

## Химический состав хвои сосны обыкновенной в условиях аэротехногенного загрязнения Сыктывкарского лесопромышленного комплекса

Н. В. ТОРЛОПОВА, Е. А. РОБАКИДЗЕ

*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН  
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28  
E-mail: torloпова@ib.komisc.ru*

### АННОТАЦИЯ

Исследовали влияние ОАО “Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс” на химический состав хвои сосны. Сравнительный анализ минерального состава хвои сосны показал, что возрастная динамика содержания большинства исследуемых элементов для фонового района и зоны воздействия выбросов имеет общие тенденции. Суммарное содержание химических элементов в сосняках черничных не различалось ни по годам жизни хвои, ни по удалению от источника загрязнения. При исследовании в 2007 г. выявлено, что суммарная концентрация элементов в однолетней хвое сосен выше, чем в хвое последующих лет. За период исследований в условиях загрязнения по сравнению с фоновой территорией отмечается снижение минерализации хвои сосны. В условиях техногенных выбросов в атмосферу оксидов азота, серы, соединений углерода накопления их в хвое сосны не отмечено (за исключением импактного участка в 1,3 км).

**Ключевые слова:** аэротехногенное загрязнение, химический мониторинг, хвоя сосны, химические элементы.

В связи с активным техногенным воздействием на окружающую среду очень важно исследовать роль химических компонентов биосферы, входящих в арсенал средств, обеспечивающих процессы жизнедеятельности растений [1]. Химический мониторинг – необходимый компонент лесного мониторинга [2].

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 [3–5]. Кроме климатических и биотических факторов на химический состав растительных тканей воздействуют разнообразные вещества-загрязнители вы-

бросов промышленных производств. Хроническое загрязнение лесных экосистем газообразными токсикантами и пылевыми выбросами, содержащими разнообразные соединения металлов, приводит к постепенному накоплению отдельных элементов в почве, а в дальнейшем – в органах растений [6–8]. Из всех органов растений листья являются самыми чувствительными к действию атмосферных загрязнителей [9]. Это обусловлено устьичным газообменом листа с воздухом, благодаря которому токсиканты проникают внутрь [10].

В среднетаежной зоне Республики Коми крупнейшим источником промышленных выбросов в воздушный бассейн является ОАО “Монди Сыктывкарский ЛПК” (СЛПК). Его основные поллютанты – оксиды углерода, азота, серы, сероводород, сероорганические

соединения, минеральная пыль, содержащая карбонаты и сульфиды кальция и натрия. В последние годы суммарное количество выбросов составляют 20 тыс. т в год, что в 1,4 раза ниже, чем в 2004 г., и в 1,6 раза ниже, чем в 1998 г. [11].

Цель данной работы – оценка изменений химического состава хвои сосны за десятилетний период в условиях воздушного загрязнения СЛПК.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на семи постоянных пробных площадях (ППП): четырех контрольных (фоновых) (ППП 23, 24, 26, 27), расположенных на расстоянии 48–52 км к северу от СЛПК, и четыре загрязненных (ППП 3, 15, 18, 19), расположенных к северо-востоку от источника загрязнения на расстоянии от 1,3 до 11,2 км от источника эмиссии в направлении доминирующей составляющей региональной розы ветров (рис. 1).

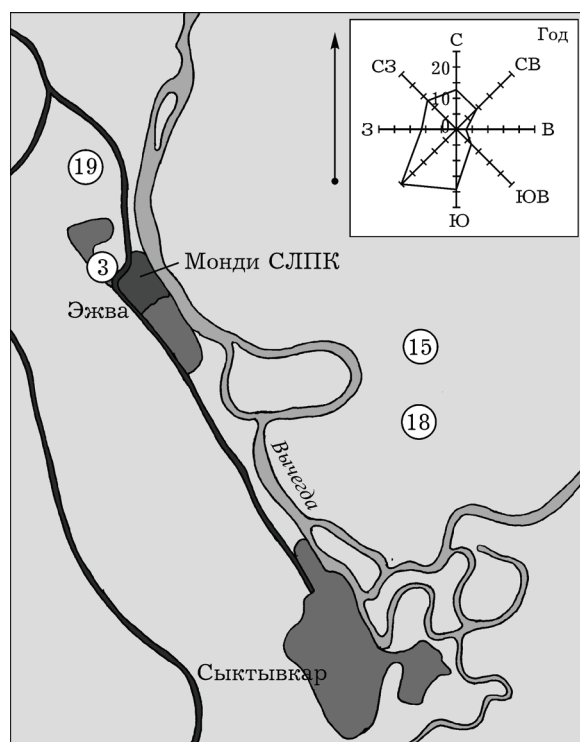


Рис. 1. Расположение ППП в сосняках черничных на территории, загрязненной промышленными выбросами “Монди СЛПК”. “Роза ветров” представлена из “Атласа..., 1997”. Цифры – номера ППП

