

АККУМУЛЯЦИЯ МЕТАЛЛОВ В ХВОЕ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.), В ПОЧВЕ И СНЕГОВОЙ ВОДЕ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

С.Л. Менщиков, Н.А. Кузьмина, П.Е. Мохначев

ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН» (Лесной отдел), 620144, г. Екатеринбург, ул. Билимбаевская, д. 32а
mssl@botgard.uran.ru

Загрязнение окружающей среды стало одной из важнейших проблем современного мира. Среди факторов, вызывающих загрязнение воздуха, особую роль играют тяжелые металлы. Хотя для растений требуются, как для роста, так и для развития, элементы (такие, например, как магний, железо, калий, кальций и др.) поступающие, напрямую из почвы. Превышенное содержание этих металлов в почве тормозит и блокирует жизненно важные процессы, оказывая токсичное действие на растения. Объектом исследований являются опытные культуры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в градиенте загрязнения выбросами Саткинского ООО «Группа «Магнезит» (далее по тексту комбинат «Магнезит») на Южном Урале и в фоне на различном удалении от источника выбросов. Установлено, что содержание всех изученных компонентов выбросов в атмосферу варьирует и в почве, и хвое в зависимости от техногенной нагрузки. Химическим анализом почвы и хвои сосны обыкновенной в очаге поражения лесов в районе г. Сатка определено, что по сравнению с фоновыми условиями содержание Mg, Na, K, Fe, Mn и Ca здесь значительно превышено. Кроме того, почва имеет высокие показатели pH — в импактной зоне до 9,0. Приведены данные исследований, проведенных на постоянных опытных участках созданных в 1980-х гг., где возраст культур сосны более 38 лет. В частности металлы, содержащиеся в твердой фракции выбросов, закрепляются в почвенном поглощающем комплексе и имеют тенденцию к биоаккумуляции в ассимиляционных органах древесных видов. Полученные данные можно использовать как для целей диагностики уровня загрязнения лесных биогеоценозов, так и для изучения закономерностей процессов поглощения загрязняющих веществ из атмосферного воздуха в системе почва — растение.

Ключевые слова: хвоя сосны *Pinus sylvestris* L., аэротехногенное загрязнение, металлы в хвое и почве

Ссылка для цитирования: Менщиков С.Л., Кузьмина Н.А., Мохначев П.Е. Аккумуляция металлов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), в почве и снеговой воде в условиях техногенного загрязнения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 3. С. 94–102. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-94-102

В связи с быстрым ростом населения земного шара, так же быстро набирает обороты промышленная деятельность и развивается промышленное производство, что неблагоприятно сказывается на окружающей среде. Загрязнение атмосферного воздуха, вызванное этим, достигло критического уровня во многих промышленных регионах, в частности с концентрацией производства черной и цветной металлургии. Сегодня загрязнение воздуха представляет собой глобальную экологическую проблему. Добыча полезных ископаемых и их использование в различных промышленных процессах имеют первостепенное значение. На них приходится большая доля загрязнений, в первую очередь загрязнения воздуха тяжелыми металлами, уровень которых можно определить как прямыми, так и косвенными методами. Использование биоиндикаторов при определении загрязнения воздуха является хорошим методом и дает более надежные данные о периодических изменениях концентраций тяжелых металлов [1–5]. Нами изучены связи содержания металлов в почве и хвое.

Цель работы

Цель работы — изучение особенностей накопления металлов в ассимиляционных органах ле-

сообразующих видов растений на примере сосны обыкновенной, а также в почве в разных зонах воздействия комбината «Магнезит».

Материалы и методы исследования

В условиях современных городов аэротехногенное загрязнение является постоянным экологическим фактором, оказывающим негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека. Один из крупнейших очагов уничтожения лесной растительности расположен на Южном Урале в Челябинской области, в г. Сатка, комбинат «Магнезит» (рис. 1, 2). На опытных участках (ОУ), расположенных на разных расстояниях от комбината, рядами были посажены деревья в 1980–1983 гг. работниками Ботанического сада в целях изучения пригодности почв для лесовосстановления в различных зонах загрязнения магнезитовой пылью.

В градиенте загрязнения в направлении преобладающих ветров к северо-востоку и к югу (фон) от источника выбросов в атмосферу на горных почвах расположены следующие участки (рис. 2):

- опытный участок (ОУ-2) на расстоянии 1 км от комбината в зоне сильного воздействия, тип почв — серые лесные;
- опытный участок (ОУ-5) на расстоянии 3 км



Рис. 1. Прилегающие леса комбината «Мagneзит» в зонах сильного ОУ-2 (а) и слабого воздействия ОУ-4 (б)
 Fig. 1. The adjacent forests near the Plant «Magnezit» in zones of strong OU-2 (a) and weak impact OU-4 (б)

