

УДК 630*160.26:181.342/343:425:631.483:811.3/4/5/6/7/94:632.151

ИЗМЕНЕНИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В СОСНОВЫХ ЛЕСАХ ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ

О. В. Шергина, Т. А. Михайлова, О. В. Калугина

Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132

E-mail: sherolga80@mail.ru, mikh@sifibr.irk.ru, olignat32@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.03.2018 г.

В 2013–2016 гг. проведены комплексные исследования сосновых *Pinus sylvestris* L. лесов в импактной (5–10 км) и буферной (11–40 км) зонах загрязнения аэротехногенными выбросами Усольского промышленного центра Иркутской области. Выявлены изменения биогеохимических показателей (кислотно-щелочного баланса, накопления и миграции поллютантов и элементов-биогенов) в компонентах лесной экосистемы – древесных растениях, лесной подстилке, горизонтах почвенного профиля. Показано, что смещение баланса среды в щелочной диапазон и активная миграция элементов-поллютантов в горизонтах почвенного профиля серых лесных почв и лесной подстилке служат ключевыми процессами, вызывающими нарушение обменных реакций катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ в почвенном поглощающем комплексе и снижение миграции элементов-биогенов в корневые системы древесных растений. Обнаружено, что выраженные изменения кислотно-щелочного баланса компонентов лесной экосистемы, высокая аккумуляция элементов-загрязнителей в горизонтах лесных почв и ассимиляционных органах деревьев сосны, связывание биогенных элементов поллютантами по всей глубине почвенного профиля и в тканях растений приводят к нарушению режима питания и угнетению ростовых процессов древесных растений. В условиях постоянного техногенного воздействия рассмотренные биогеохимические показатели почвы и древостоя характеризуются взаимообусловленным изменением в лесной экосистеме и могут служить адекватными критериями для оценки ее состояния. В целом полученные результаты дают информацию о круговороте элементов питания в сосновых лесах, о роли в этом процессе элементов, поступающих в составе промышленных эмиссий, об их миграции и накоплении в отдельных компонентах экосистемы.

Ключевые слова: *сосновые Pinus sylvestris* L. леса, техногенное загрязнение, почвенный профиль, кислотно-щелочной баланс, биогеохимическая миграция элементов-поллютантов, дисбаланс питательных элементов.

DOI: 10.15372/SJFS20180404

ВВЕДЕНИЕ

Все возрастающее техногенное загрязнение служит одним из существенных факторов деградации лесов. Отрицательное воздействие атмосферного промышленного загрязнения сказывается на всех компонентах лесной экосистемы, в которой нарушаются биогеохимические процессы в результате нерегулируемого приноса потока элементов-поллютантов (Михайлова, Шергина, 2010). Например, техногенные потоки таких опасных загрязнителей, как соединения серы и тяжелые металлы, становятся соизмеримыми с количеством веществ, есте-

ственно участвующих в биогенном круговороте (Алексеев, 2000). Экосистемный дисбаланс элементов-биогенов может вызвать существенное ухудшение питания лесов, приводящее к их структурно-функциональной трансформации вплоть до распада биогеоценозов (Paoletti et al., 2010; Dmuchowski et al., 2011; Михайлова и др., 2016). Результаты многих исследований свидетельствуют, что в лесных экосистемах наибольшую чувствительность к атмосферному загрязнению проявляют естественные ненарушенные почвы и древесные насаждения (Кайгородова, Воробейчик, 1996; Мотузова, 2013; Михайлова и др., 2017). Для оценки негативного антропо-

