

## Определение влияния атмосферного загрязнения на морфометрические показатели и состояние ассимиляционного аппарата сосны и ели в бассейне Северной Двины

С. Н. ТАРХАНОВ, С. Ю. БИРЮКОВ

Институт экологических проблем Севера УрО РАН  
163000, Архангельск, наб. Северной Двины, 23  
E-mail: tarkse@yandex.ru, syubir65@yandex.ru

### АННОТАЦИЯ

Изучена динамика повреждения и опада хвои сосны *Pinus sylvestris* (L.) и ели *Picea obovata* Ledeb. × *P. abies* (L.) Karst. в бассейне Северной Двины при атмосферном загрязнении. Выявлены корреляции морфометрических параметров ассимиляционного аппарата с расстоянием до источника эмиссий и концентрацией поллютантов в воздухе, снеге, почве и тяжелых металлов в хвое.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы, сосна, ель, хвоя, повреждения, морфометрические показатели.

Ассимилирующие органы растений-эдификаторов играют роль регуляторного звена в функционировании растительного организма [1]. Изменения морфометрических показателей хвои неизбежно приведут к изменению общей ассимилирующей поверхности растения и, как следствие, к изменению продуктивности и состояния организма в последующие годы [2]. Морфологическим изменениям хвойных, вызванным воздействием загрязняющих веществ, первоначально предшествует перестройка метаболизма [3]. Когда нарушения физиолого-биохимических процессов становятся необратимыми, происходит развитие так называемых “видимых” симптомов повреждения (хлорозов и некрозов хвои), а также изменение морфометрических показателей. Повреждения тканей визуально определяются по изменениям цвета хвои – дехромации, которая считается хорошим диагностическим признаком для

определения уровня загрязненности природной среды [4].

Основными региональными источниками загрязнения атмосферы в бассейне Северной Двины являются крупные предприятия лесопромышленного комплекса – Архангельский, Котласский и Соломбальский ЦБК, Центр атомного судостроения в г. Северодвинске, космодром “Плесецк”, объекты теплоэнергетики, включая ТЭЦ. Промышленность и транспорт архангельской агломерации в 90-х гг. XX в. выбрасывали в атмосферу в среднем в год 245 тыс. т загрязняющих веществ, из них диоксида серы 21, а пыли – 18 % [5]. В 2000 г. при уменьшении общего объема выбросов от стационарных источников в Архангельской области (268 тыс. т) произошло увеличение эмиссий серосодержащих соединений, формирующих региональный фон, из них диоксида серы до 113 тыс. т. В 2005 г. объем выбросов составлял 252, в 2006 г. – 260, в 2007 г. – 248 тыс. т [6].

Цель работы – определение влияния атмосферного загрязнения на морфометрические показатели и состояние ассимиляционного аппарата сосны и ели.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в типичных лесных ландшафтах северной и средней тайги преимущественно с равнинным или слегка волнистым рельефом, в ельниках и сосняках черничных (зелено- и долгомошная группы типов леса) и травяных насаждениях на почвах подзолистого и болотно-подзолистого типов. Опытные участки представлены также сосняками кустарничково-сфагновыми и сфагновыми (сфагновая группа), произрастающими преимущественно на болотных верховых торфяно-глеевых и торфяных почвах.

Закладку пробных площадей (ПП) осуществляли на различном расстоянии от источника выбросов в соответствии с принятыми в лесоустроительной практике стандартами. У 20 деревьев верхнего яруса (древостоя) ели (*Picea obovata* Ledeb. × *P. abies* (L.) Karst.) или сосны (*Pinus sylvestris* L.) в нижней трети кроны одной экспозиции каждой ПП на ветвях I порядка определяли предельную продолжительность жизни и состояние хвои. Состояние ассимиляционного аппарата (степень повреждения и потери хвои) оценивали по стандартной методике, разработанной Европейской экономической комиссией (UN–ЕСЕ) [7] для стран Европы [8], и шкалам, предложенным В. Т. Ярмишко [2]. На терминальных побегах определяли (раздельно для одно-, двух-, трехлетних охвоенных побегов) число хвоинок на 1 см длины побега (густоту охвоения побега), длину и абсолютно сухую массу хвои (10 хвоинок). Аналогичные показатели определяли у подростка ели или сосны.

