на контрольных и на 23 % на загрязненных участках. В хвое сосны всех исследуемых сосняков среди минеральных элементов доминируют калий и кальций. Значительное участие в составе зольных элементов в хвое принимают фосфор и марганец. Массовая доля общей серы в хвое сосны характеризуется небольшой вариабельностью в 1999 и 2019 годах как для загрязненных, так и для фоновых участков – от 0,07 до 0,11 %. Отмечено уменьшение значений массовой доли азота в пробах хвои сосны в 2019 году в 1,2–1,3 раза на контрольной и опытной территории. Не наблюдается достоверных различий по содержанию углерода ни по возрасту хвои, ни по расположению пробных площадей от источника эмиссии.

Ключевые слова: сосна, химический мониторинг, целлюлозно-бумажное производство, аэротехногенное загрязнение, элементный состав, хвоя сосны.

ВВЕДЕНИЕ

Лесные экосистемы являются важным источником растительных ресурсов, используемых в промышленности, сельском хозяйстве, медицине, быту. Сосновые леса на территории Республики Коми занимают 7,2 млн. га и являются главным объектом лесопользования (Леса..., 1999). В связи с активным воздействием на окружающую среду техногенной деятельности человеческого сообщества очень важно исследовать роль химических компонентов биосферы, обеспечивающих процессы жизнедеятельности, в частности растений (Елин, 2001). Необходимым составляющим компонентом лесного мониторинга является химический мониторинг (Никонов и др., 1999). При оценке динамики развития фитоценозов и происходящих в них продукционных процессов представляет интерес изучение химического состава их компонентов (Ingestad, 1973; Helmisari, 1992; Tamminen, 2004).

Исследования содержания химических элементов в различных органах растений показали его высокую изменчивость в зависимости от вида и возраста растения, региональных климатических особенностей, сезонного развития и лесорастительных условий местопроизрастания (Митрофанов, 1977; Прокушкин, 1982; Морозова, 1991; Бобкова, 1993; Vagan et al., 1998; Дроздова, Алексеева-Попова, 2008; Сухарева, 2013; Сухарева, Лукина, 2014; Робакидзе, Торлопова, 2015 и др.).

Кроме климатических и биотических факторов, на химический состав растительных тканей оказывают воздействие разнообразные вещества-загрязнители выбросов промышленных производств. Хроническое загрязнение лесных экосистем газообразными

токсикантами и пылевыми выбросами, содержащими разнообразные соединения металлов, приводит к постепенному накоплению отдельных элементов в почве и в дальнейшем в органах растений (Чуваев, Кулагин, 1973; Бусько, 1995; Лукина, Никонов, 1996; Черненкова, 2002; Торлопова, Робакидзе, 2012).

Из всех органов растений листья являются самыми чувствительными к действию атмосферных загрязнителей (Гудериан, 1979). Это обусловлено устьичным газообменом листа с воздухом, благодаря которому токсиканты проникают внутрь (Илькун, 1978; Неверова, 2002). На европейском Северо-Востоке России основными поллютантами, загрязняющими воздух, являются предприятия целлюлозно-бумажного производства. В среднетаежной зоне Республики Коми крупнейшим источником промышленных выбросов в воздушный бассейн является целлюлозно-бумажный комбинат АО «Сыктывкарский ЛПК» (СЛПК), выпустивший первую продукцию – целлюлозу и картон в 1969 году. В конце 1980-х годов он вышел к освоению установленных мощностей. Его основными поллютантами являются оксиды углерода, азота, серы, сероводород, меркаптаны, сероорганические соединения, минеральная пыль, содержащая карбонаты и сульфиды кальция и натрия. Аэротехногенное загрязнение этими выбросами оказывает существенное влияние на лесные экосистемы (Торлопова, Робакидзе, 2003). По данным публичных экологических отчетов предприятия, суммарное количество выбросов в 1998 г. было 31 тыс. т, в 2006 – 20, в 2010 – 17, в 2015 – 10, в 2020 – 7,8 тыс. т (Экологические отчеты, 2006, 2009–2010, 2013–2015). Отмечается существенное снижение аэротехногенных выбросов, что связано с глубокой модернизацией очистных сооружений предприятия.

Цель настоящих исследований – оценить изменения элементного состава разновозрастной хвои сосны (*Pinus sylvestris*) за 20-летний период в условиях аэротехногенного загрязнения выбросами целлюлозно-бумажного производства в 1999 и 2019 годах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в среднетаежных сосняках лишайниковых (*Pinetum cladinosum*), расположенных на разном расстоянии от источника эмиссии загрязняющих веществ АО «СЛПК». Постоянные пробные площади (ППП) были заложены в 1998 – 2000 годах. Сосняки на фоновой территории (ППП 28, 29, 32) расположены на расстоянии от 51 до 66 км. Сосняки импактной территории (ППП 13, 14, 17) – на расстоянии от 7,3 до 11,2 км (рис. 1).

Исследуемые лишайниковые фитоценозы представлены вторичными разновозрастными древостоями, послерубочного и послепожарного происхождения. Они развиваются на боровых террасах на иллювиально-железистых подзолах. Древостои чистые по составу, сформированы сосной обыкновенной, невысокой продуктивности. Краткая характеристика древостоев приведена в таблице 1. Подлесок отсутствует. Куртинно расположенный по площади подрост различной густоты состоит в основном из сосны. Для оценки жизненного состояния древостоев рассчитывали индекс их поврежденности по формуле средневзвешенного класса повреждения составляющих древостой деревьев, предложенному В.А.Алексеевым (1989).

Слабо развитый травяно-кустарничковый ярус представлен брусникой (*Vaccinium vitis-idaea* L.), пятнами толокнянки обыкновенной (*Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng.), вереска обыкновенного (*Calluna vulgaris* (L.) Hill.) и осоки верещатниковой (*Carex ericetorum* Pall.). В мохово-лишайниковом покрове содоминируют лишайники *Cladonia rangiferina* (L.) Web., *C. stellaris* (Opiz) Brodo. и *C. sylvatica* (L.) Hoffm., пятнами мхи *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Polytrichum juniperinum* Hedw. и *P. commune* Hedw.

Для изучения химического состава растений была отобрана хвоя сосны 1–4 года жизни, которую разделили по годам. Сбор материала производился в четвертой декаде июля – начале августа в 1999 и 2019 годах. Образцы взяты у 10–12 деревьев на каждой ППП с южной

Элементный состав разновозрастной хвой сосны (*Pinus sylvestris* L.)
в сосняках лишайниковых в условиях длительного аэротехногенного загрязнения...