Первоначальный подбор объектов проведен по таксационным описаниям выделов и планам лесонасаждений. Выбор экспериментальных участков для проведения исследований предусматривал их сопоставимость по основным лесорастительным свойствам почв и таксационным характеристикам насаждений, расположенных в зоне воздействия выбросов и фоновом районе. Тип леса определяли по рекомендациям работы [12].

Сосняки черничные произрастают на иллювиально-гумусовых железистых подзолах. ДревоСТОИ – средневозрастные, приспевающие и спелые, послерубочного и послепожарного происхождения, средней и относительно высокой продуктивности. Древесный ярус состоит из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), осины дрожащей (*Populus tremula* L.), березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), редко встречается ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.). В подлеске в незначительном количестве присутствуют можжевельник (*Juniperus communis* L.), рябина (*Sorbus aucuparia* L.), ивы (*Salix* sp.). Подрост представлен в основном елью (500–1200 шт./га), редко встречаются сосна, береза и пихта. Травяно-кустарничковый ярус с общим проективным покрытием (ОПП) 40–70 % образуют 20–40 видов растений, среди которых доминирует черника (*Vaccinium myrtillus* L.). В мохово-лишайниковом ярусе (ОПП 60–90 %) преобладают зеленые мхи.

Изучение экологической структуры сосняков начато в 1998 г. и проведено согласно руководству [13], используемому в международной программе-методике ICP-Forests. В целом по совокупности показателей жизненного состояния деревьев, древоСТОИ, подроста и растений напочвенного покрова сосновые фитоценозы в районе аэротехногенного загрязнения охарактеризованы как слабо- и среднеповрежденные. Повторные исследования состояния древоСТОИ сосняков черничных, произрастающих на фоновой территории и загрязненных промышленными выбросами СЛПК участках, нами проведены в 2004 и в 2009 г. Согласно полученным данным, выявлено улучшение жизненного состояния сосняков, растущих в зоне воздействия выбросов целлюлозно-бумажного производства. ДревоСТОИ зоны действия СЛПК характеризуются как здоровые и слабоповрежденные.

В то же время фоновые сосняки черничные сохранили индекс своего состояния на уровне 1998 г.

Высокая вариабельность химического состава растительных тканей вследствие воздействия различных факторов природной среды затрудняет выделение степени влияния промышленных выбросов на количественные показатели содержания различных соединений в органах растений. Поэтому выявление изменений химического состава хвои сосны в сосняках черничных под воздействием загрязнения воздуха проводили с учетом ее возраста и условий местопроизрастания. Отбор образцов хвои (1–4-го года жизни) по несколько веток с двух-трех модельных деревьев на каждой ППП проводили в конце июля. Химический анализ выполнен в аккредитованной экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН по аттестованным методикам количественного химического анализа (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511257). Валовое содержание элементов минерального питания (калий, кальций, магний, фосфор, марганец, железо, натрий, алюминий) в растительных образцах определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-анализатор, Германия). Валовое содержание углерода, азота и серы определяли методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS-O).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Растению в больших количествах необходимы азот, фосфор, калий, кальций, магний и сера (макроэлементы). В число элементов, необходимых в меньших количествах, входят железо, марганец, цинк, медь, молибден и хлор [14]. Все названные элементы жизненно необходимы для растений, различия между ними только количественные, а не принципиальные. Они представляют интерес с точки зрения выяснения степени обеспеченности растений пищей. Они важны для оценки технических, лекарственных, пищевых, кормовых свойств растительного сырья [15]. Растения на 50–98 % состоят из воды. Сухое вещество, остающееся после высушивания, состоит наполовину из углерода. При озолении сухого вещества органические со-