Загрязнение приземных слоев атмосферного воздуха диоксидом серы определяли по методике [9] при помощи унифицированной программы расчета загрязнения атмосферы (“Эколог”, версия 1.31), разработанной фирмой “Интеграл” (Санкт-Петербург) и согласованной с Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова. Для определения содержания тяжелых металлов (Hg, Cd, Pb, Cu, Zn) в вегетационный сезон 1997–1998 гг.

из боковых ветвей I порядка, на которых проводили морфометрию, на каждой пробной площади отбирали образцы одно-, двух-, трехлетней хвои общей массой не менее 200 г (в воздушно-сухом состоянии). Выборка составляла 20 деревьев, что обеспечивало достоверность полученных данных [10]. Отбор и подготовку проб почвы для химического анализа проводили стандартными методами в соответствии с методическими рекомендациями [11]. Точечные пробы почвы отбирали на пробных площадях из органогенных горизонтов на глубине 0–5 см способом конверта (в пятикратной повторности).

Содержание сульфатов и нитратов в снеге определяли по данным Архангельской и Северодвинской метеостанций [5]. Определение подвижной серы в почве по методу, разработанному Центральным научно-исследовательским институтом агрохимического обслуживания сельского хозяйства и соответствующему ГОСТ 26490-85 [12], заключалось в извлечении подвижной серы из почвы раствором хлористого калия, осаждением сульфатов хлористым барием и последующим турбидиметрическом определении их в виде взвеси сульфата бария. Определение валового содержания тяжелых металлов в хвое проводили в соответствии с общепринятыми методиками [11, 13, 14]. Содержание Cd, Pb, Zn, Cu определяли распылением с атомизацией раствора в пламени с помощью спектрофотометра “Спектр-5”. Содержание ртути в хвое определяли с применением анализатора ртути “Юлия-2М” [15, 16].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При воздействии диоксида серы поглощенные ионы распределяются вдоль хвоинки неравномерно: большая их часть скапливается у кончика иглы, что определяет развитие состояния преднекроза, а по мере накопления – и некроза хвои [1, 17]. Развитие хлороза хвои, особенно трехлетнего возраста и более старших возрастных групп, связывают с дефицитом элементов питания (Mg, K, Mn, Fe, Zn, P), а также с высокими концентрациями Cu и Ni [1, 18–23]. Результаты исследований хвои сосны по признакам ее повреждения (хлорозам и некрозам) и оценки интенсивности этих

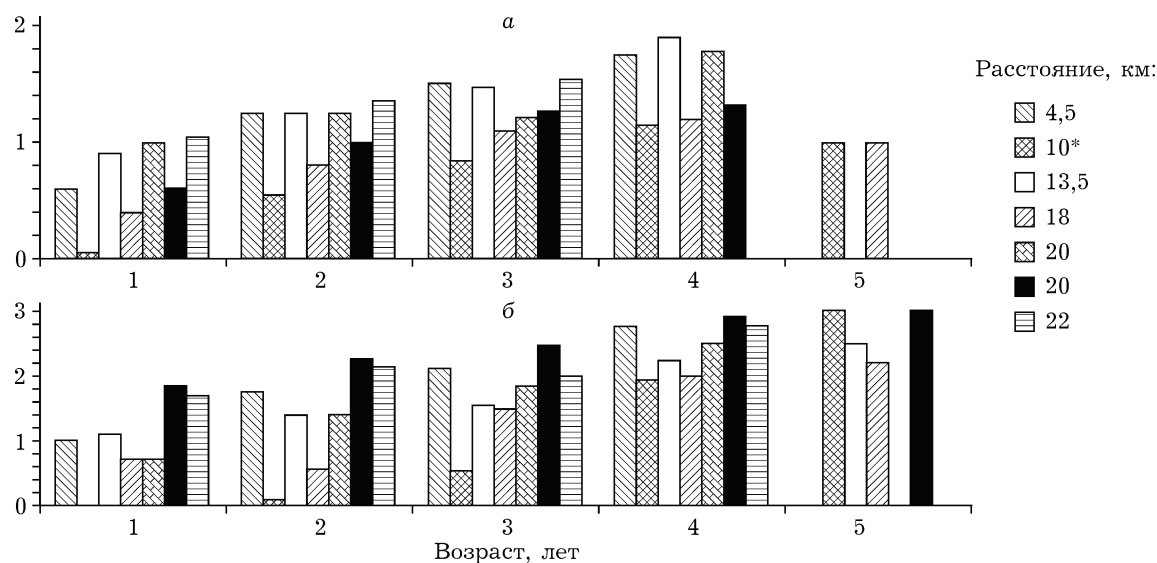


Рис. 1. Возрастная динамика повреждения (а) и потери (б) хвои сосны (баллы) в сосняках сфагновой группы на разном расстоянии от ближайшего источника эмиссии (\*подрост сосны)

повреждений (в баллах по шкале [2]) в ретроспективе на различном расстоянии от источников выбросов архангельской агломерации (низовье Северной Двины, северная тайга) представлены на рис. 1.