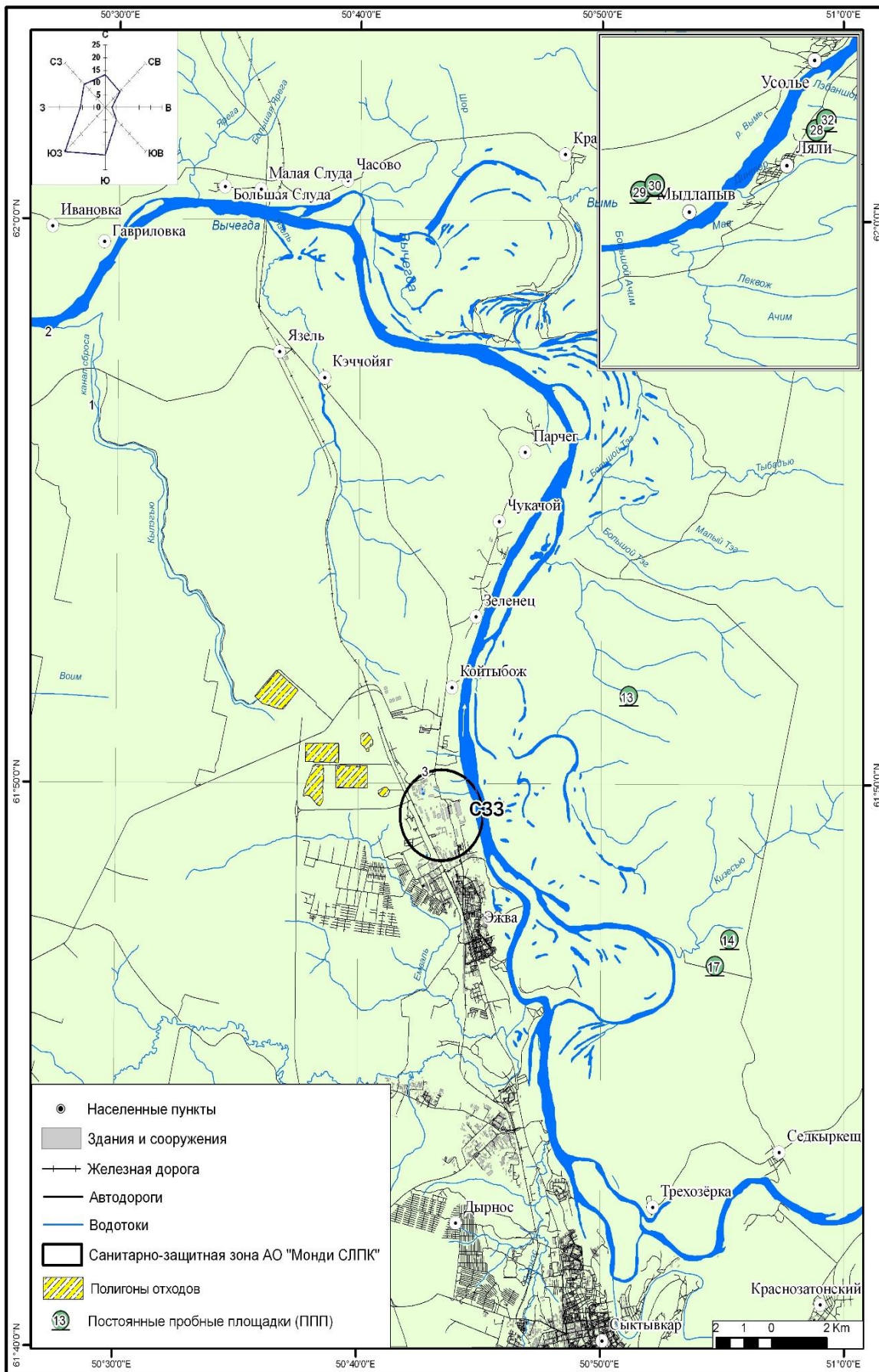


Рис. 1 (на предыдущей странице). Расположение постоянных пробных площадей на территории «Роза ветров» представлена из Атласа Республики Коми по климату и гидрологии (Атлас Республики..., 1997).

стороны из средней части кроны (Helmisari, 1992). Образцы высушивали до воздушно-сухого состояния и размалывали в электрической мельнице до порошкообразной массы (Родин и др., 1968).

На химический анализ отбирали один средний образец из 10-12 повторностей с каждой ППП. Химический анализ проводили только одной средней пробы с каждой ППП. Из средней пробы брали три аналитические повторности.

Химический анализ выполнен в аккредитованной экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511257 от 26 февраля 2014 г.) по аттестованным методикам количественного химического анализа. Валовое содержание элементов минерального питания (калий, кальций, магний, фосфор, марганец, железо, натрий, алюминий, сера) в растительных образцах определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (Спектрометр атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой Spectro Ciros^{ccd}, Германия). Общее содержание азота и углерода определяли методом газовой хроматографии на элементном анализаторе (EA 1110 (CHNS-O, Италия).

Статистическую обработку данных проводили, используя пакет программ Microsoft Excel 2019 (лицензия Института биологии Коми НЦ УрО РАН). Указаны средние арифметические значения и их стандартные ошибки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

За период наблюдений с 1998 по 2019 годы виталитетный спектр фоновых сосновых древостоев (51–66 км от источника загрязнения) существенно изменился в сторону улучшения. Доля участия здоровых деревьев достоверно увеличилась с $56 \pm 5,0$ % до $76 \pm 6,8$ %, доля деревьев I класса повреждения уменьшилась в 1,5 раза, а II класса повреждения – в 2 раза, свежий сухостой (класс IVa) отсутствует. Динамика индексов поврежденности древостоев сосняков лишайниковых за период исследований с 1998 по 2019 годы, показывает, что их состояние на загрязненной аэротехногенными выбросами территории улучшилось от среднеповрежденного до здорового, на фоновой территории – от слабоповрежденного до здорового (табл. 2) (Робакидзе, Бобкова, 2022).

Одновременно с оценкой состояния древостоев (Робакидзе, Бобкова, 2022) исследовали влияние техногенного загрязнения АО «СЛПК» на химический состав хвои сосны. Известно, что воздействие разнообразных веществ-загрязнителей промышленных производств, наряду с природными факторами, приводит к изменению химического состава растительных тканей (Сидорович и др., 1985; Бусько и др., 1995).