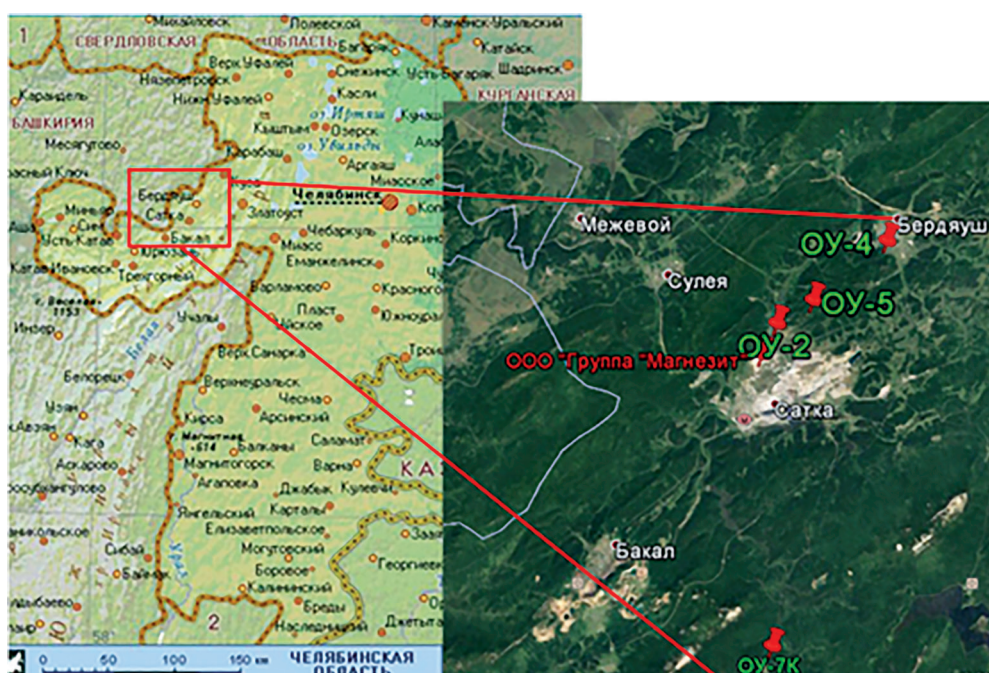


Рис. 2. Расположение опытных участков в районе комбината «Мagneзит»
 Fig. 2. The location of the experimental plots in the area of the Plant «Magnezit»

в зоне среднего воздействия, тип почв — темно-серые лесные;

– опытный участок (ОУ-4) в 10 км в зоне слабого воздействия, тип почв — серые лесные;

– фоновые условия (ОУ-7К) в 25 км к югу от комбината в районе населенного пункта Сибирка, тип почв — буро-таежные (рис. 3).

В 1980–1983 гг. Уральской опытной станцией во время посадки сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в почву был внесен торф на ОУ-2 и ОУ-5 слоем 2 см, а на участке в ОУ-4 посадка проведена без внесения мелиорантов. Тип леса на всех опытных участках — сосняк ягодниковый в горно-лесной природной зоне (см. рис. 1, 2).

Комбинат «Мagneзит» осуществляет свою деятельность с 1901 г. Высококарбонатное сырье сжигается таким образом, что сырьевой магне-

зит Сатинской группы месторождений (фракции 0...40 мм) загружается во вращающуюся печь. После сжигания природного магнетита образуется большое количество едкой пыли, которая подвергается повторному сжиганию. При сжигании пыли в атмосферу выбрасывается большое количество дымовых газов, оксида углерода, щелочей, фтора и сернистого ангидрида, оксидов азота и других вредных веществ. В 1963 г. объемы выбросов магнетитовой пыли в атмосферу были максимальными и достигали 182,5...328,5 тыс. т в сутки. В районе непосредственно комбината «Мagneзит» и в радиусе 1,5...2 км лес полностью погиб (см. рис. 1, а). В 1978 г. на заводе были установлены новые электрофильтры, и выбросы пыли снизились до 70...90 т в сутки.



Рис. 3. Карта природных зон и почв района исследования
 Fig. 3. Map of natural zones and soils of the study area

Актуальность биохимических исследований в настоящее время связана с необходимостью понимания экологической ситуации в целом и является неотъемлемой частью изучения естественных и искусственных модифицированных наземных экосистем. Для оценки воздействия источника загрязнения часто используются растительные организмы, в том числе древесные. Сосна обыкновенная зарекомендовала себя как перспективный вид — индикатор аэротехногенного загрязнения [1–6].

Отбор образцов хвои (1–3-го годов жизни) проводили в конце вегетационного периода (в августе) с 15 модельных деревьев из средней части кроны на всех опытных участках. В лабораторных условиях хвою сушили на воздухе, затем измельчали и сжигали в муфельной печи. Химический анализ проводили путем озоления растительного материала и растворения золы по ГОСТ 27995–88 [7]. Почвенные образцы отбирали на всех опытных участках на глубине 0...30 см под каждым модельным деревом. Металлы из почвы экстрагировали ацетатно-аммонийным буферным раствором. С помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра пов АА 300 (Analitik Jena, Германия) определяли содержание ионов щелочных и щелочно-земельных металлов в почве и хвое в фильтрате снеговой воды и в выпаренном остатке воды.

Результаты и обсуждение

Химический анализ образцов снега на опытных участках, проведенный нами в динамике за многолетний период с 1983 по 2019 гг., показы-

вает техногенную нагрузку в районе исследований (рис. 4). Показатель кислотности снеговой воды позволяет судить о локальном загрязнении воздушного бассейна: в зоне сильного влияния (1 км) рН снегового фильтрата составляет от 9,1 до 10,4, среднего (3 км) — от 8,9 до 10,1 и слабого (10 км) воздействия — от 7,9 до 9,7, при этом показатель держится в пределах сильнощелочной и слабощелочной реакции. На протяжении 36 лет существенных изменений в снижении рН снегового фильтрата не произошло. Увеличение в сторону щелочной реакции на расстоянии 1...10 км от источника выбросов в атмосферу связано с минерализацией снежного покрова за счет магниевых соединений. Оседающая каустическая магнезитовая пыль имеет рН = 10...11. Показатель кислотности снеговой воды не зависит напрямую от количества выпавшей пыли в течение длительного зимнего периода в данном районе (5–6 мес.). По сравнению с фоновыми условиями (25 км) на 2019 г. разница показателя рН фильтрата в зонах сильного, среднего и слабого воздействия составляет больше в 3,8, 3,3 и 2,5 раза соответственно.