генного воздействия на лесные экосистемы используется комплекс различных показателей, из которых биогеохимические, характеризующие функционирование почв и древесных растений, достаточно информативны. В то же время методы мониторинга в большинстве случаев основаны на анализе состояния какого-то одного компонента лесной экосистемы (Lindenmayer et al., 2000; Moffat, 2003; De Vries, Groenenberg, 2009; Burrascano et al., 2011). Например, загрязнение почв часто оценивается по нарушению кислотно-основного баланса среды, но при этом нет однозначного суждения о его влиянии на миграцию элементов-биогенов в почвенном профиле. Одни авторы считают, что кислые условия почвенной среды препятствуют перераспределению биогенных элементов в почве (Кайгородова, Воробейчик, 1996; Schroth et al., 2007), другие – что мобильность элементов-биогенов напрямую зависит от увеличения щелочности почв (Makarov et al., 1995; Маслова, 2008). В подобных исследованиях используются, как правило, экспериментальные почвы (Фокин и др., 1982; Alewell, Matzner, 1993; Alewell, 2001; Selim et al., 2004), что не вполне приемлемо, поскольку они значительно отличаются от естественных по многим характеристикам. В ряде работ об ухудшении состояния лесной экосистемы авторы судят по содержанию поллютантов в загрязненном атмосферном воздухе и их количеству, адсорбированному почвой, а также по изменению ряда параметров этого компонента экосистемы (Zhang, Sparks, 1990; Piirainen et al., 2002; Vařat et al., 2015; Медведев, Деревягин, 2017). Однако, на наш взгляд, для более адекватного суждения о состоянии лесной экосистемы необходимы данные, характеризующие биогеохимическую связь ее основных компонентов – почвы и древостоя.

Исследования биогеохимических потоков элементов в лесных экосистемах актуальны и для крупного Сибирского региона – Иркутской области, поскольку здесь сконцентрировано большое количество промышленных центров, атмосферные выбросы которых оказывают негативное воздействие на естественную миграцию биогенных элементов, приводя к ее нарушению. Цель данной работы – выявить изменение комплекса биогеохимических показателей (кислотно-щелочного баланса, накопления и миграции элементов-поллютантов, содержания биогенных элементов) в компонентах лесной экосистемы – почве, лесной подстилке, древостое в условиях аэротехногенного загрязнения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в 2013–2016 гг. в сосновых *Pinus sylvestris* L. лесах, загрязняемых атмосферными выбросами крупного промышленного центра, расположенного вблизи г. Усолье-Сибирское Иркутской области. Большинство промышленных предприятий сконцентрировано в северном направлении от города, где образовалась единая техногенная зона площадью более 3500 га. Промышленные выбросы, поступающие на земную поверхность от предприятий «Усольехимпром», «Усольехимфарм», ТЭЦ, расположенных в этой зоне, обуславливают мощную техногенную нагрузку (Государственный доклад..., 2017). Так, в 2013–2016 гг. ежегодные объемы выбросов составляли от 32 до 35 тыс. т. При этом в техногенных эмиссиях доминировали оксиды серы и аэрозоли тяжелых металлов (Обзор..., 2017).

В ходе полевых исследований в лесных насаждениях заложено 14 пробных площадей (ПП) размером 0.1 га каждая (Manual..., 2010). На исследуемой территории выделены импактная и буферная зоны техногенного влияния (Руководящий документ..., 1991; Экологический энциклопедический словарь..., 1999). Импактная зона располагалась на удалении до 10 км от Усольского промышленного центра, буферная зона – до 40 км (рис. 1).

Фоновая ПП (№ 15) заложена на расстоянии 80 км от промцентра. Примерные географические координаты района исследований – 52°55' с. ш., 102°07' в. д., высота над ур. м. 604 м. При выборе местоположения ПП учитывали особенности ветрового режима (в районе исследований преобладают северо-западное и юго-восточное направления ветров), характер рельефа и залегание почвообразующих пород (Атлас..., 2004).

Сосновые леса на территории исследования занимают водораздельные пространства, надпойменные террасы, частично поймы рек и распространены в границах одного почвенного округа Иркутско-Черемховской равнины с преобладанием серых лесных почв, залегающих на юрских песчаниках и аргиллитах (Батуев и др., 1998). В районе работ распространены сосняки разнотравные и осоково-разнотравные, реже рододендроновые III класса бонитета, полнота древостоев варьирует от 0.4 до 0.5. Особенностью почвенного покрова является сохранение на больших площадях естественных почв, которые не утратили унаследованных природных