Суммарное содержание химических элементов в пробах хвои всех четырех лет жизни в сосняках лишайниковых в 2019 году снизилось относительно 1999 года в среднем на 29 % на контрольных и на 23 % на загрязненных участках. За весь период исследований не установлено достоверной зависимости суммарного содержания зольных химических элементов в пробах хвои от ее возраста, а также от расстояния до источника эмиссии (рис. 2).

В хвое сосны всех исследуемых сосняков среди минеральных элементов доминируют калий и кальций. Значительное участие в составе зольных элементов в хвое принимают фосфор и марганец. В 1999 году на фоновой территории доля калия составляла $39 \div 60$, кальция – $8 \div 14$, марганца – $8 \div 22$ %. Достаточно высокие значения приходятся на фосфор $7 \div 11$ %. В загрязненной зоне на долю калия приходится $33 \div 42$, кальция – от 15 до 18, марганца – $14 \div 23$ %. На фосфор приходится $9 \div 15$ %. В 2019 году на фоновых участках доля кальция значительно выше и составляла $19 \div 45$, калия $26 \div 53$, марганца – $5 \div 12$, фосфора – $8 \div 14$ %.

Таблица 1

Лесоводственно-таксационная характеристика древостоев исследуемых сосновых лесов
(Робакидзе, Бобкова, 2022)

Номер ППП (расстояние от СЛПК, км)	Состав древостоя	Год наблюдений	Возраст, лет	Число растущих деревьев, экз./га	Средние значения		Общий запас, м ³ /га
					Высота, м	Диаметр, см	
Сосновые леса в зоне действия выбросов АО «СЛПК»							
13 (7,3)	10С	2000	90–110	1180	16,9	16,2	200
		2010	102–122	992	17,0	19,0	231
		2019	111–131	912	17,0	20,0	229
14 (11,0)	10С	1998	60–100	980	15,3	16,1	196
		2010	72–122	992	19,0	19,0	258
		2019	81–131	1054	19,0	20,0	284
17 (11,2)	10С	1998	65–90	1530	16,0	14,7	206
		2010	72–102	1500	17,2	17,0	237
		2019	81–111	1175	19,0	20,0	273
Сосновые леса фонового района							
29 (51,0)	10С	1998	90–110	380	14,7	21,7	104
		2010	102–22	464	14,3	20,0	138
		2019	64–131	579	14,3	20,0	145
28 (56,0)	10С	1998	70–80	360	16,1	25,2	143
		2010	82–92	417	18,0	26,2	241
		2019	92–102	629	16,4	24,0	232
32 (66,0)	10С	1998	55–110	1245	13,3	15,8	193
		2015	70–125	1042	15,0	20,0	193
		2019	74–129	1083	14,0	18,0	177

Примечание к таблице. С – сосна обыкновенная.; ППП – постоянные пробные площади.

В импактной зоне доля кальция выше, чем в 1999 году и составляет 16÷40, калия – 28÷56, марганца – 6÷12 %. На фосфор приходится 8÷14 %.

Регрессионный анализ показал, что возрастная динамика значений массовой доли исследуемых элементов в хвое сосен, растущих на фоновой территории, с высокой степенью достоверности описывается логарифмической кривой (рис. 3, 4). С увеличением возраста хвой в ней достоверно уменьшается содержание калия, фосфора и магния. Наибольшие значения массовой доли этих элементов наблюдаются в однолетней хвое. Массовая доля кальция, марганца, алюминия и железа более высокая в хвое старших возрастов, что свидетельствует о незначительной подвижности этих элементов. Вместе с тем, в 1999 году были отмечены нарушения возрастной динамики содержания фосфора, магния, натрия и железа.

При техногенном воздействии загрязнение листьев растений происходит за счет поверхностного загрязнения, а также фолиарного и почвенного поглощения.

Таблица 2

Динамика индексов поврежденности сосновых древостоев в фоновом районе и в условиях загрязнения АО «СЛПК»

Год наблюдений	№ ППП и расстояние от АО «СЛПК», км					
	ППП 13 (7,3 км)	ППП 14 (11,0 км)	ППП 17 (11,2 км)	ППП 28 (56,0 км)	ППП 29 (51,0 км)	ППП 32 (66,0 км)
1998	1,99	1,13	1,2	0,59	0,77	0,64
2005	0,85	0,70	0,68	0,66	0,42	0,49
2010	0,47	0,39	0,28	0,29	0,36	0,22
2015	0,37	0,50	0,40	0,30	0,50	0,40
2019	0,40	0,47	0,39	0,33	0,47	0,38

Примечание к таблице. ППП – постоянные пробные площади.

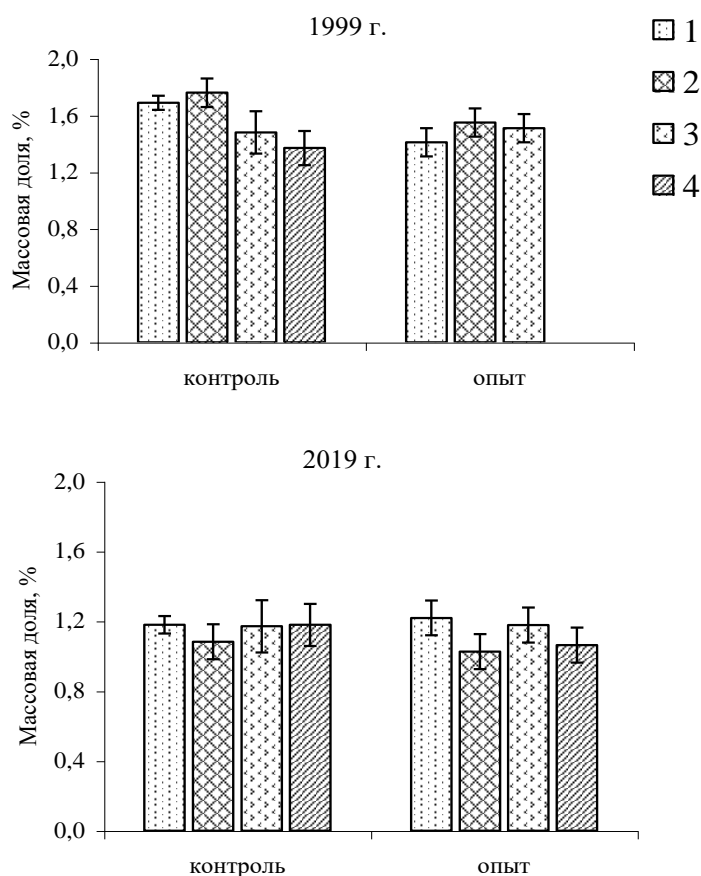


Рис. 2. Суммарное содержание зольных элементов в пробах хвои сосны разного возраста на фоновой (контроль) и загрязненной (опыт) территориях
1 – однолетняя хвоя, 2 – двухлетняя хвоя, 3 – трехлетняя хвоя, 4 – четырехлетняя хвоя.