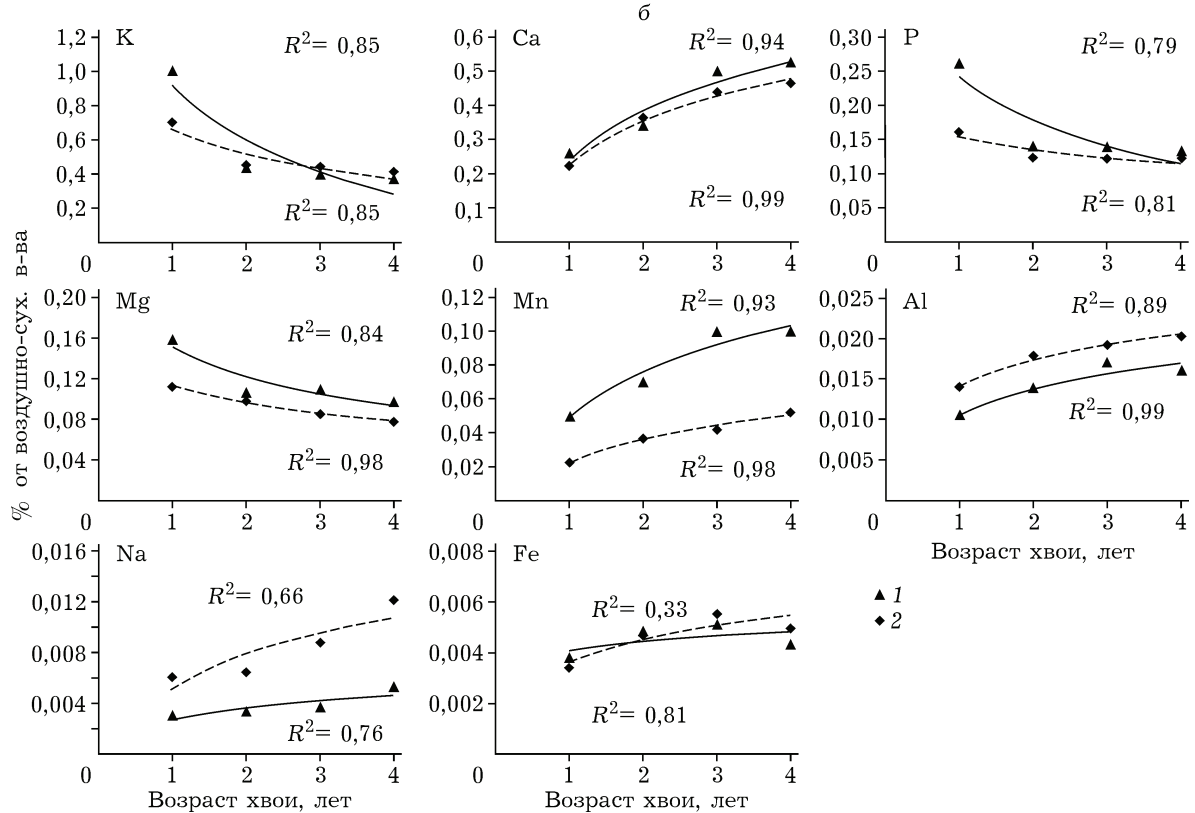
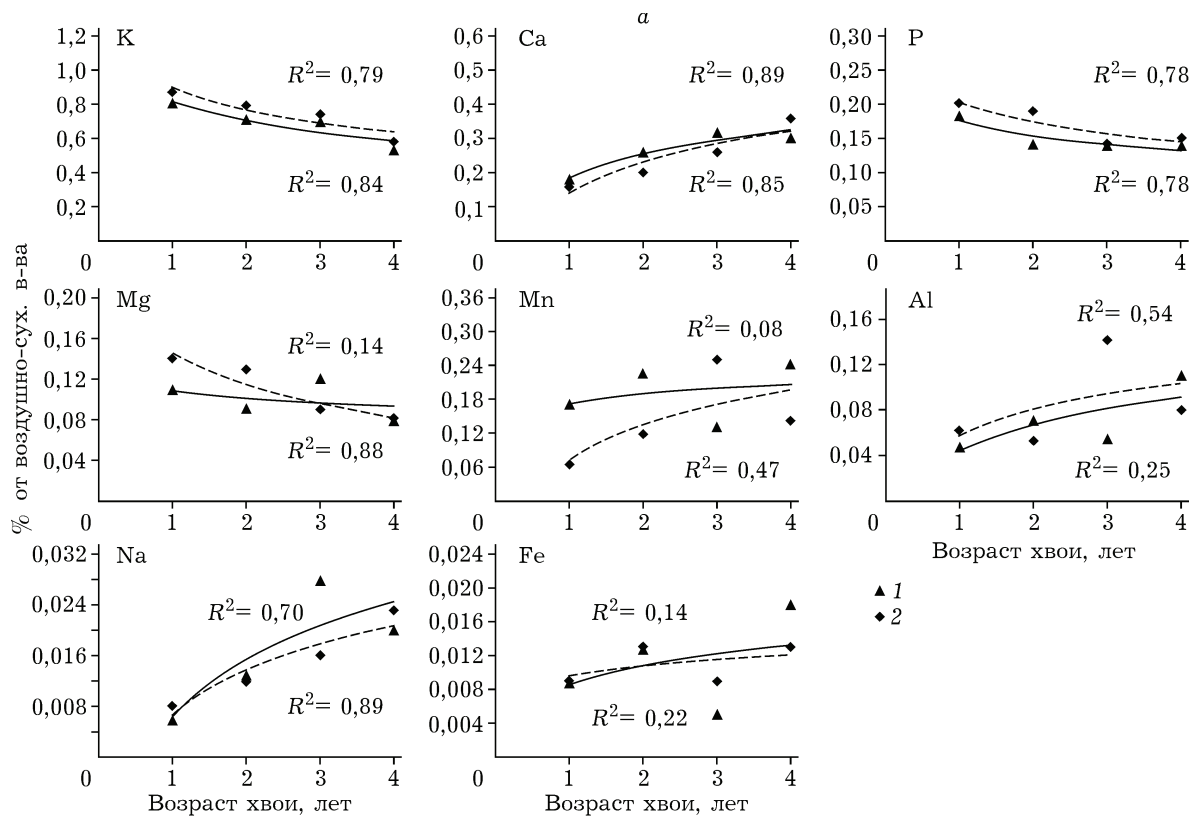
единения сгорают. Остающаяся минеральная часть (зола) составляет от 0,2 до 20 % сухой массы; у листьев количество золы особенно велико. Состав золы зависит от содержания минеральных веществ в почве; любой химический элемент, имеющийся в данном местообитании, может быть обнаружен и в растении. В естественных условиях питательные элементы поглощаются в следующих формах:

- 1) С, Н, О в виде  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{O}_2$ ;
- 2) неметаллы N, S, P в виде анионов (нитрат, сульфат, фосфат, ионы аммония);
- 3) щелочные и щелочно-земельные металлы в виде катионов ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ );
- 4) тяжелые металлы (Fe, Mn, Cu, Mo) и Zn в виде катионов ( $\text{Fe}^{2+,3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , исключение  $\text{MoO}_4^{2-}$ ).

Загрязнение хвои происходит при техногенном воздействии за счет поверхностного загрязнения, а также фоллиарного и почвенного поглощения.

Регрессионный анализ показал, что возрастная динамика концентрации исследуемых элементов в хвое сосен черничных сообществ, растущих на фоновой территории, с высокой степенью достоверности описывается логарифмической кривой (рис. 2, а–в). С увеличением возраста хвои в ней достоверно уменьшается содержание калия, фосфора и магния. Их максимальные концентрации наблюдаются в однолетней хвое. Концентрация кальция, марганца, алюминия, натрия и железа более высокая в хвое старших возрастов, что свидетельствует о незначительной подвижности этих элементов. Вместе с тем в 1999 г. отмечены нарушения возрастной динамики содержания магния, марганца и железа (см. рис. 2, а).

Сравнительный анализ минерального состава хвои сосны, растущей в фоновом районе и в зоне воздействия выбросов, показывает, что возрастная динамика содержания большинства исследуемых элементов имеет общие тенденции. Коэффициент корреляции возрастной динамики содержания калия в хвое сосны фоновых и загрязненных участков в 1999, 2007 и 2009 гг. составил соответственно 0,99, 0,98 и 0,99; кальция – 0,76, 0,94 и 0,99; фосфора – 0,68, 0,98 и 0,99; магния – 0,17, 0,98 и 0,98; марганца – 0,46, 0,93 и 0,94; алюминия – 0,16, 0,71 и 0,95; натрия – 0,68, 0,98 и 0,92; железа – 0,88, 0,12 и