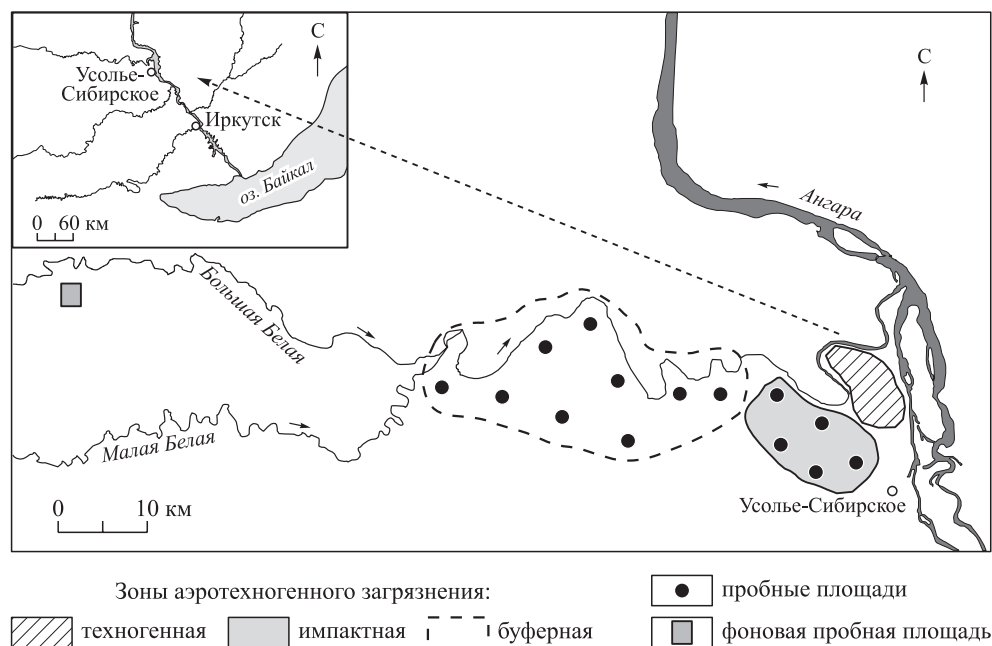


Рис. 1. Расположение ПП и зон загрязнения сосновых лесов в окрестностях промышленного центра Усолье-Сибирское.

характеристик. Описание типа почв на ПП выполнено в соответствии с общепринятой в РФ классификацией (Классификация..., 1977), обозначение индексов горизонтов приведено в соответствии с классификацией почв Иркутской области (Воробьева, 1999), на территории исследования описаны серые лесные почвы. Для морфологического анализа горизонтов использовали методику Г. В. Мотузовой (1988). Исследовали все горизонты профилей – от лесной подстилки до подстилающей породы. Установлено, что профили почв на всех ПП представлены совокупностью горизонтов: O – Ad – A – AB – B – BE – Bt, f – BC – C, в которых выделяются зоны гумусовой аккумуляции и элювиально-иллювиального перераспределения элементов и их соединений. Лесную подстилку отбирали квадратно-конвертным способом усредненных проб в пятикратной повторности. Обследование древостоев сосны проводили по принятым в лесоведении методикам, а также с использованием рекомендаций международного руководства ICP Forests (Методические рекомендации..., 1981; Manual..., 2010). На каждой ПП определяли долю дефолиации крон и морфометрические показатели побегов и хвои деревьев сосны. Для аналитических измерений содержания биогенных элементов отбирали пробы хвои на побегах 2-го года жизни с 5–6 деревьев сосны 40–45-летнего возраста. Отобранные при полевых исследованиях образцы хвои сосны, лес-

ной подстилки и горизонтов почв на всех ПП доставляли в лабораторию для последующих аналитических исследований. Определение валового содержания биогенных элементов (кальция, магния, калия, натрия) в ассимилирующей фитомассе сосны выполняли после предварительного озоления проб при температуре 450 °C в муфельной печи с последующим растворением в концентрированной соляной кислоте. Для оценки миграционной способности элементов в почвенном профиле проводили их вытеснение в почвенную вытяжку. Подвижные формы кальция (Ca^{2+}), магния (Mg^{2+}), калия (K^+), натрия (Na^+), входящих в состав почвенного поглощающего комплекса (ППК), извлекали из почв ацетатно-аммонийным буфером (1 M CH_3COONH_4) с pH 4.8 (Hue, Evans, 1983; Soil Survey..., 2004). Подвижные формы серы и тяжелых металлов вытеснялись однонормальным раствором соляной кислоты (1 M HCl). Актуальную кислотность (pH_{H_2O}) почв определяли потенциометрическим методом. Содержание химических элементов в почвенных и растительных пробах определяли методами атомно-абсорбционной спектроскопии, пламенной фотометрии и фотоколориметрирования с использованием турбидиметрического анализа с хлоридом бария (Методы..., 1987; Soil sampling..., 2007). Использовали сертифицированное оборудование центра коллективного пользования «Биоаналитика» (СИФиБР

СО РАН), измерения проводили на приборах: Flame Photometer Flavo (Carl Zeiss, Germany), AAS vario 6 FL (Germany), FT-IR Spectrum One Spectrophotometer (Perkin Elmer, AAA, Chechia).