Сравнительный анализ минерального состава хвои сосны, растущей в фоновом районе и зоне воздействия выбросов, показывает, что возрастная динамика содержания большинства исследуемых элементов имеет общие тенденции. Действительно, коэффициенты корреляции возрастной динамики содержания калия в хвое сосны фоновых и загрязненных участков составил в 1999 и 2019 годах соответственно 1,00 и 0,96, кальция – 0,87 и 0,95, фосфора – 0,55

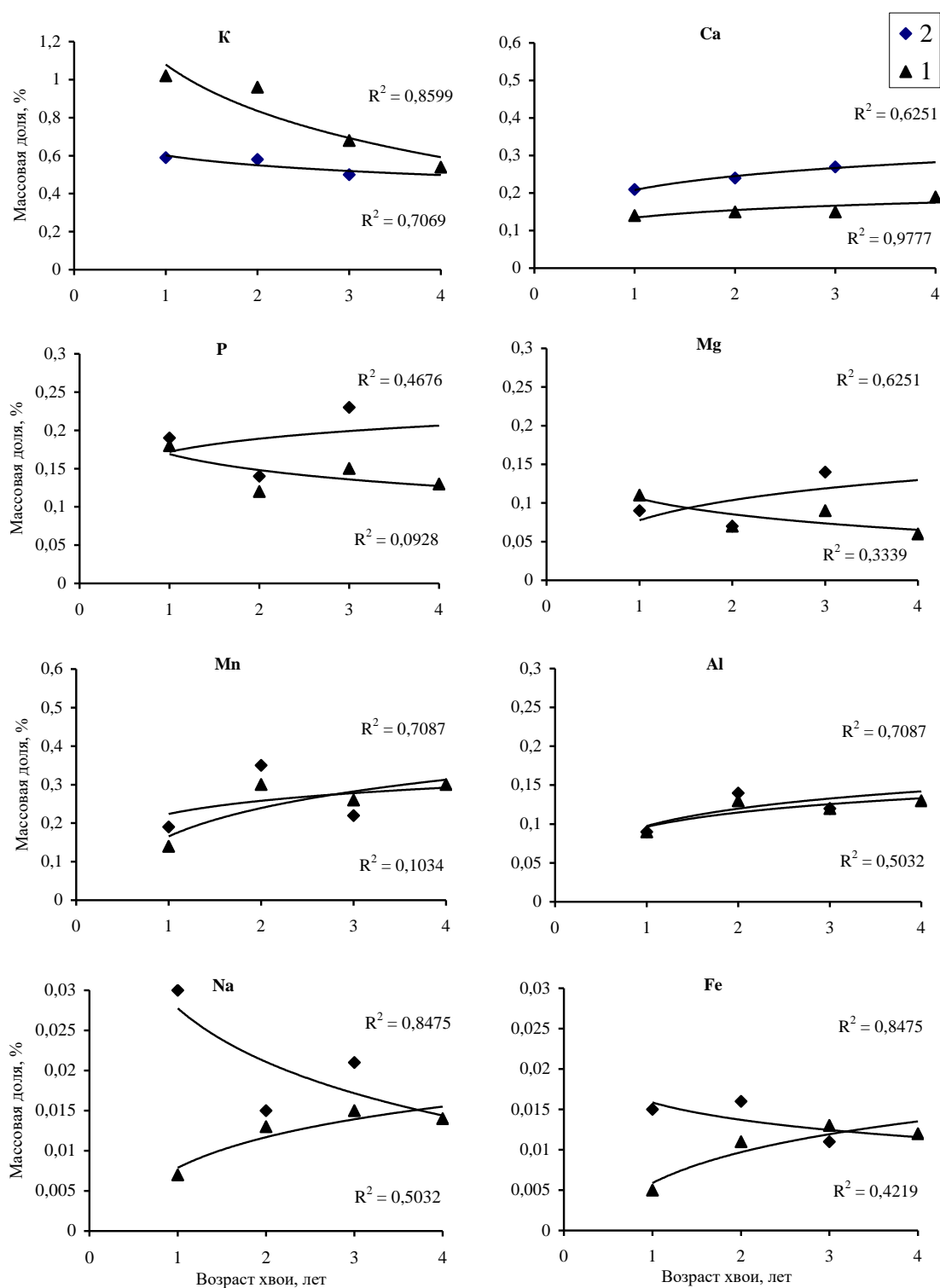


Рис. 3. Массовая доля элементов в сухом веществе хвои сосны в сосняках лишайниковых на фоновой и загрязненной территории в 1999 году

1 – логарифмический тренд данных фонового района; 2 – логарифмический тренд данных зоны воздействия выбросов; R^2 – в верхнем правом углу – аппроксимация тренда фонового, в нижнем правом углу – загрязненного участка.