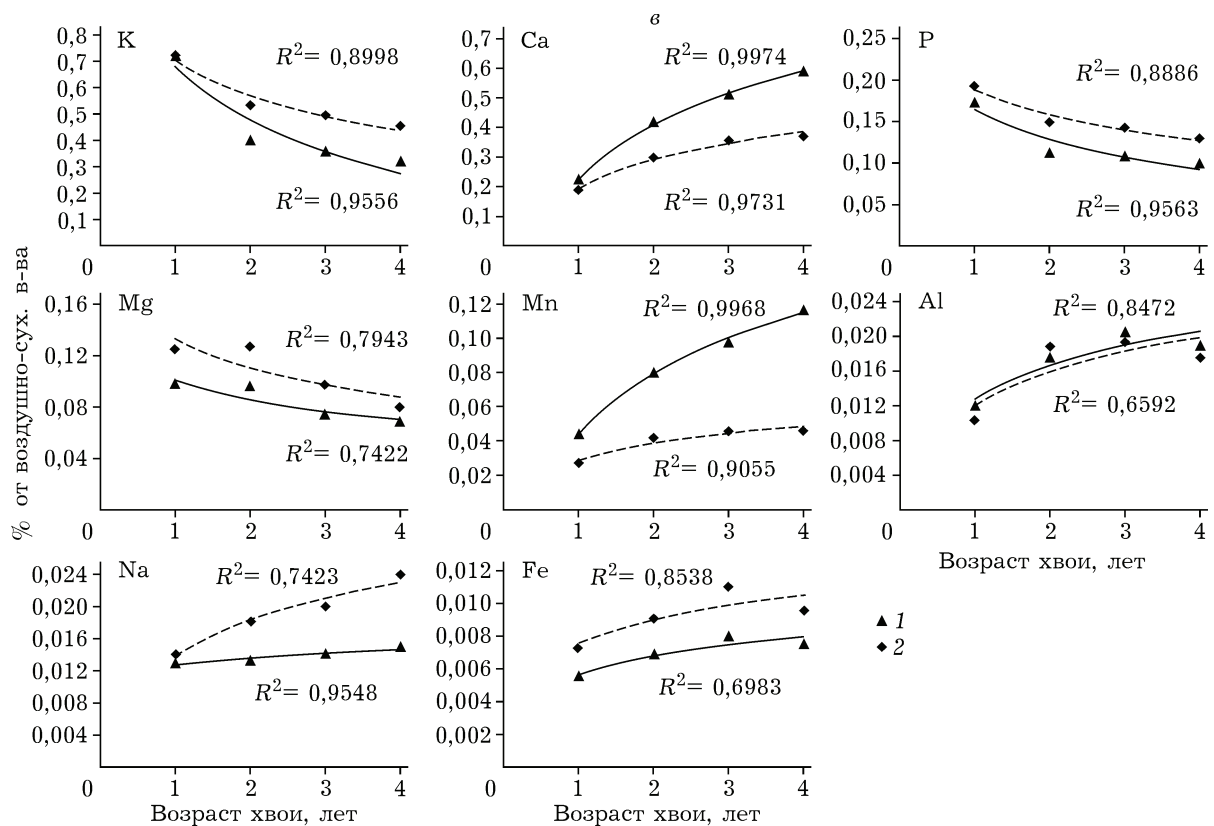


Рис. 2. Содержание химических элементов в хвое сосны на фоновой и загрязненной территории в 1999 г. (а), в 2007 г. (б) и в 2009 г. (в). 1 – логарифмический тренд данных фонового района; 2 – логарифмический тренд данных зоны воздействия выбросов;  $R^2$  – в верхнем правом углу – аппроксимация тренда контрольного участка, в нижнем правом углу – загрязненного участка

0,98. Видимо, нормализация возрастных трендов объясняется относительно благоприятными условиями увлажнения и почвенного питания черничных типов сообществ.

В 1999 г. среднее содержание калия в разновозрастной хвое сосны было примерно на одном уровне на фоновых и опытных участках. В 2007 г. выявлено более высокое содержание калия в однолетней хвое фоновой участка. В 2009 г. не выявлено различий по содержанию калия в однолетней хвое на фоновой и загрязненной территориях. Вместе с тем в загрязненном районе с увеличением возраста хвои содержание калия в ней увеличивается.

Концентрация кальция в хвое с загрязненных и контрольных сосняков достоверно не отличается в 1999 и 2007 гг. В 2009 г. по мере увеличения возраста хвои различие в содержании кальция в хвое между контрольными и загрязненными участками достоверно увеличивается и в хвое старших возрастов составляет 1,4–1,6 раза.

Содержание фосфора в хвое сосны опытных и фоновых насаждений в 1999 и 2007 гг. также достоверно не отличается. Только в однолетней хвое сосен контрольных площадей в 2007 г. его концентрация в 1,6 раза выше. В 2009 г. содержание фосфора в хвое всех возрастов на фоновой территории на 30 % меньше, чем на загрязненной.

При изучении возрастной динамики магния, марганца и алюминия в 1999 г. не выявлено четкой зависимости концентрации магния и марганца от возраста хвои на фоновой территории. В 2007 и 2009 гг. содержание данных элементов четко зависит от возраста хвои: концентрация магния уменьшается с возрастом, а марганца и алюминия возрастает. Вместе с тем содержание марганца и алюминия в хвое всех возрастов значительно меньше в 2007 и 2009 гг. Концентрация марганца достоверно выше в хвое всех возрастов фоновых участков как в 1999, так и в 2007 и 2009 гг., а количество алюминия



выше в хвое сосен на загрязненной территории только в 2007 г.