Площадь повреждения хвои сосны в сосняках сфагновой группы увеличивается с увеличением ее возраста. Даже однолетняя хвоя имеет следы повреждения (преимущественно пожелтение кончиков игл хлорозного характера), правда, площадь хлорозов и некрозов редко превышает 10 %. Категорию состояния однолетней хвои в древостоях сосны сфагновой группы на расстоянии 4–6 км от источника интенсивных выбросов (ТЭЦ, ЦБК) можно оценить как “слабоповрежденную” и “условно здоровую”. Наиболее существенна ее дехромация в трех-четырёхлетнем возрасте, а дефолиация возрастает с каждым годом. У подростка сосны на удалении 8,5–9 км от источника выбросов в сравнении с древостоем потери однолетней хвои по стандартной шкале для стран Европы UN-ECE несколько ниже.

В ельниках черничных влажных типов леса не наблюдается сколько-нибудь существенного повреждения хвои на однолетних побегах в нижней части кроны и фактически отсутствует дефолиация хвои (рис. 2). Визуально однолетняя хвоя не имеет внешних признаков изменения цвета в ельниках зеленомошной группы типов леса на различном

расстоянии от источников выбросов. Ее потеря оценивается как “нулевая” (в пределах 10 %). С возрастом морфологическое состояние хвои как древостоя, так и подростка ели в различных условиях произрастания ухудшается. Это явление характерно, например, для всех изучаемых участков ельников черничных влажных. В двухлетнем возрасте хвоя еще может быть классифицирована как “здоровая” или “условно здоровая” (без видимых изменений цвета), а ее потеря у древостоя и подростка ели – как “нулевая” (до 10 %), независимо от условий произрастания. В трехлетнем возрасте начинают проявляться симптомы существенного воздействия внешних экстремальных факторов, в том числе атмосферного загрязнения, а в четырех- и пятилетнем возрасте отчетливо видны ее поврежденность (до 25 % площади хвоинки) и довольно умеренная дефолиация (до 25–60 %) [5].

Густота хвои и продолжительность ее жизни относятся к числу признаков, характеризующих адаптационную способность вида и зависят от географического района и условий произрастания. Из морфологических характеристик хвойных наиболее показательным критерием оценки их жизненного состояния считается продолжительность жизни хвои. Высокая информативность этого показателя у сосны и ели в условиях Севера определяется большой естественной продолжительностью функционирования [24]. Исследо-