Результаты анализа снеговой воды (пыли, отложившейся на фильтре) на содержание взвешенных веществ за многолетний период свидетельствуют о повышенном выпадении пылевых частиц в 2010 и 2019 гг. вблизи источника выбросов. Скачок в 2019 г. можно объяснить тем, что в 500 м от опытного участка (1 км от комбината) начались работы по добыче магнезитовой руды. Разработка нового карьера и пыление от него спровоцировало скачок взвешенных веществ с 28 до 75 г/м² (рис. 5).

В отходящих дымовых газах содержатся пары щелочей, фтора и сернистого ангидрида, которые концентрируются на дисперсных частицах каустической магнезитовой пыли вследствие их большой удельной поверхности, в зимний период накапливаются в снежном покрове, весной проникают в почву. Атмосферные выбросы изменяют химический состав почвы вблизи комбината. Показатель pH почвы повышается до 8,9. На расстоянии 1...3 км от комбината почвенный покров накапливает больше магния.

Соотношение магния к сумме магния и кальция ($r = 0,92, R^2 = 0,84 F(3; 44) = 89,3$ при $p < 0,0001$) в почве показало достоверные различия на всех исследуемых участках в зависимости с расстоянием от источника загрязнения (рис. 6). В частности, содержание обменного кальция в почве достоверно изменяется ($r = 0,83, R^2 = 0,68 F(3; 44) = 38,1$ при $p < 0,0001$), происходит увеличение в фоновых условиях, тогда как содержание обменного магния достоверно снижается ($r = 0,79, R^2 = 0,62 F(3; 44) = 28,7$ при $p < 0,0001$).

Естественное соотношение между элементами в почвенном поглощающем комплексе было нарушено в 1983 г., затем существенно изменилось в сторону увеличения обменного кальция на фоне высокого содержания магния [8]. Однако экспериментальные наблюдения, проведенные нами в 2018 г., показали превышение содержания магния в соотношении обменных катионов в почве по сравнению с 1983 г. в 2,4 раза.

При высокощелочной актуальной кислотности (pH) почвы ($r = 0,91, R^2 = 0,83 F(3; 44) = 148,9$ при $p = 0,0000$) в зоне сильного воздействия выбросов в атмосферу и высоком содержании обменного магния в почве происходит отрицательное воздействие на рост и развитие растений, нарушается нормальное поступление необходимых питательных веществ. Показатель pH почвы достоверно повышается по сравнению с фоновыми условиями на 2,1 ед. (см. рис. 6).

Поступление элементов в растение происходит через корневую систему. Некоторые авторы считают, что в условиях аэротехногенного загрязнения происходит осаждение пылевых металлосодержащих частиц на листовую пластинку с последующей ионизацией металла под воздействием листовых выделений или атмосферной влаги и поглощением ионов через устьица [9, 10]. Увеличение содержания металлов в хвое происходит как при непосредственном контакте за счет поверхностного загрязнения листовой пластинки (хвои), так и через почву, и корневую систему. Однако информация о поглощении металла через поверхность листовой пластинки растения из атмосферы мало изучена [9, 11]. В зонах токсического влияния загрязнителей растения пытаются

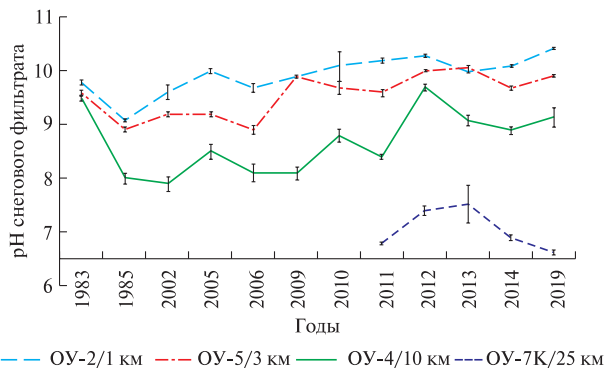


Рис. 4. Изменение показателя кислотности pH снегового фильтрата в динамике на разном удалении от источника выбросов в атмосферу

Fig. 4. The change in the acidity pH of the snow filtrate in dynamics at different distances from the source of emissions into the atmosphere

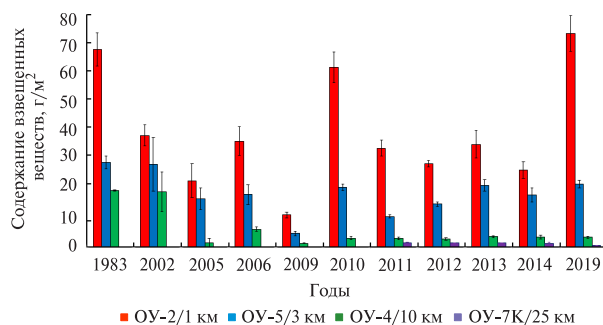


Рис. 5. Изменение содержания взвешенных веществ в снеговой воде с удалением на разные расстояния от комбината «Магнезит» в динамике, г/м³

Fig. 5. Change in the content of suspended solids in snow water with removal at different distances from the Plant «Magnezit» in dynamics, g/m³