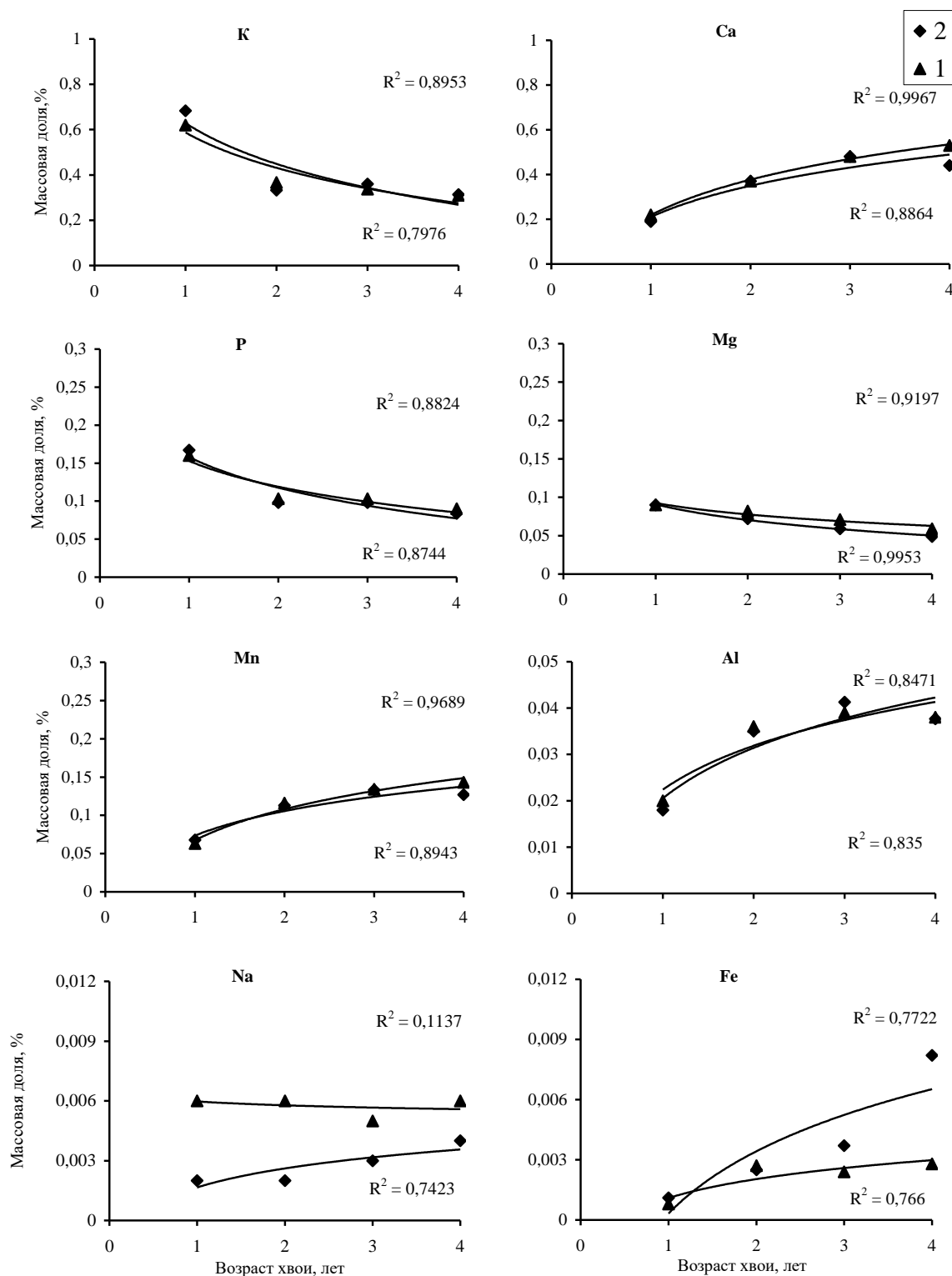


Рис. 4. Массовая доля элементов в сухом веществе хвои сосны в сосняках лишайниковых на фоновой и загрязненной территории в 2019 году
 1 – логарифмический тренд данных фонового района; 2 - логарифмический тренд данных зоны воздействия выбросов; R^2 – в верхнем правом углу – аппроксимация тренда фонового, в нижнем правом углу – загрязненного участка.

и 1,00, магния – 0,28 и 0,98, марганца – 0,81 и 0,98, алюминия – 0,99 и 0,99, железа – 0,54 и 0,67. Устойчивой корреляционной зависимости между значениями массовой доли натрия и возрастом хвой сосны за все годы исследований установлено не было.

В 1999 году среднее содержание калия в разновозрастной хвое сосны на загрязненных участках значительно (в 1,7 раза) меньше, особенно в хвое 1 и 2 года жизни (рис. 3). Видимо, это можно объяснить дефицитом воды в лишайниковых борах в отдельные периоды вегетации (Верхоланцева, 1963). Известно, что уменьшение содержания калия в хвое приводит к снижению ассимиляции CO_2 , нарушению развития сосудов и, в итоге, к пожелтению хвой (Веретенников, 1987). В 2019 году не отмечается достоверного уменьшения массовой доли калия в хвое всех возрастов в импактной зоне (рис. 4).

Увеличение в 1999 году в среднем в 1,6 раза концентрации кальция в хвое сосен на загрязненных участках (рис. 3) по Н. В. Лукиной и В. В. Никонову (1993) объясняется тем, что он активно связывает избытки органических кислот, которые интенсивно образуются в растении в условиях повышенного содержания в окружающей среде поллютантов. Значения массовой доли кальция в хвое сосны всех возрастов на загрязненных и фоновых ППП в 2019 году достоверно не отличаются.

В 1999 и 2019 годах значения массовой доли фосфора в хвое сосны древостоев на загрязненных и фоновых пробных площадях достоверно не отличаются. В 1999 году выявлена зависимость массовой доли фосфора и магния от возраста хвой на фоновой территории. В 2019 году было установлено, что массовая доля данных элементов также уменьшается с возрастом, а марганца и алюминия возрастает. Не выявлено различий между массовой долей марганца и алюминия в хвое всех возрастов фоновых и загрязненных участков как в 1999, так и в 2019 годах.

В 1999 году не наблюдалось четких изменений массовой доли натрия в зависимости от возраста хвой сосны. Вместе с тем надо отметить, что в хвое первого года, собранной в импактной зоне, содержание натрия было значительно (в 4,3 раза) выше. В 2019 году также не отмечено четких изменений массовой доли натрия в зависимости от возраста хвой сосны.

Отмечено более низкое содержание железа в пробах хвой в 2019 году относительно 1999 года. Достоверно установлены более высокие значения массовой доли железа в пробах хвой 3 и 4 года жизни на загрязненной территории только в 2019 году. Соотношение Fe : Mn в хвое рекомендуют использовать в качестве дополнительного индикационного признака при экологическом мониторинге техногенного загрязнения (Влияние..., 1990). Данные элементы минерального питания взаимосвязаны в процессе метаболизма: марганец участвует в белковом и азотном обмене, в процессе фотосинтеза, активирует многие ферменты, железо входит в состав ферментов, участвующих в образовании хлорофилла (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Соотношение Fe : Mn в листьях березы и хвое сосны в районе медно-никелевых производств в норме составляет 0,2–0,3, в условиях загрязнения – 4,5–5,0 (Брускина, Карабань, 1992). В листьях берез в различных эколого-геохимических условиях соотношение Fe : Mn постоянно 0,27–0,37 (Елпатьевский, Аржанова, 1985). В условиях аэротехногенного загрязнения целлюлозно-бумажным производством соотношение Fe : Mn составляет в 1999 году 0,06, в 2019 году 0,03, в фоновом районе в 1999 году – 0,04 и в 2019 году – 0,02. Полученные нами значения соотношения Fe : Mn невелики, что подтверждает незначительное накопление железа в исследуемой хвое сосны.