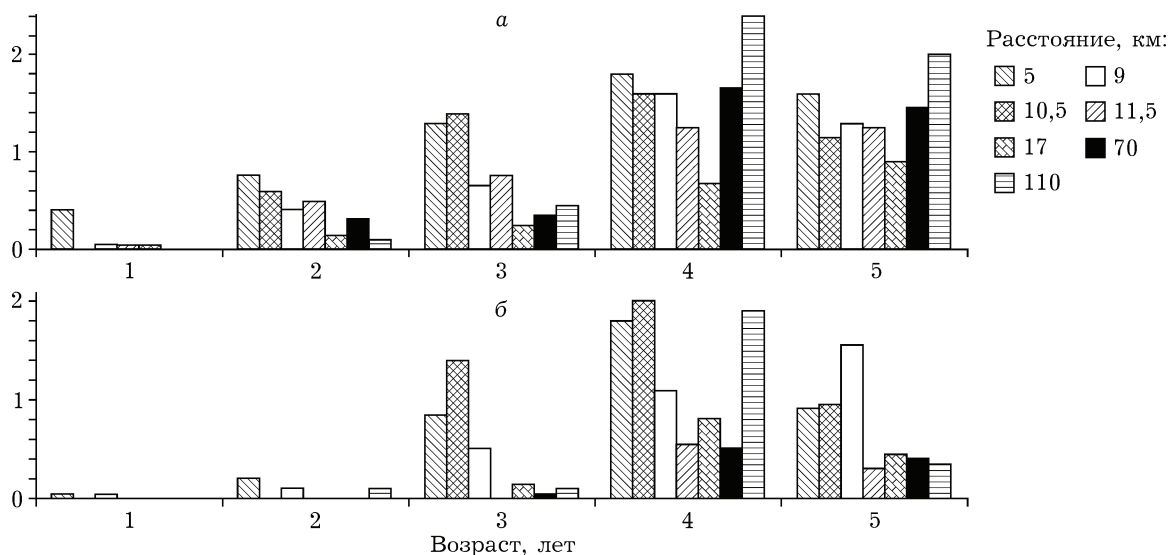


Рис. 2. Возрастная динамика повреждения (а) и потери (б) хвои ели (баллы) в ельниках черничных влажных на разном расстоянии от ближайшего источника эмиссии (\*подрост ели)

вания В. Т. Ярмишко [2] свидетельствуют об уменьшении продолжительности жизни и размеров хвои, увеличении густоты побегов сосны в условиях хронического атмосферного загрязнения на Кольском полуострове. По данным Н. В. Лукиной с соавт. [1], в процессе дигрессионной сукцессии морфометрические характеристики хвои ели (длина, масса) изменяются нелинейно.

Нами установлены достоверные ( $p < 0,05$ ) слабые корреляции предельной продолжительности жизни хвои древостоя сосны с расстоянием до источников выбросов архангельской агломерации ( $r = 0,39 \pm 0,18$ ), а подрост сосны и ели – с расчетной концентрацией диоксида серы в воздухе ( $r = -0,44 \dots -0,48$ ;  $s_r = 0,20-0,21$ ;  $p < 0,05$ ) в насаждениях сфагновой группы типов леса (рис. 3). В лесах зеленомошной группы типов леса такие связи отсутствуют. Выявлен положительный характер связей густоты охвоения однолетних побегов ели с концентрацией  $\text{NO}_3^-$  ( $r = 0,62 \pm 0,30 \dots 0,83 \pm 0,21$ ) в снеге,  $\text{SO}_4^{2-}$  – в снеге и поверхностном горизонте болотных почв (рис. 4). С увеличением возраста хвои эти связи ослабевают и изменяют направленность в связи с динамикой опада хвои четырех и более лет [5]. Наблюдается увеличение густоты охвоения одно-трехлетних побегов древостоя сосны с повышением расчетной концентрации  $\text{SO}_2$  в воздухе в насаждениях сфагновой группы типов леса (рис. 5).

Накопление сульфат-ионов в почве в исследуемом районе приводит и к закислению гомогената хвои ели ( $r = -0,91 \pm 0,10$ ) [5]. Это, в свою очередь, может вызвать изменение каталитической активности ферментов и нарушение обмена веществ [4], а также привести к снижению морфометрических показателей. По мере удаления от ТЭЦ и ЦБК увеличивается абсолютно сухая масса хвои ( $r = 0,38$ ,  $s_r = 0,09$ ,  $n = 102$ ;  $p < 0,001$ ) в

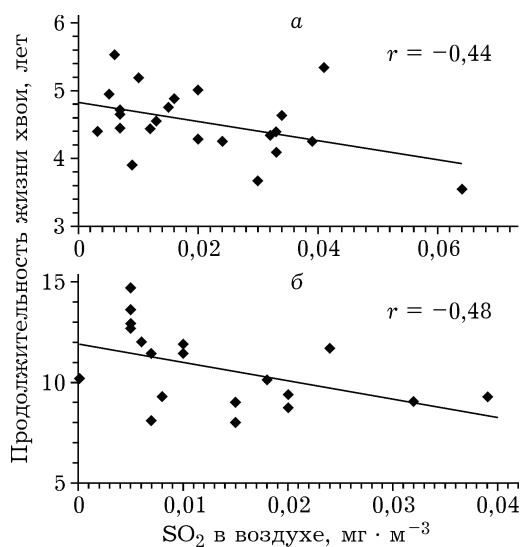


Рис. 3. Зависимость продолжительности жизни хвои подрост сосны (а) и ели (б) от содержания диоксида серы в воздухе в насаждениях сфагновой группы