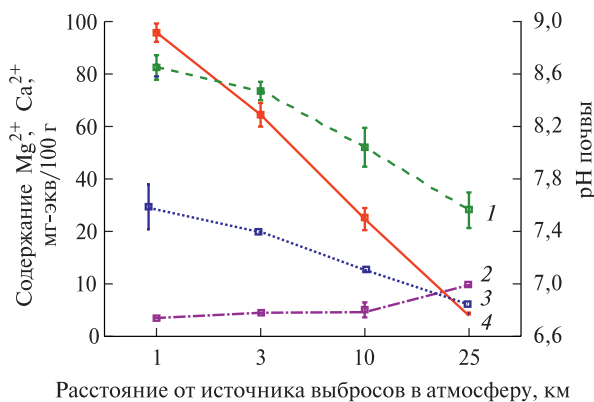


Рис. 6. Изменение содержания обменного кальция и магния, соотношение магния к кальцию в зависимости от удаления комбината «Магнезит» (2018): 1 — Mg²⁺/Mg²⁺+Ca²⁺ (L); 2 — Ca²⁺ (L); 3 — Mg²⁺(L); 4 — pH почвы (R)

Fig. 6. Change of the content of metabolic calcium and magnesium, the ratio of magnesium to calcium, depending on the distance of the Plant «Magnezit», (2018): 1 — Mg²⁺/Mg²⁺+Ca²⁺ (L); 2 — Ca²⁺ (L); 3 — Mg²⁺(L); 4 — soil pH (R)

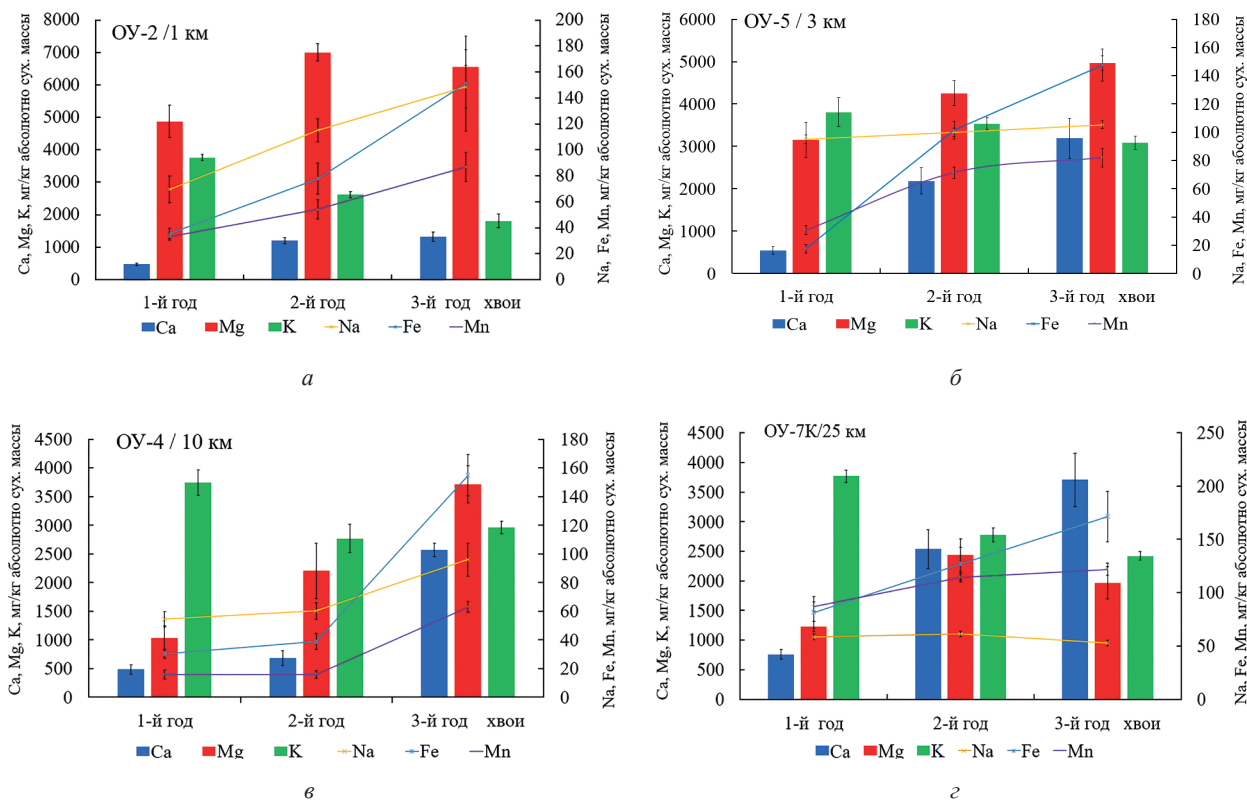


Рис. 7. Концентрация металлов (кальций, магний, калий — ось *Y* — слева; натрий, железо, марганец — ось *Y* — справа) в разновозрастном растительном материале: *а* — зона сильного воздействия; *б* — среднего воздействия; *в* — слабого воздействия; *г* — фоновые условия, мг/кг абсолютно сухой массы

Fig. 7. The concentration of metals (calcium, magnesium, potassium — the *Y* — axis on the left; sodium, iron, manganese — the *Y* — axis on the right) in plants of different ages: *a* — zone of strong; *б* — medium; *в* — weak influence; *г* — background conditions, mg/kg of absolutely dry weight

приспосабливаться, а в растениях и их органах, и органеллах протекают реакции, которые можно характеризовать как адаптация к изменяющимся условиям [12–14].