При изучении содержания общей серы в хвое ели в естественных условиях формирования ельников, было выявлено, что ее массовая доля снижается с увеличением возраста хвой (Казимиров, 1971; Чуваев, Кулагин, 1973; Кожевникова, Второва, 1988), но в наших исследованиях данная тенденция не отмечена. Массовая доля общей серы (рис. 5) в хвое сосны характеризуется небольшой вариабельностью в 1999 и 2019 годах как для загрязненных, так и для фоновых участков – от 0,07 % до 0,11 %. По результатам химико-аналитических исследований, проведенных в 1999 и 2019 годах, не было установлено достоверных зависимостей между значениями массовой доли серы в пробах хвой от возраста хвой и уровня техногенной нагрузки.

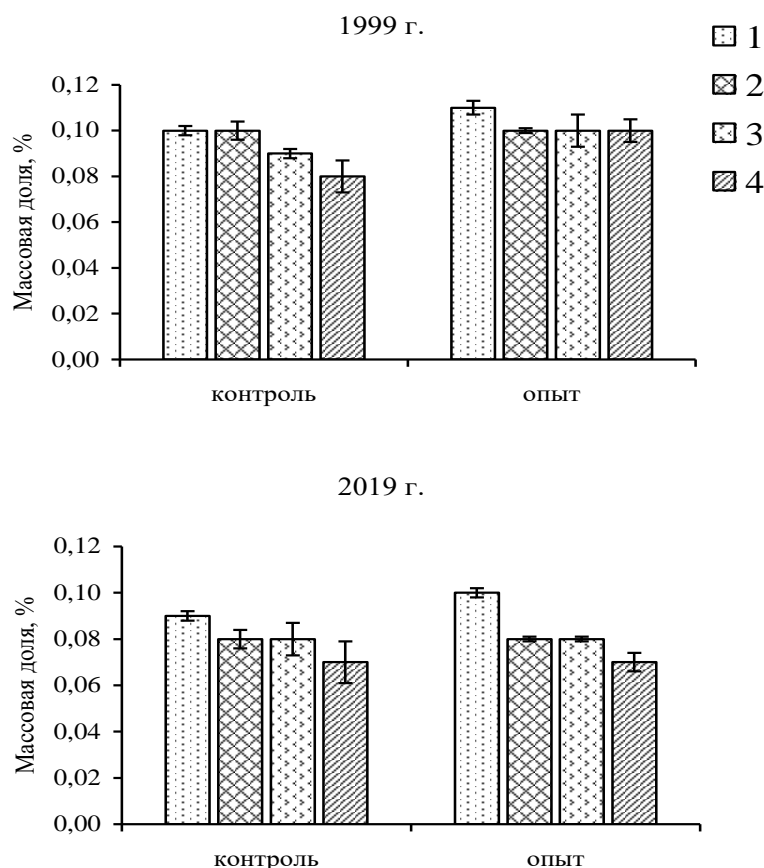


Рис. 5. Массовая доля серы в пробах хвои сосны разного возраста на фоновой (контроль) и загрязненной (опыт) территориях
1 – однолетняя хвоя, 2 – двухлетняя хвоя, 3 – трехлетняя хвоя, 4 – четырехлетняя хвоя.

Массовая доля азота в хвое сосны снижается с увеличением ее возраста (рис. 6), но различие находится в пределах ошибки. Массовая доля азота в пробах хвои с загрязненных и фоновых пробных площадей находится примерно на одном уровне за оба периода наблюдений. Отмечено уменьшение значений массовой доли азота в пробах хвои сосны в 2019 году в 1,2–1,3 раза на контрольной и опытной территории.

Среднее значение массовой доли углерода в пробах хвои сосны характеризуется низкой вариабельностью как на фоновых, так и загрязненных ППП (рис. 7). Не наблюдается достоверных различий ни по возрасту хвои, ни по расположению пробных площадей от источника эмиссии, что указывает на отсутствие влияния атмосферного загрязнения СЛПК на этот показатель. В условиях загрязнения к дополнительному поступлению из окружающей среды углерода, азота, серы древесные растения приспособляются путем интенсификации обмена веществ, вовлечения этих элементов в метаболические процессы, усиления оттока ассимилятов из листьев в другие органы (Чуваев, Кулагин, 1973).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг элементного состава хвои сосны в сосновых сообществах лишайниковых типов на территории Республики Коми позволил выявить неоднозначную реакцию минерального состава разновозрастной хвои на воздействие атмосферных выбросов АО «СЛПК» за 2 срока наблюдений (1999 и 2019 годы). Сравнительный анализ элементного состава хвои сосны показал, что возрастная динамика содержания большинства исследуемых