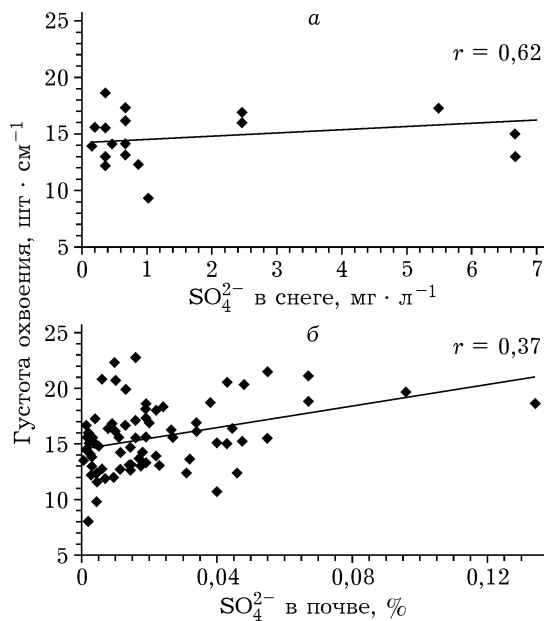


Рис. 4. Зависимость густоты охвоения одно-трехлетних побегов подроста ели от содержания сульфат-ионов в снеге по ЮЗ румбу (а) и в почве (б)

насаждениях зеленомошной группы и наблюдается тенденция увеличения длины одно-трехлетней хвои ели в насаждениях сфагновой группы типов леса, хотя это четко проявляется не по всем румбам ( $r = 0,42 \pm 0,18$ ,  $s_r = 0,18$ ;  $p < 0,05$ ). Зависимость абсолютно сухой массы однолетней хвои подроста ели, произрастающего в сосняках черничных свежих, от расстояния до источников эмиссии и содержания сульфат-ионов в органогенном горизонте подтверждается результатами однофакторного дисперсионного анализа (ОДА) ( $\eta^2 = 0,41 \pm 0,01$  и  $0,39 \pm 0,02$  соответственно;  $F > F_{0,001}$ ). По сравнению с однолетней абсолютно сухая масса трехлетней хвои подроста ели снижается сильнее по мере при-

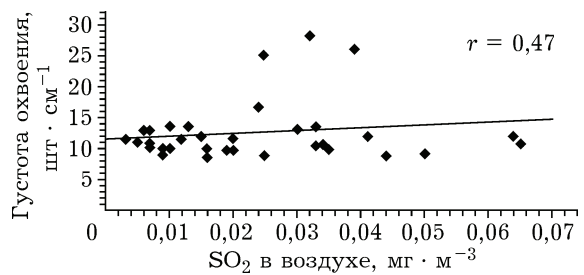


Рис. 5. Зависимость густоты охвоения одно-трехлетних побегов древостоя сосны от содержания диоксида серы в воздухе в насаждениях сфагновой группы

ближения к источникам загрязнения и увеличения содержания сульфатов в органогенном горизонте ( $\eta^2 = 0,49 \pm 0,02$  и  $0,63 \pm 0,01$  соответственно;  $F > F_{0,001}$ ). Показатель силы влияния рассматриваемых факторов в сосняках кустарничково-сфагновых на абсолютно сухую массу одно-трехлетней хвои подроста ели выше по сравнению с сосняками черничными свежими (см. таблицу).

Следовательно, реакция подроста ели в сосняках кустарничково-сфагновых на повышение техногенной нагрузки проявляется в большей степени, чем в сосняках-черничниках свежих. Наши результаты совпадают с таковыми В. Ф. Цветкова [25] на Кольском полуострове, где сосняки и ельники сфагновой группы проявляли большую чувствительность к атмосферному загрязнению, чем черничные.

**Зависимости морфометрических показателей от накопления в хвое поллютантов.** Выявлено, что высокое содержание в хвое тяжелых металлов способствует уменьшению длины и массы игл [21, 26, 27]. Повышение концентраций тяжелых металлов (Cu и Ni) приводит к замедлению фотосинтетических

**Результаты ОДА влияния атмосферного загрязнения на абсолютно сухую массу хвои подроста ели в сосняках кустарничково-сфагновых**

Показатель	Расстояние от источника эмиссии	Содержание в торфяном горизонте (0–5 см)
$\eta^2 \pm s_r$	$0,79 \pm 0,01$	$0,82 \pm 0,01$
	$0,76 \pm 0,01$	$0,77 \pm 0,01$
F	140,52	170,24
	146,01	124,67

Примечание. F – фактическое значение критерия Фишера;  $\eta^2 \pm s_r$  – показатель силы влияния фактора с ошибкой;  $F > F_{0,001}$ . В числителе – однолетняя, в знаменателе – трехлетняя хвоя.