Возрастные изменения в содержании натрия в 2009 г. идентичны таковым в 1999 г. и 2007 г.: с увеличением возраста хвои концентрация его возрастает. Однако, если количество натрия в разновозрастной хвое сосен между фоновыми и опытными участками в 1999 г. достоверно не различается, то в 2007 и 2009 гг. его содержание значительно выше в хвое всех возрастов, собранной на загрязненной территории (исключение – количество натрия в однолетней хвое 2009 г.).

По содержанию железа только в 2009 г. отмечена прямая зависимость от возраста хвои и на контрольных, и на опытных участках. Причем концентрация железа достоверно выше на загрязненной территории, но значительно уменьшается в 2007 и 2009 гг.

Суммарное содержание химических элементов в 1999 г. в сосняках черничных не различалось ни по годам жизни хвои, ни по уда-

лению от источника загрязнения (рис. 3). При исследовании в 2007 г. выявлено, что суммарная концентрация элементов в однолетней хвое сосен значительно выше, чем в хвое последующих лет. По сравнению с 1999 г. в ней обнаружено более высокое содержание кальция, магния, калия, фосфора и марганца.

Сумма химических элементов в хвое второго, третьего и четвертого года жизни деревьев в 2007 г. достоверно не отличается между фоновыми и опытными участками, но она ниже, чем в 1999 г., в 1,2–1,4 раза. В 2009 г., как и в 1999 г., в сосняках черничных не обнаружено достоверных различий между суммарным содержанием химических элементов ни по годам жизни хвои, ни по удалению от источника загрязнения (см. рис. 2, в). Однако по сравнению с 1999 г. содержание минеральных элементов в 2007 и 2009 гг. снизилось на 30 % в хвое сосны 1-го и 2-го года жизни и на 20 % – в хвое 3-го и 4-го года жизни.

Содержание углерода в хвое сосны стабильно: на фоновых участках составляет в среднем  $(49,4 \pm 2,6)$  % от воздушно-сухого вещества, на загрязненных участках –  $(50,7 \pm 2,5)$  % от воздушно-сухого вещества, что указывает на отсутствие влияния СЛПК на этот показатель (рис. 4, а). Наблюдается тенденция увеличения доли углерода в составе сухого вещества хвои сосны с увеличением ее возраста на 1 % каждый год. Подобные закономерности отмечены и в прошлые годы наблюдений.

Анализ содержания валового азота в разновозрастной (1–4-й год жизни) хвое сосны показал типичную тенденцию к снижению концентрации азота в хвое с увеличением ее возраста в среднем на 4 % в год (рис. 4, б). Концентрация валового азота на фоновых участках варьирует от  $0,83 \pm 0,13$  до  $1,33 \pm 0,20$  и в среднем составляет  $(1,04 \pm 0,16)$  % воздушно-сухого вещества хвои. Содержание азота на загрязненных участках варьирует от  $1,28 \pm 0,19$  до  $1,73 \pm 0,26$  и в среднем составляет  $(1,49 \pm 0,22)$  % воздушно-сухого вещества. Отмечается постепенное уменьшение концентрации азота по мере удаления участков от источника эмиссии. Различие между контрольными и загрязненными участками по содержанию валового азота достигает 1,8 раза. Не отмечено значимых различий в содер-

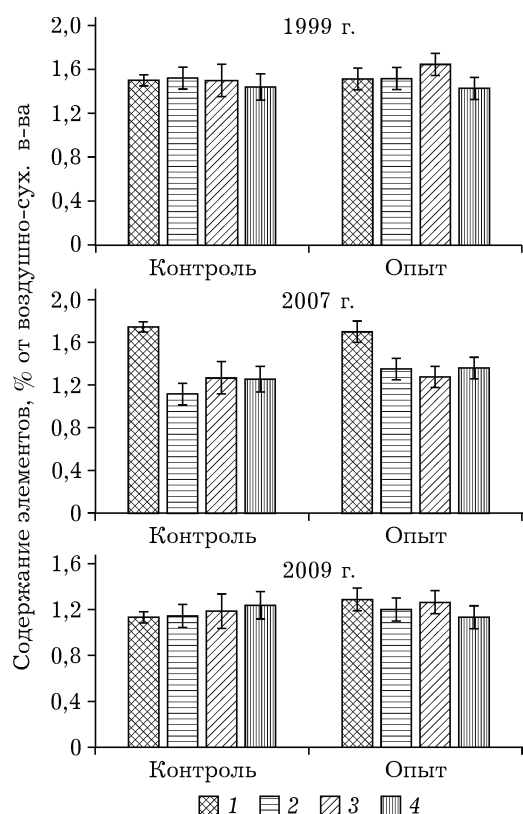


Рис. 3. Суммарное содержание химических элементов в хвое сосны на фоновой (контроль) и загрязненной (опыт) территориях.