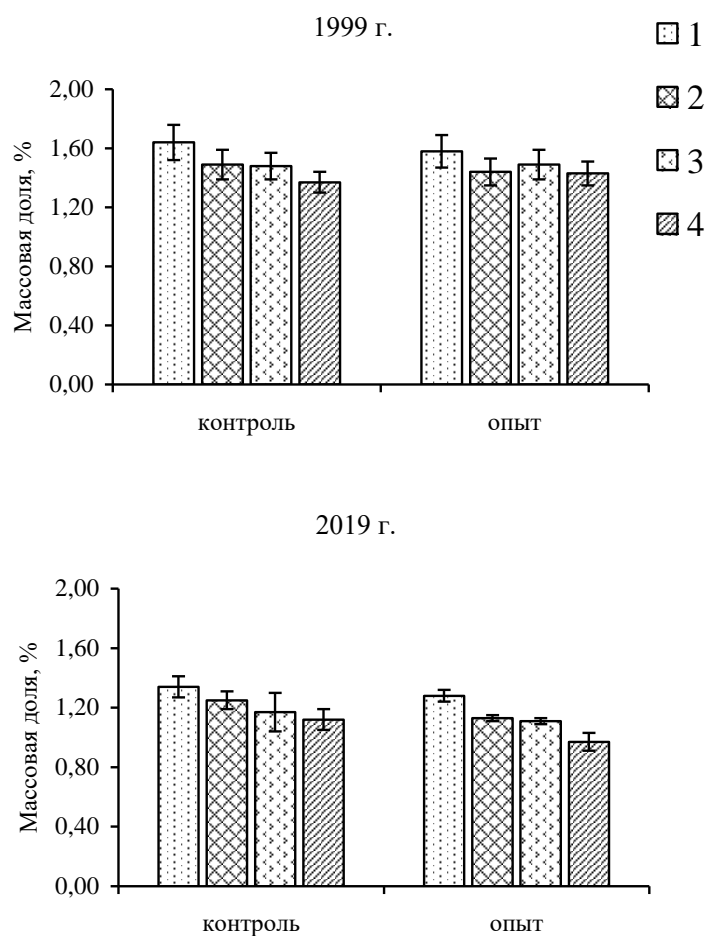


Рис. 6. Массовая доля азота в пробах хвой сосны разного возраста на фоновой (контроль) и загрязненной (опыт) территориях
1 – однолетняя хвоя, 2 – двухлетняя хвоя, 3 – трехлетняя хвоя, 4 – четырехлетняя хвоя.

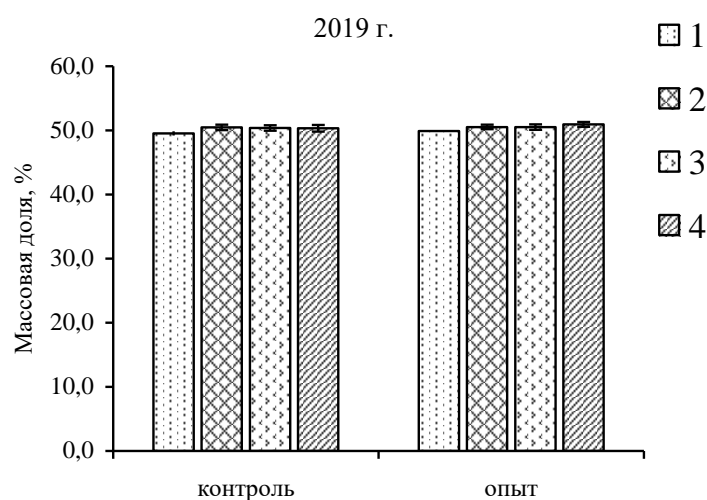


Рис. 7. Массовая доля углерода в пробах хвой сосны разного возраста на фоновой (контроль) и загрязненной (опыт) территориях
1 – однолетняя хвоя, 2 – двухлетняя хвоя, 3 – трехлетняя хвоя, 4 – четырехлетняя хвоя.

элементов минерального питания имеет общие тенденции как в фоновом районе, так и в зоне воздействия выбросов. Суммарное содержание зольных элементов в пробах хвои всех четырех лет жизни в сосняках лишайниковых в 2019 году снизилось относительно 1999 года в среднем на 29 % на контрольных и на 23 % на загрязненных участках. За весь период исследований не установлено достоверной зависимости суммарного содержания зольных элементов в пробах хвои от ее возраста, а также от расстояния до источника эмиссии. В хвое сосны всех исследуемых сосняков среди минеральных элементов доминируют калий и кальций. Значительное участие в составе зольных элементов в хвое принимают фосфор и марганец. Полученные нами значения соотношения Fe : Mn невелики, что подтверждает незначительное накопление железа в хвое сосны. По результатам исследований, проведенных в 1999 и 2019 годах, не было установлено достоверных зависимостей между значениями массовой доли серы в пробах хвои от возраста хвои и уровня техногенной нагрузки. Массовая доля азота в пробах хвои с загрязненных и фоновых пробных площадей находится примерно на одном уровне за оба периода наблюдений. Отмечено уменьшение значений массовой доли азота в пробах хвои сосны в 2019 году в 1,2–1,3 раза на контрольной и опытной территории. Не выявлено достоверных различий по содержанию углерода ни по возрасту хвои, ни по расположению пробных площадей от источника эмиссии.

Благодарности. Автор глубоко признателен доктору биологических наук Капитолине Степановне Бобковой, под чьим руководством заложены объекты и начаты на них исследования, а также сотрудникам отдела лесобиологических проблем Севера Института биологии Коми НЦ УрО РАН: Н.В. Торлоповой, А.И. Патову и С.Н. Наймушиной, принимавшим участие в сборе полевых материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Средообразующая роль и продуктивность лесных и болотных экосистем Европейского Северо-Востока России» (№125020501547-8)

Список литературы

- Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. – 1989. – №. 4. – С.51–57.
- Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. – М.: Дрофа, 1997. – 116 с.
- Бобкова К. С. Биологический круговорот азота и зольных элементов в сосновых биогеоценозах // Эколого-физиологические основы продуктивности сосновых лесов европейского Севера. – Сыктывкар: Коми НЦ РАН, 1993. – С. 127–148.
- Брускина И. М., Карабань Р. Т. Накопление серы и металлов в листьях березы и хвое сосны в районе медно-никелевых производств // Лесное хозяйство. – 1992. – № 10. – С. 10.
- Бусько Е. Г. Трансформация сосновых лесов Беларуси под воздействием антропогенных факторов. – М.: Наука, 1995. – 88 с.
- Веретенников А. В. Физиология растений с основами биохимии. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
- Верхоланцева Л. А. Лесорастительные свойства почв сухих боров и пути их улучшения: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. 06.00.00. Сельское хозяйство. – Московская ордена Ленина сельскохозяйственная академия имени К.А.Тимирязева. – М., 1963. – 24 с.
- Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова / [Под ред. Б. Н. Норина, В. Т. Ярмишко]. – Л.: Наука, 1990. – 195 с.
- Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды. – М.: Мир, 1979. – 200 с.
- Дроздова И. В., Алексеева-Попова Н. В. Оценка макро- и микроэлементного состава некоторых полезных растений Полярного Урала // Растительные ресурсы. – 2008. – Т. 44, вып. 4. – С.116–122.
- Елин Е. С. Фенольные соединения в биосфере. – Новосибирск, 2001. – 118 с.
- Елпатьевский П. В., Аржанова В. С. Поглощение химических элементов древесной растительностью в различных эколого-геохимических условиях // География и природные ресурсы. – 1985. – № 3. – С. 117–125.
- Илькун Г. М. Загрязнители атмосферы и растения. – Киев: Наук. думка, 1978. – 246 с.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
- Казимиров Н. И. Ельники Карелии. – Л.: Наука, 1971. – 138 с.
- Кожевникова Н. Д., Второва Д. Н. Биологический круговорот в ельниках Северного Тянь Шаня. – Фрунзе: Илим, 1988. – 346 с.
- Леса Республики Коми / [Ред. Г. М. Козубова и А. И. Таскаева]. – М., 1999. – 332 с.