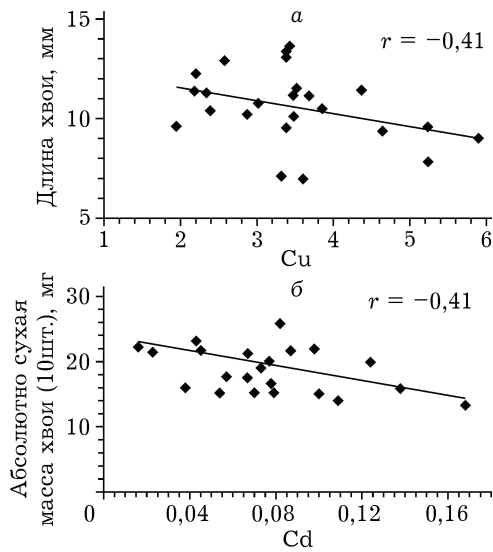
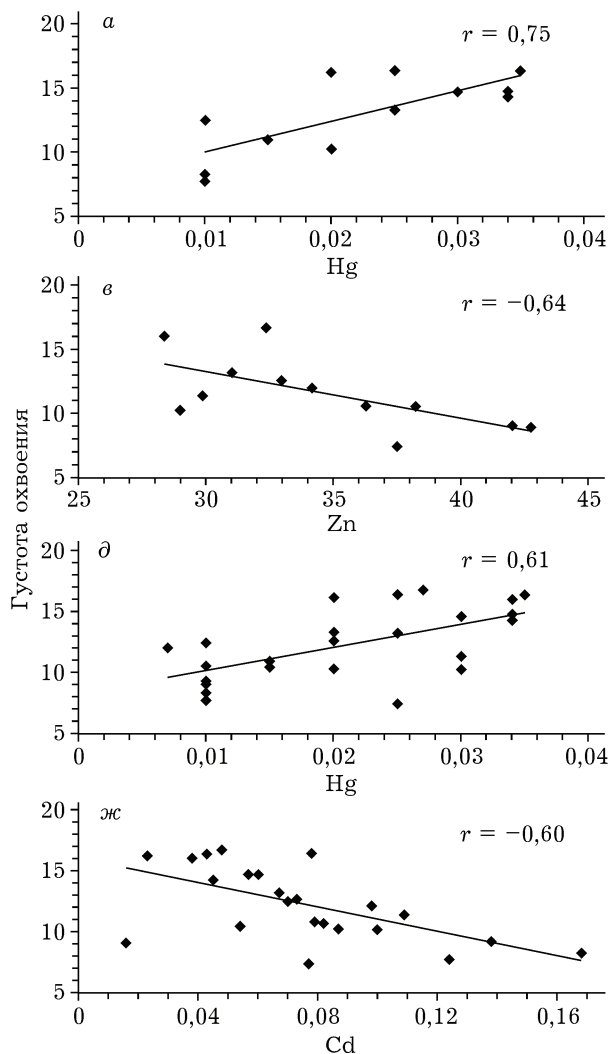


Рис. 6. Зависимость морфометрических показателей от содержания меди и кадмия ( $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ) в одно-трехлетней хвое подростка ели на подзолистых почвах



процессов [28, 29], что отражается на морфометрических показателях хвойных деревьев [1, 21, 27, 30]. В районе Котласского промузла (верховье Сев. Двины, средняя тайга) на подзолистых почвах наблюдается снижение морфометрических показателей подростка ели с увеличением содержания меди и кадмия (рис. 6). Зависимость числа хвоинок на единице длины побега имеет обратный характер в отношении содержания в хвое кадмия, меди и цинка и является положительной в отношении ртути и свинца (рис. 7). ОДА показал достоверное влияние (на принятых уровнях значимости) в насаждениях на подзолистых почвах концентрации в одно-трехлетней хвое наиболее токсичных химических элементов (Hg, Cd, Pb) на густоту охвоения побегов подростка ели ( $\eta^2 = 0,44-0,86$ ;  $p = 0,001-0,006$ ), а кадмия — на длину хвои ( $\eta^2 = 0,73$ ;  $p = 0,01$ ).