В условиях аэротехногенных выбросов магнетитового производства основным элементом, концентрирующимся в хвое, является магний (см. рис. 7). Максимальные концентрации в хвое 2-го и 3-го годов жизни в зоне сильного загрязнения составляют 7,0...6,5 г/кг абсолютно сухого вещества соответственно. Сравнивая эти данные с фоновыми, содержание магния вблизи комбината в 2,9–3,3 раза выше, что свидетельствует о результате воздействия аэротехногенного загрязнения. Многие авторы отмечают снижение концентрации магния в хвое на 2-й год жизни [15–17], однако в нашем случае при магнетитовом запылении во всех зонах содержание магния увеличивается с возрастом, кроме хвои 3-го года жизни в фоновых условиях, где определено снижение на 500 мг/кг абсолютно сухого веса.

Анализ содержания калия показал, что возрастная динамика его концентрации в хвое сосен, произрастающих в зоне сильного загрязнения

(OУ-2/1 км) и в фоновых условиях (OУ-7/25 км) с высокой степенью достоверности снижается ($R^2 = 0,72$ $F(1,34) = 91,1$ при $p < 0,0001$ и $R^2 = 0,70$ $F(1,33) = 77,6$ при $p < 0,0001$ соответственно). Максимальная концентрация калия наблюдаются в хвое 1-го года на всех исследуемых опытных участках.

С увеличением возраста хвои концентрация натрия достоверно возрастает в зоне сильного загрязнения ($R^2 = 0,36$ $F(1,34) = 20,9$ при $p < 0,00006$), а в зоне условного контроля — практически не изменяется ($R^2 = 0,27$ $F(1,34) = 12,8$ при $p < 0,001$). По мере удаления от источника выбросов в одно- и двухлетней хвое уменьшается содержание магния, увеличивается содержание кальция и особенно калия. Данные изменения отмечены также другими авторами при иных типах загрязнения [14, 18, 19].

Концентрация железа в хвое не показала изменений с расстоянием, но изменения прослеживаются с возрастом, чем старше хвоя, тем больше накапливается в ней железа на всех исследуемых участках. Сходные результаты были получены П.Г. Аминовым при изучении влияния на хвою

сосны, произрастающей в пределах Карабашской ГТС [20]. Пониженное содержание марганца и повышенное содержание железа в хвое объясняется как реакция на присутствие поллютантов в растениях [20, 21].

С увеличением возраста хвои в ней повышается содержание карбонатных и оксалатных соединений кальция. Установлено, что по мере старения клеток кальций концентрируется в вакуоле и связывается с элементами клеточных стенок [22]. В зоне сильного аэротехногенного воздействия возрастная динамика содержания кальция в хвое ($R^2 = 0,46$ $F(1,34) = 29,4$ при $p < 0,0000$) отличается от его накопления в фоновых условиях ($R^2 = 0,54$ $F(1,33) = 38,4$ при $p < 0,0000$) в 1,6 раза в 1-й год, 2,1 — во 2-й год и 2,8 — в 3-й год жизни хвои.

Некоторые авторы отмечают, что повышенное содержание кальция в зоне воздействия загрязнения приводит к снижению в хвое концентрации марганца, но способствует накоплению железа [23]. В нашем случае такая закономерность выявлена только в зоне среднего загрязнения на расстоянии 3 км от источника эмиссии $r = -0,68$ при $p < 0,05$, $n = 15$. Железо в хвое накапливается с возрастом на всех опытных участках, что согласуется с данными других авторов [15, 20, 24, 25]. Связь накопления магния и железа в хвое $r \sim 0,70$ при $p < 0,05$, $n = 15$ выявлена во всех зонах, кроме ОУ-5/3 км.

Выводы

В условиях аэротехногенного загрязнения природной среды отходами магnezитового производства к наиболее отрицательным факторам относятся высокие показатели рН снеговой воды — до 10,2 и почвы — до 8,9 и изменение химизма почв, а также согласно сравнительному анализу, показал изменения содержания металлов и в хвое, и в почве.

В условиях аэротехногенных выбросов в атмосферу магnezитового производства основным элементом, концентрирующимся в хвое и почве, является магний. Его максимальные концентрации в хвое 2-го и 3-го года жизни в зоне сильного загрязнения в 2,9–3,3 раза выше относительно фоновых. В этом заключается отличие закономерностей распределения магния в хвое по годам жизни в данных условиях, от результатов, полученных в условиях других типов загрязнения, где содержание магния убывает с увеличением возраста хвои.

Содержание кальция в хвое повышается с увеличением возраста хвои, однако в отличие от магния с увеличением техногенной нагрузки оно уменьшается в 5 раз по сравнению с фоновыми условиями и содержание обменного кальция в

почве также снижается с увеличением техногенной нагрузки.

Достоверно увеличивается также содержание железа в хвое с увеличением возраста хвои, но в целом с удалением от источника техногенных выбросов в атмосферу содержание железа уменьшается и в хвое, и в почве.

Содержание калия в почве с повышением техногенной нагрузки увеличивается, а в хвое зависит в основном от возраста хвои, а не от техногенной нагрузки.

Содержание натрия в почве практически стабильное и не зависит от техногенной нагрузки, а в хвое увеличивается на 2-м и 3-м годах жизни хвои в условиях сильного загрязнения.

Содержание марганца в хвое уменьшается, а в почве увеличивается с повышением техногенной нагрузки. С увеличением возраста хвои содержание марганца растет во всех зонах загрязнения, и особенно в фоновых условиях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада Уральского отделения Российской академии наук.