- Лукина Н. В., Никонов В. В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. – Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, –1996. – Ч. 1. – 213 с. – Ч. 2. – 192 с.
- Митрофанов Д. П. Химический состав лесных растений Сибири. – Наука: Новосибирск, 1977. – 120 с.
- Морозова Р. М. Минеральный состав растений лесов Карелии. – Петрозаводск, 1991. – 97 с.
- Неверова О. А. Химический состав хвой ели сибирской в условиях техногенного загрязнения г. Кемерово // Сибирский экологический журнал. – 2002. – № 1. – С. 59–65.
- Никонов В. В., Лукина Н. В., Карабань Р. Т., Копчик Г. Н. Методология и опыт реализации системы химического мониторинга лесов восточной Фенноскандии // Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова восточной Фенноскандии. – Петрозаводск, 1999. – С. 185–186.
- Прокушкин С. Г. Минеральное питание сосны. Новосибирск: Наука, 1982. – 189 с.
- Робакидзе Е. А., Торлопова Н. В. Сравнительный анализ элементного состава разновозрастной хвой *Piceae obovata* (PINACEAE) в условиях аэротехногенного загрязнения целлюлозно-бумажного производства // Растительные ресурсы. – 2015. – Т. 51, вып. 2. – С. 167–180.
- Робакидзе Е. А., Бобкова К. С. Мониторинг состояния древесных растений в сосняках лишайниковых при загрязнении выбросами Сыктывкарского лесопромышленного комплекса (республика Коми) // Растительные ресурсы. – 2022. – Т. 58, вып. 4. – С. 417–430.
- Родин Л. Е., Ремезов Н. П., Базилевич Н. И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. – Л.: Наука, 1968. – 143 с.
- Сидорович Е. А., Рупасова Ж. А., Бусько Е. Г. Функционирование лесных фитоценозов в условиях антропогенных нагрузок. – Минск: Наука и техника, 1985. – 205 с.
- Сухарева Т. А. Пространственно-временная динамика микроэлементного состава хвойных деревьев и почвы в условиях промышленного загрязнения // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2013. – № 6. – С. 19–28.
- Сухарева Т. А., Лукина Н. В. Минеральный состав ассимилирующих органов хвойных деревьев после снижения уровня атмосферного загрязнения на Кольском полуострове // Экология. – 2014. – № 2. – С. 97–104.
- Торлопова Н. В., Робакидзе Е. А. Влияние поллютантов на хвойные фитоценозы (на примере Сыктывкарского лесопромышленного комплекса). – Екатеринбург, 2003. – 147 с.
- Торлопова Н. В., Робакидзе Е. А. Химический состав хвой сосны обыкновенной в условиях аэротехногенного загрязнения Сыктывкарского лесопромышленного комплекса // Сибирский экологический журнал. – 2012. – № 3. – С. 415–422.
- Чуваев П. П., Кулагин Ю. З. Вопросы индустриальной экологии и физиологии растений. – Минск: Наука, 1973. – 224 с.
- Черненко Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. – М.: Наука, 2002. – 189 с.
- Экологические отчеты 2006, 2009–2010, 2013–2015. Mondi Сыктывкарский ЛПК / URL <http://www.mondigroup.com>
- Barcan V. Sh., Kovnatsky E. F., Smetannikova M. S. Absorption of Heavy Metals in Wild Berries and Edible Mushrooms in an Area Affected by Smelter Emission // Water, Air and Soil Pollution. – 1998. – Vol. 103. Numbers 1–4. – P. 173–195.
- Ingestad T. Mineral nutrient requirements of *Vaccinium vitis-idaea* and *Vaccinium myrtillus* // Physiological Plant. – 1973. – Vol. 29. – P. 239–246.
- Helmisari H. S. Spatial and age-related variation in nutrient concentration of *Pinus sylvestris* needles // Silva Fennica. – 1992. – Vol. 26. – N 3. – P. 145–153.
- Tamminen P., Starr M., Kubin E. Element concentrations in boreal, coniferous forest humus layers in relation to moss chemistry and soil factors // Plant and soil. – 2004. – Vol. 259. – P. 51–58.

Robakidze E.A. Elemental Composition of Age-Diverse Pine Needles (*Pinus sylvestris L.*) in Lichen Pine Forests under Long-Term Aerotechnogenic Pollution from Emissions of the Syktyvkar Timber Processing Complex // *Ekosistemy*. 2025. Iss. 41. P. 65–78.

The paper presents the results of a study on the impact of aerotechnogenic emissions from the Syktyvkar Timber Processing Complex on the elemental composition of pine needles in pine trees located at varying distances from the source of pollution. The study evaluated the concentrations of gross potassium, calcium, magnesium, phosphorus, manganese, iron, sodium, aluminum, sulfur, nitrogen, and carbon. The authors conducted a comparative analysis of the mineral composition of pine needles of different ages between 1999 and 2019. The age-related dynamics for the content of the majority of examined mineral nutrition elements in both the background area and in the impact zone exhibit common trends. The total content of ash chemical elements in samples from needles of first, second, third and fourth-year in lichen pine forests decreased in 2019 compared to 1999, by 29 % in control sites and by 23 % in polluted plots. Pine needles from all studied pine forests are predominantly composed of potassium and calcium among other mineral elements. Phosphorus and manganese also significantly contributed to the ash element composition of ash elements in pine needles. The mass fraction of total sulphur in pine needles is characterized by low variability between 1999 and 2019 for both the polluted and background plots, ranging from 0.07 to 0.11 %. The authors revealed a decrease in the mass fraction values of nitrogen in pine needles by 1.2–1.3 in 2019 in both the control and experimental sites. No significant differences were observed in carbon content, neither by needle age, nor by the distance of study areas from the emission source.

Key words: pine, chemical monitoring, pulp and paper production, aerotechnogenic pollution, elemental composition, pine needles.

*Поступила в редакцию 17.01.25
Принята к печати 12.02.25*