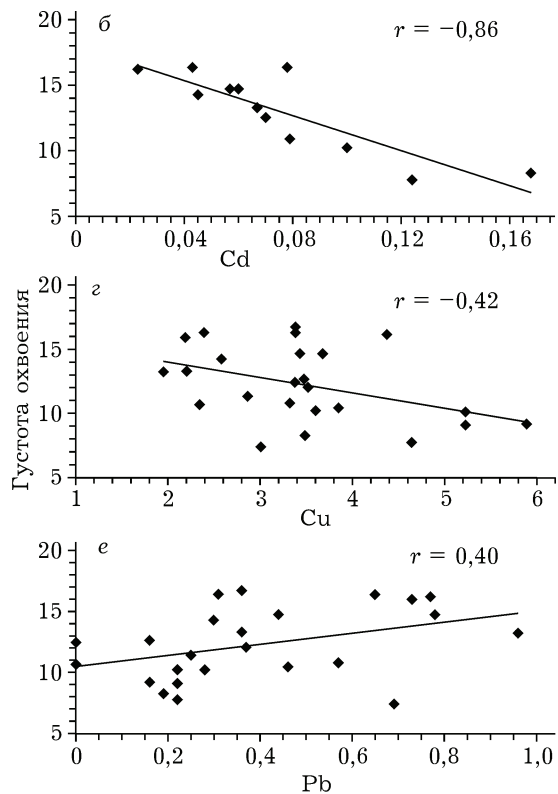


Рис. 7. Зависимость густоты охвоения побегов ( $\text{шт.} \cdot \text{см}^{-3}$ ) от содержания тяжелых металлов ( $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ) в одно-трехлетней хвое подростка ели в зеленомошной (а, б), травяной (в) группах типов леса и на подзолистых почвах (г, д, е, ж)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях активного атмосферного загрязнения усиливаются дехромация и дефолиация кроны сосны в сосняках сфагновой группы, причем более существенно у древостоя, нежели у подроста. Появление хлоротических зон, приуроченных обычно к верхушечной части, а также микроскопических пятен некрозов вследствие окисления фенолов и проникновения поллютантов через устьица и разрушенные участки кутикулы, наблюдается уже на однолетних побегах. У ели в насаждениях зеленомошной группы типов леса симптомы существенного поражения хвои начинают проявляться позднее, с трехлетнего возраста, а по мере ее старения наблюдаются усиление повреждения и более интенсивный опад.

В сфагновой группе типов леса северной тайги у сосны и ели отмечена тенденция снижения предельной продолжительности жизни хвои и увеличения густоты охвоения одно-трехлетних побегов с повышением аэротехногенной нагрузки. В насаждениях зеленомошной группы по мере удаления от ТЭЦ и ЦБК увеличивается абсолютно сухая масса одно-трехлетней хвои ели. Изменение охвоенности побегов в зависимости от полученных доз различных поллютантов происходит неоднозначно. Наблюдаются как положительные, так и отрицательные реакции сосны и ели в ответ на накопление микроэлементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Уральского отделения РАН № 12-У-5-1005 “Структура популяций хвойных и сообществ деревообразующих грибов Онежско-Двинско-Мезенской равнины”.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лукина Н. В., Сухарева Т. А., Исаева Л. Г. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаежных лесах. М.: Наука, 2005. 245 с.
2. Ярмишко В. Т. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб.: НИИ химии СПбГУ, 1997. 210 с.
3. Мальхотра С. С., Хан А. А. Биохимическое и физиологическое действие приоритетных загрязняющих веществ: пер. с англ. // Загрязнение воздуха и жизнь растений. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 144–161.
4. Вайнерт Э. и др. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / пер. с нем. под ред. Р. Шуберта. М.: Мир, 1988. 350 с.
5. Тарханов С. Н., Прожерина Н. А., Коновалов В. Н. Лесные экосистемы бассейна Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения. Диагностика состояния. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. 333 с.
6. Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области в 2007 году. Архангельск: Комитет по экологии Архангельской области, 2008. 301 с.
7. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД–86. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 93 с.
8. Антропогенная динамика растительного покрова Арктики и Субарктики: принципы и методы изучения. СПб.: Тр. Ботан. ин-та РАН, 1995. Вып. 15. 185 с.
9. Hanisch B., Kilz E. Waldschaden erkennen Fichte und Kiefer. Stuttgart: Ulmer, 1990. 334 S.
10. Helmisaari H.-S. Spatial and age-related variation in nutrient concentration of *Pinus sylvestris* needles // Silva Fenn. 1992. Vol. 26, N 3. P. 145–153.
11. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами. М.: Гидрометеиздат, 1981. 108 с.
12. ГОСТ 26490–85. Почвы. Определение подвижной серы по методу ЦИНАО.
13. Методические рекомендации по спектральному определению тяжелых металлов в биологических материалах и объектах окружающей среды. М.: Госкомгидромет СССР, 1986. 51 с.
14. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, кадмия) в пробах почвы атомно-адсорбционным анализом. ОКСТУ 0017. РД 52.18.191–89. М.: Гос. ком. по гидрометеорологии, 1990. 33 с.
15. Методические указания по обнаружению и определению общей ртути в пищевых продуктах методом беспламенной атомной адсорбции. М.: ЦИНАО, 1990. 11 с.
16. Непламенный атомно-адсорбционный метод определения ртути в почвах (метод холодного пара). Одесса: АН Украины, 1991. 8 с.
17. Барахтенкова Л. А. Воздушные поллютанты и обмен серы у сосны обыкновенной: пороговые концентрации, эффекты защиты // Сиб. экол. журн. 1995. № 6. С. 478–494.
18. Binns W. D., Mayhead G. J., Mackenzie J. M. Nutrient deficiencies of conifers in British forests, an illustrated guide. L., 1980. 23 p. (Forestry Commission Leaflet, 76).
19. Giesla W. M., Hildebrand G. Forest decline inventory methods I West. Germany: Opportunities for application in North American forests. Fort Collins (Co), 1986. 31 p.
20. Huettl R. F. Mg. deficiency – a “new” phenomenon in declining forest-symptoms and effects, causes, recuperation // Forest Decline in the Atlantic and Pacific Region. Berlin: Springer-Verlag, 1993. P. 97–114.
21. Ke J., Shelly J. M. Foliar symptoms on Norway spruce and relationships to magnesium deficiencies // Water, Air and Soil Pollut. 1990/1991. Vol. 54. P. 75.