Список литературы

- [1] Биоиндикация загрязнения наземных экосистем / под ред. Р. Шуберта. М.: Мир, 1988. 350 с.
- [2] Торлопова Н.В., Робакидзе Е.А. Химический состав хвои сосны обыкновенной в условиях аэротехногенного загрязнения Сыктывкарского лесопромышленного комплекса // Сибирский экологический журнал, 2012. №3. С. 415–422.
- [3] Anicic M., Spasic T., Tomasevic M., Rajsic S., Tasic M. Trace Elements Accumulation and Temporal Trends in Leaves of Urban Deciduous Trees *Aesculus hippocastanum* and *Tilia ssp.* // *Ecological Indicators*, 2011, no. 11, pp. 824–830.
- [4] Petrova S., Yurukova L., Velcheva I. Possibilities of using deciduous tree species in trace element biomonitoring in an urban area Plovdiv // *Atmospheric Pollution Research*, 2014, no. 52, pp. 196–202.
- [5] Ярмишко В.Т. Крона дерева как индикатор его состояния в условиях техногенного загрязнения окружающей среды // *Проблемы экологии растительных сообществ Севера*. СПб.: ВВМ, 2005. С. 28–57.
- [6] Aricak B., Cetin M., Erdem R., Sevik H., Cometen H. The change of some heavy metal concentrations in Scotch pine (*Pinus sylvestris*) depending on traffic density, organelle and washing // *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019a, no. 17(3), pp. 6723–6734.
- [7] ГОСТ 27995–88. Корма растительные. Методы определения. Методы анализа: Сборник ГОСТов. М.: ИПК Издательство стандартов, 1988. 23 с.
- [8] Кузьмина Н.А., Менщиков С.Л. Влияние аэротехногенных выбросов магnezитового производства на химический состав снеговой воды и почвы в динамике // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 2015. № 6 (56). С. 192–195.
- [9] Лукина Н.В., Никонов В.В. Поглощение аэротехногенных загрязнителей растениями сосняков на северо-западе Кольского полуострова // *Лесоведение*, 1999. № 6. С. 34–41.

- [10] Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 172 с.
- [11] Turkyilmaz A., Sevik H., Cetin M. Saleh E.A.A. Changing of Heavy Metal Accumulation Dependent on Traffic Density in Some Landscape Plants // Polish J. of Environmental Studies, 2018, no. 27(5), pp. 2277–2284.
- [12] Кулагин А.Ю., Гиниятуллин Р.Х., Уразгильдин Р.В. Средообразующая роль лесных насаждений в условиях Стерлитамакского промышленного центра. Уфа: Гилем, 2010. 108 с.
- [13] Биоиндикация: теория, методы, приложения / под ред. Г.С. Розенберга. Тольятти: Российская академия наук, Институт Волжского бассейна, 1994. 266 с.
- [14] Manninen S., Huttunen S., Torvela H. Needle and lichen analyses on two industrial gradients // Water, Air and Soil Pollution, 1991, no. 59, pp. 153–163.
- [15] Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С., Иванчиков А.А., Морозова Р.М. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.
- [16] Никонов В. В., Баскова П. А., Сизов И. И. Химический состав сосны на северном пределе распространения (Кольский полуостров) // Дендрологические исследования в Заполярье. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1987. С. 62–75.
- [17] Скрипальщикова Л.Н., Днепровский И.А., Стасова В.В., Пляшечник М.А., Грешилова Н.В., Калугина О.В. Морфолого-анатомические особенности хвои сосны обыкновенной под влиянием промышленных выбросов города Красноярск // Сибирский лесной журнал, 2016. № 3. С. 46–56.
- [18] Демаков Ю.П., Сафин М.Г., Винокурова Р.И., Таланцев В.И., Швецов С.М. Хвоя как индикатор состояния сосновых молодняков на олиготрофных болотах // Вестник МарГТУ: Лес. Экология. Природопользование, 2010. № 3. С. 95–107.
- [19] Федорова Н.Н., Сверч А. Влияние аэротехногенного загрязнения отходами цементного производства на элементный состав хвои сосняков свентокшисского воеводства (Польша) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Почвоведение, 2004. Сер. 3. Вып. 2. С. 119–123.
- [20] Аминов П.Г. Тяжелые металлы в хвое *Pinus sylvestris* в условиях градиентного аэрального потока загрязняющих веществ медеплавильного производства (Карабашская геотехническая система, Южный Урал) // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского, 2009. № 8. С. 18–25.
- [21] Копылова Л.В. Аккумуляция железа и марганца в листьях древесных растений в техногенных районах Забайкальского края // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Биологические ресурсы: флора, 2010. Т. 12. № 1 (3). С. 709–712.
- [22] Елпатьевский И.В., Аржанова В.С., Власов А.В. Взаимодействие растительности с потоком металлоносных аэрозолей // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. С. 97–100.
- [23] Медведев С.С. Физиология растений. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 512 с.
- [24] Turkyilmaz A., Sevik H., Isinkaralar K., Cetin M Use of tree rings as a bioindicator to observe atmospheric heavy metal deposition // Environmental Science and Pollution Research, 2019, no. 26(5), pp. 5122–5130. DOI: 10.1007/s11356-018-3962-2.
- [25] Shahid M., Dumat C., Khalida S., Schreck E., Xiong T., Nabeel N.K. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake // J. of Hazardous Materials, 2017, no. 325, pp. 36–58.

Сведения об авторах

Менщиков Сергей Леонидович — д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр., зав. лабораторией экологии техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН», msl@botgard.uran.ru

Кузьмина Надежда Александровна — мл. науч. сотр. ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН», yarkaya05@mail.ru

Мохначев Павел Евгеньевич — мл. науч. сотр. ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН», mohnachev74@mail.ru

Поступила в редакцию 18.10.2019.

Принята к публикации 10.02.2020.