Для статистической обработки полученных данных использовали компьютерные программы «Среда статистических вычислений R», версия 3.1.1, 2014 (Шипунов и др., 2014). Рассчитывали: коэффициент линейной корреляции Пирсона (r_{xy}), коэффициент детерминации (R^2) функциональной зависимости между показателями (Schabenberger, Pierce, 2001). Обработку данных и их графическое представление проводили в программах Microsoft Excel, Mathcad 12. Карта-схема выполнена с использованием программ Corel DRAW (version 13) and Google Earth Pro (version 7.1.8.3036).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение кислотности среды компонентов лесной экосистемы. Кислотность среды во многом определяет химическую активность элементов как в почве, так и в растительном организме (Pierzynski et al., 2005; Shamrikova et al., 2006). Поэтому в наших исследованиях первоочередным было определение уровня кислотно-щелочного баланса в горизонтах почвенного профиля, лесной подстилке, ассимиляционных органах сосны на техногенно загрязняемой территории. Выявлено выраженное изменение этого показателя в сторону щелочных значений, особенно в импактной зоне (рис. 2).

При определении актуальной кислотности водных суспензий регистрируется сдвиг $pH_{\text{водн}}$ в лесной подстилке от 6.40 до 7.80, в верхних горизонтах почв, где происходит аккумуляция органического вещества и гумуса, – до 7.60, в

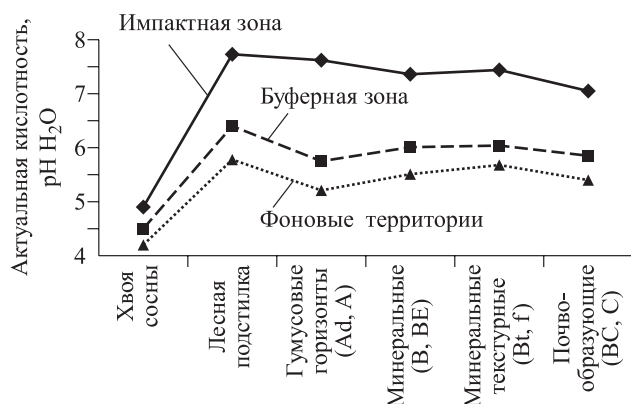


Рис. 2. Изменение актуальной кислотности компонентов лесных экосистем на загрязненных и фоновых территориях.

нижней минеральной части почв – от 5.80 до 6.90. Это свидетельствует о техногенном поступлении щелочных компонентов промышленных выбросов на поверхность почвы на территории, прилегающей к промышленному комплексу. В почве фоновой ПП скачок pH в подстилке и верхних горизонтах не зарегистрирован, для нее характерно постепенное снижение $pH_{\text{водн}}$ вниз по профилю от 5.70 до 5.40. В хвое сосны на загрязненных территориях $pH_{\text{водн}}$ изменяется мало – от 4.20 до 4.90.

Вместе с тем корреляции между показателями актуальной кислотности горизонтов почв и лесной подстилки, с одной стороны, и значениями кислотности хвои – с другой, довольно высоки ($r = 0.85–0.98$; $P = 0.05$; $n = 78$), что отражает обусловленность связи этого параметра ассимиляционных органов с его изменениями в лесной подстилке и почве. В целом выявленное существенное подщелачивание компонентов лесной экосистемы при техногенном загрязнении может значительно изменить миграционную способность элементов-поллютантов (серы, свинца, кадмия) и их химическое средство с элементами-биогенами.

Миграция поллютантов (тяжелых металлов и серы) в загрязненных почвах. Изменение кислотно-щелочного баланса является очень значимым фактором, обуславливающим усиление миграции тяжелых металлов (ТМ) в почвенных горизонтах (Латыпова, 2000; Мотузова, 2000), причем в большинстве случаев это происходит при сдвиге баланса в кислую сторону (Безуглова, Орлов, 2000). Однако в наших исследованиях усиление миграции подвижных форм тяжелых металлов по почвенному профилю обнаруживалось при возрастании щелочности среды (Шергина, Михайлова, 2011). Так, при определении содержания подвижных форм свинца и кадмия в серых лесных почвах в зонах загрязнения выявлены их активное иллювиальное перераспределение с глубиной, а также высокая биогенная аккумуляция (рис. 3).