22. Kukkola E., Rautio P., Huttunen S. Stress indications in copper-and nickel-exposed Scots pine seedlings // *Environ and Exp. Bot.* 2000. Vol. 43. P. 197–210.
23. Möbnang M. Elements contents of spruce needles (*P. abies* (L.) Karst.) along an altitudinal gradient in the Bavarian Alps // *Water, Air and Soil Pollut.* 1990/1991. Vol. 54. P. 107–112.
24. Цветков В. Ф. Состояние лесов, подверженных воздействию промышленных эмиссий в Мурманской области и проблемы их сохранения // *Экологические исследования в лесах Европейского Севера. Архангельск*, 1991. С. 125–136.
25. Цветков В. Ф., Цветков И. В. Леса в условиях аэротехногенного загрязнения. Архангельск, 2003. 354 с.
26. Braniewski S., Chrzanowska E. Effect of dust from electro-filters of different industrial works on the vegetation // *Forestry.* 1988. Vol. 18. P. 146–167.
27. Ots K. Impact of emission from oil shale fuelled power plants on the growth and foliar elemental concentrations on Scots pine in Estonia // *Environ. Monitoring and Assessment.* 2003. Vol. 85. P. 293–308.
28. Fernandes J. C., Henriques F. S. Biochemical, physiological, and structural effects of excess copper in plants // *Bot. Rev.* 1991. Vol. 57. P. 246–273.
29. McIlveen W. D., Negusanti J. J. Nickel in terrestrial environment // *Sci. Total Environ.* 1994. Vol. 148. P. 109–138.
30. Turunen M. Responses of Scots pine needle surfaces to air pollutants // *Acta Univ. Oul. A.* 1996. Vol. 277. P. 15–43.

## **Influence of Atmospheric Pollution on the Morphological Parameters of the Assimilation Apparatus of Pine and Spruce in the Basin of the Northern Dvina**

S. N. TARKHANOV, S. Yu. BIRYUKOV

*Institute of Ecological Problems in the North UrB RAS  
163000, Arkhangelsk, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23  
E-mail: tarkse@yandex.ru, syubir65@yandex.ru*

The dynamics of damage and litter of the needles of pine *Pinus sylvestris* (L.) and spruce *Picea obovata* Ledeb. × *P. abies* (L.) Karst. in the basin of the Northern Dvina under atmospheric pollution was studied. Correlations of morphometric parameters of the assimilation apparatus with the distance to the source of emissions and concentrations of pollutants in the air, snow, soil, and heavy metals in needles were revealed.

**Key words:** air pollution, pine, spruce, pine needles, damage, morphometric parameters.