1–4 – хвоя: 1 – однолетняя, 2 – двухлетняя, 3 – трехлетняя, 4 – четырехлетняя

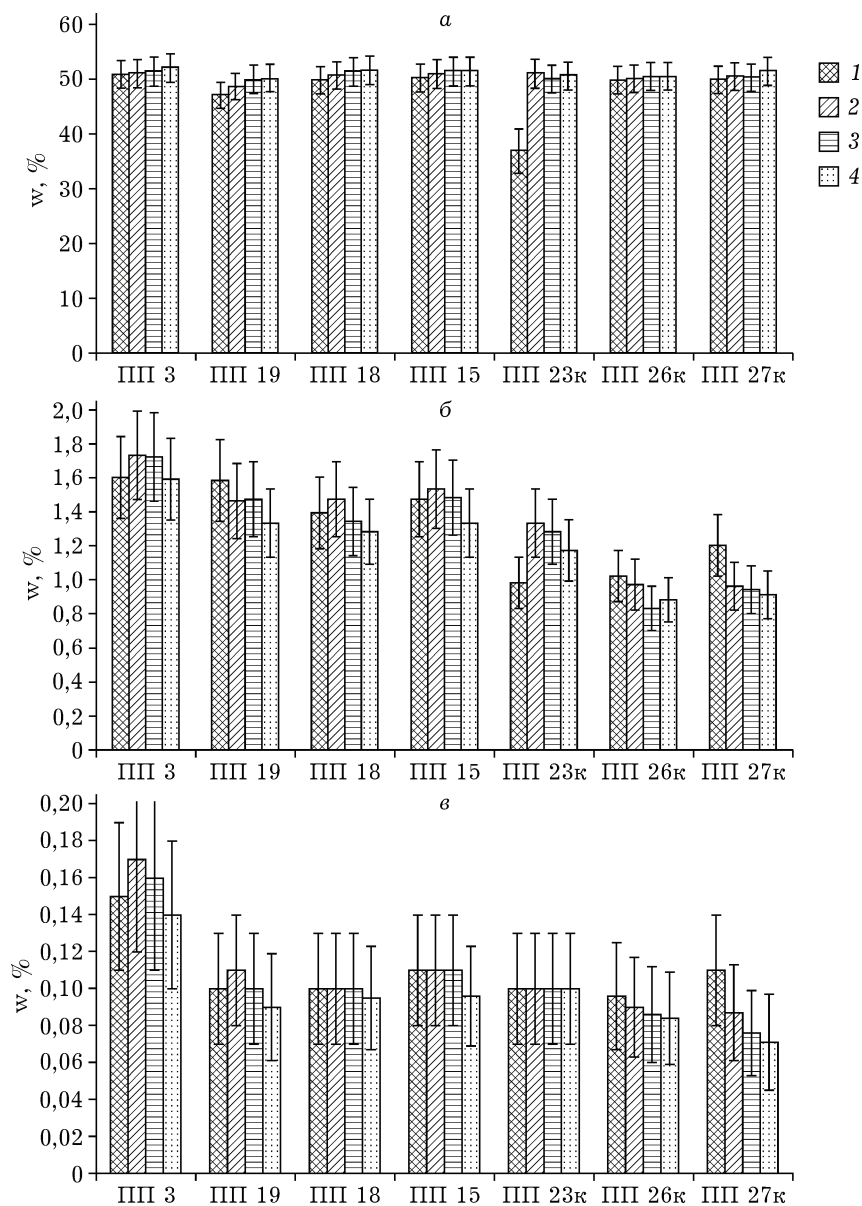


Рис. 4. Содержание общего углерода (а), общего азота (б), общей серы (в) в хвое сосны; 1, 2, 3, 4 – возраст хвои, см. рис. 3

жании валового азота в хвое сосны между годами наблюдений.