ACCUMULATION OF METALS IN PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) NEEDLES, IN SOIL AND SNOW MELT WATER IN CONDITIONS OF TECHNOGENIC POLLUTION

S.L. Menshchikov, N.A. Kuz'mina, P.E. Mokhnachev

Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, 32 a, Bilimbaevskaya st., 620144, Yekaterinburg, Russia
msl@botgard.uran.ru

Environmental pollution has become one of the most important problems of the modern world. Among the factors causing air pollution, heavy metals play a particular role. Although plants require both for growth and development, the elements (such as, for example, magnesium, iron, potassium, calcium, etc.) come directly from the soil. The excessive content of these metals in the soil inhibits and blocks vital processes, exerting a toxic effect on plants. The object of research is the experimental crops of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the emission pollution gradient of the Satka PJSC Plant «Magnesit» in the Southern Urals and in the background at different distances from the emission source. It has been established that the content of all the studied components of atmospheric emissions varies both in soil and needles, depending on the man-induced load. By chemical analysis of the soil and pine needles in the forest lesion area in the area of Satka, it was determined that compared to background conditions the contents of Mg, Na, K, Fe, Mn and Ca are significantly exceeded. In addition, the soil has high pH values in the impact zone up to 9.0. The data of studies conducted in permanent experimental plots created in the 1980-s, where the age of pine crops is more than 37 years, are presented. In particular, the metals contained in the solid fraction of emissions are fixed in the soil absorption complex and tend to have a bioaccumulation in the assimilation organs of woody species. The data obtained can be used both for the purpose of diagnosing the pollution level of forest biogeocenoses and for studying the patterns of absorption processes of pollutants from air in the soil — plant system.

Keywords: *Pinus sylvestris* L. pine needles, aerotechnogenic pollution, metals in needles and soil

Suggested citation: Menshchikov S.L., Kuz'mina N.A., Mokhnachev P.E. *Akkumulyatsiya metallov v khvoe sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.), v pochve i snegovoy vode v usloviyakh tekhnogennoy zagryazneniya* [Accumulation of metals in Pine (*Pinus sylvestris* L.) needles, in soil and snow melt water in conditions of technogenic pollution]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 94–102. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-94-102

References

- [1] *Bioindikatsiya zagryazneniya nazemnykh ecosystem.* [Bioindication of pollution of terrestrial ecosystems]. Translation from German. Ed. R. Schubert. Moscow: Mir, 1988, 350 p.
- [2] Torloпова N.V., Robakidze E.A. *Chimicheskii sostav khvoi sosny obyknovnoy v usloviyakh aerotehnogennoy zagryazneniya Syktyvkar'skogo lesopromyshlennogo kompleksa.* [The chemical composition of pine needles in conditions of aerotechnogenic pollution of the Syktyvkar forestry complex]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Journal of Ecology], 2012, no. 3, pp. 415–422.
- [3] Anicic M., Spasic T., Tomasevic M., Rajsic S., Tasic M. Trace Elements Accumulation and Temporal Trends in Leaves of Urban Deciduous Trees *Aesculus hippocastanum* and *Tilia* ssp. *Ecological Indicators*, 2011, no. 11, pp. 824–830.
- [4] Petrova S., Yurukova L., Velcheva I. Possibilities of using deciduous tree species in trace element biomonitoring in an urban area Plovdiv. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, no. 52, pp. 196–202.
- [5] Yarmishko V.T. *Krona dereva kak indikator ego sostoyaniya v usloviyakh tekhnogennoy zagryazneniya okruzhayushchey sredy* [Tree crown as an indicator of its state in the conditions of technogenic pollution of the environment]. *Problemy ekologii rastitel'nykh soobshchestv Severa* [Problems of ecology of plant communities in the North]. St. Petersburg: VVM LLC, 2005, pp. 28–57.
- [6] Aricak B., Cetin M., Erdem R., Sevik H., Cometen H. The change of some heavy metal concentrations in Scotch pine (*Pinus sylvestris*) depending on traffic density, organelle and washing. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019a, no. 17(3), pp. 6723–6734.
- [7] *GOST 27995–88. Korma rastitel'nyye. Metody opredeleniya. Metody analiza: sbornik GOSTov.* [GOST 27995–88. Vegetable feed. Determination methods. Methods of analysis: Collection of GOSTs.]. Moscow: IPK Gosstandar, 1988, 23 p.
- [8] Kuzmina N.A., Menshchikov S.L. *Vliyaniye aerotehnogennykh vybrosov magnezitovogo proizvodstva na khimicheskii sostav snegovoy vody i pochvy v dinamike.* [The effect of aerotechnogenic emissions of magnesite production on the chemical composition of snow water and soil in dynamics]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State Agrarian University], 2015, no. 6 (56), pp. 192–195.
- [9] Lukina N.V., Nikonov V.V. *Poglascheniye aerotehnogennykh zagryaznitelei rasteniyami sosnyakov na severo-zapade Kol'skogo poluostrava.* [Absorption of aerotechnogenic pollutants by pine plants in the northwest of the Kola Peninsula]. *Lesovedeniye* [Forestry], 1999, no. 6, pp. 34–41.
- [10] Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M., Laidinen G.F. *Ustoychivost' rasteniy k tyazhelym metallam* [Plant resistance to heavy metals]. Institute of biology]. Petrozavodsk: Karelian scientific center of the Russian Academy of Sciences, 2007. 172 p.
- [11] Turkyilmaz A., Sevik H., Cetin M., Saleh E.A.A. Changing of Heavy Metal Accumulation Dependent on Traffic Density in Some Landscape Plants/ *Polish J. of Environmental Studies*, 2018, no. 27(5), pp. 2277–2284.
- [12] Kulagin A.Yu., Giniyatullin R.Kh., Urazgildin R.V. *Sredooobrazuyushchaya rol' lesnykh nasazhdeniy v usloviyakh Sterlitomak'skogo promyshlennogo centra.* [The environment-forming role of forest stands in the conditions of the Sterlitamak industrial center]. Ufa: Gilem, 2010, 108 p.