Анализ содержания общей серы (рис. 4, в) в хвое сосны показал небольшую вариабельность этого показателя в 2009 г.:  $0,12 \pm 0,02$  в загрязненном и  $(0,09 \pm 0,01)$  % от воздушно-сухого вещества в фоновом районе. В естественных условиях содержание серы снижается с увеличением возраста хвои. На самом близком от СЛПК участке отмечено накопление серы в разновозрастной хвое сосны на 60 % больше, чем на остальных участках. В 1999 г.

концентрация серы в хвое сосны была в 2 раза выше, чем в 2007 и 2009 гг.

К избыточному поступлению из окружающей среды углерода, азота, серы древесные растения приспосабливаются путем интенсификации обмена веществ, вовлечения этих элементов в обменные процессы, усиления оттока ассимилятов из листьев [6]. Некритическое увеличение поступления азота в древесные растения в условиях естественного недостатка азота в бореальных лесах Европейского Севера может пойти им на пользу.

Пониженное содержание марганца и повышенное – железа отмечено как реакция на присутствие поллютантов в растениях [8].

Мониторинг в сосновых сообществах черничных типов в условиях аэротехногенного воздействия СЛПК показал динамику изменений химического состава хвои сосны. Сравнительный анализ минерального состава хвои сосны показывает, что возрастная динамика содержания большинства исследуемых элементов для фонового района и зоны воздействия выбросов имеет общие тенденции. За период исследований в условиях загрязнения по сравнению с фоновой территорией отмечается тенденция к снижению минерализации хвои сосны. В условиях техногенных выбросов в атмосферу оксидов азота, серы, соединений углерода как в 1998 г., так и в 2009 г. не отмечается накопления их в хвое сосны (за исключением импактного участка в 1,3 км).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Елин Е. С. Фенольные соединения в биосфере. Новосибирск, 2001. 118 с.
2. Никонов В. В., Лукина Н. В., Карабань Р. Т., Копчик Г. Н. Методология и опыт реализации системы химического мониторинга лесов восточной Финляндии // Междунар. конф. “Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова восточной Финляндии”. Петрозаводск, 1999. С. 185–186.
3. Прокушкин С. Г. Минеральное питание сосны. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. 189 с.
4. Морозова Р. М. Минеральный состав растений лесов Карелии. Петрозаводск, 1991. 97 с.
5. 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.
6. Чуваев П. П., Кулагин Ю. З. Вопросы индустриальной экологии и физиологии растений. Минск: Наука, 1973. 224 с.
7. Бусько Е. Г. Трансформация сосновых лесов Беларуси под воздействием антропогенных факторов. М.: Наука, 1995. 88 с.
8. Лукина Н. В., Никонов В. В. Поглощение аэротехногенных загрязнителей растениями сосняков на северо-западе Кольского полуострова // Лесоведение. 1999. № 6. С. 34–41.
9. Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды. М.: Мир, 1979. 200 с.
10. Илькун Г. М. Загрязнители атмосферы и растения. Киев: Наук. думка, 1978. 246 с.
11. Экологический отчет 2008. Mondi Сыктывкарский ЛПК / URL <http://www.mondigroup.com>
12. Сукачев В. Н., Зонн С. В. Методические указания к изучению типов леса. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 144 с.
13. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest. Hamburg; Prague, 1994. 177 p.
14. Либберт Э. Физиология растений. М.: Мир, 1976. 576 с.
15. Митрофанов Д. П. Химический состав лесных растений Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 120 с.

## Chemical Composition of Pine Needles under the Conditions of Aerial Technogenic Pollution by the Syktyvkar Timber Industry Complex

N. V. TORLOPOVA, E. A. ROBAKIDZE

*Institute of Biology Komi Scientific Centre Urb RAS  
167982, Syktyvkar, Kommunisticheskaya str., 28  
E-mail: torlopova@ib.komisc.ru*

The influence of PC “Mondi Syktyvkar Timber Industry Complex” on the chemical composition of pine needles was studied. Comparative analysis of the mineral composition of pine needles showed that the age dynamics of the concentrations of the majority of elements under investigation for the background region and for the zone affected by emissions have common trends. The total content of chemical elements in bilberry pine forests did not differ over the needle age or over the distance from the pollution source. Examination carried out in 2007 revealed that the total concentration of elements in the one-year needles of pine is higher than that in the needles of older ages. During the period of studies, a decrease in pine needle mineralization was observed under the conditions of pollution in comparison with the background territory. Under the aerotechnogenic emissions of nitrogen and sulfur oxides, carbon compounds, their accumulation in pine needles was not detected (except for the impacted region at 1.3 km).

**Key words:** aerotechnogenic pollution, chemical monitoring, pine needles, chemical elements.