- [13] *Bioindikatsiya: teoriya, metody, prilozheniya*. [Bioindication: theory, methods, applications]. Ed. G.S. Rosenbrnrga. Tolyatti: Russian Academy of Sciences [Volga Basin Institute], 1994, 266 p.
- [14] Manninen S., Huttunen S., Torvela H. Needle and lichen analyses on two industrial gradients/ *Water, Air and Soil Pollution*, 1991, no. 59, pp. 153–163.
- [15] Kazimirov N.I., Volkov A.D., Zybchenko S.S., Ivanchikov A.A., Morozova R.M. *Obmen veshchestv I energii v sosnovykh leash Evropeyskogo Severa*. [Metabolism and energy in the pine forests of the European North], Leningrad: Nauka, 1977, 304 p.
- [16] Nikonov, V.V., Baskova P.A., Sizov I.I. *Khimicheskiy sostav sosny nasevernom predele rasprostraneniya (Kol'skiy poluostrov)* [Chemical composition of pine on the northern limit of distribution (Kola Peninsula)]. *Dendrologicheskie issledovaniya v Zapolyar'e* [Dendrological studies in the Arctic]. Apatity: KSC AN USSR, 1987, pp. 62–75.
- [17] Skripalschikova L. N., Dneprovsky I. A., Stasova V. V., Plyashechnik M. A., Greshilova N. V., Kalugina O. V. *Morfologo-anatomicheskie osobnosti hvoi sosny obyknovennoi pod vliyaniem promyshlennykh vybrosov goroda Krasnoyarska*. [Morphological and anatomical features of pine needles under the influence of industrial emissions of the city of Krasnoyarsk]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2016, no. 3, pp. 46–56.
- [18] Demakov Yu.P., Safin M.G., Vinokurova R.I., Talantsev V.I., Shvetsov S.M. *Hvoya kak indikator sostoyaniya sosnovykh molodnyakov na oligatrofnykh bolotah* [Needles as an indicator of the state of young pine trees in oligotrophic swamps]. *Vestnik MarGTU: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Vestnik MarSTU: Forest. Ecology. Nature Management], 2010, no. 3, pp. 95–107.
- [19] Fedorova, N. N., Sverch A. *Vliyaniye aerotekhnogenogo zagryazneniya otkhodami* [Influence of aerotechnogenic pollution by cement production waste on the element composition of pine needles in sventokshis Voivodeship (Poland)]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Pochvovedenie* [Vestnik of Saint Petersburg University. Soil science], 2004, ser. 3, v.2, pp. 119–123.
- [20] Aminov P.G. *Tyazhelyye metally d hvoe Pinus sylvestris v usloviyakh gradientnogo aeral'nogo potoka zagryaznyayushchih veshchestv medeplavil'nogo proizvodstva (Karabashskaya geotekhnicheskaya sistema, Yuzhnyi Ural* [Heavy metals in the needles of *Pinus sylvestris* under conditions of a gradient aerial flow of pollutants from copper smelting production (Karabash geotechnical system, Southern Urals)]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Issues of modern science and practice University named after V.I. Vernadsky]. 2009, no. 8, pp. 18–25.
- [21] Kopylova L.V. *Akkumulyatsiya zheleza i marganza v list'yah drevesnykh rasteniy v tehnogennykh rayonakh zabaykal'skogo kraya*. [Accumulation of iron and manganese in the leaves of woody plants in technogenic regions of the Transbaikal Territory]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Biologicheskie resursy: flora* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Biological resources: flora] 2010, v. 12, no. 1 (3), pp. 709–712.
- [22] Elpatievsky I.V., Arzhanova V.S., Vlasov A.V. *Vzaimodeystvie rastitel'nosti s potokom metallonosnykh aerorozley*. [The interaction of vegetation with the flow of metal-bearing aerosols]. *Migratsiya zagryaznyayushchikh veshchestv v pochvakh i sopredel'nykh sredakh* [Migration of pollutants in soils and adjacent environments]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, pp. 97–100.
- [23] Medvedev S.S. *Fiziologiya rasteniy*. [Plant physiology]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2012, 512 p.
- [24] Turkyilmaz A., Sevik H., Isinkalar K, Cetin M Use of tree rings as a bioindicator to observe atmospheric heavy metal deposition. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, no. 26(5). pp. 5122–5130. DOI: 10.1007/s11356-018-3962-2.
- [25] Shahid M., Dumat C., Khalida S., Schreck E., Xiong T., Nabeel N.K. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *J. of Hazardous Materials*, 2017, no. 325, pp. 36–58.

Authors' information

Menshchikov Sergey Leonidovich — Dr. Sci. (Agriculture) Head of Laboratory, Forest Department, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, msl@botgard.uran.ru

Kuz'mina Nadezhda Aleksandrovna — Junior Researcher, Ecology Laboratory of technogenic plant communities, Forest Department, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, yarkaya05@mail.ru

Mokhnachev Pavel Evgenievich — Junior Researcher, Ecology Laboratory of technogenic plant communities, Forest Department, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, mohrnachev74@mail.ru

Received 18.10.2019.

Accepted for publication 10.02.2020.