В импактной зоне в верхних гумусово-аккумулятивных горизонтах содержание свинца и кадмия превышает фоновый уровень в 7–10 раз. В нижележащем иллювиальном горизонте BE почвенного профиля концентрация этих элементов снижается до 4–6 раз относительно накопления в верхних гумусовых горизонтах, а в текстурном горизонте Bt, f вновь увеличивается до 3–4 раз в сравнении с фоном. В почвообразующих горизонтах BC и C загрязненных почв накопление свинца и кадмия также значитель-

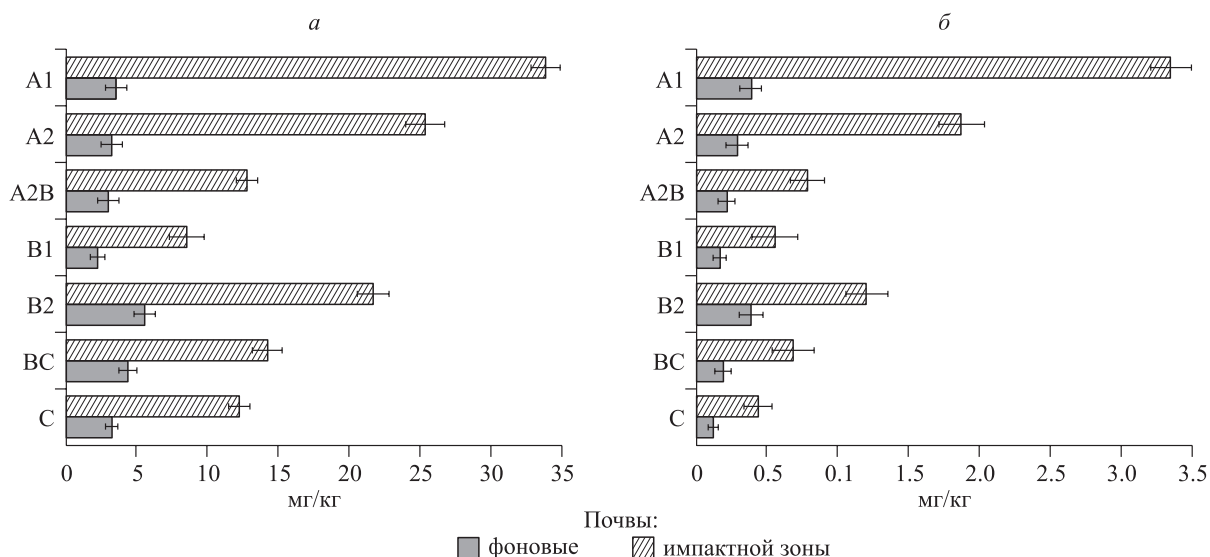


Рис. 3. Содержание свинца (а) и кадмия (б) в техногенно загрязненных почвах импактной зоны Усольского промышленного центра.

но – до 14.2 и 0.68 мг/кг соответственно. Полученные данные свидетельствуют об активной транзитной миграции тяжелых металлов по всему генетическому профилю техногенно загрязненных почв, тогда как результаты других исследователей в основном подтверждают накопление элементов-поллютантов в верхних горизонтах почв (Строганова и др., 2003; Федорев, Бахмет, 2003).

При исследовании аккумуляции и миграции сульфатов в загрязненных почвах обнаружены высокие их концентрации во всех почвенных горизонтах, при этом следует отметить значительные пределы колебаний между минимальными и максимальными значениями (табл. 1).

В верхней части почвенного профиля основная доля серы в форме сульфатов сосредоточена в гумусово-аккумулятивной толще (Ad, A), т. е. входит в состав органического вещества. В нижележащих В и ВЕ горизонтах почв отмечается

снижение уровня серы. Однако в горизонтах Вt, f и ВС ее содержание снова несколько возрастает, что можно объяснить более прочной адсорбцией сульфат-ионов минеральными коллоидами, преобладающими в этих горизонтах (Орлов и др., 2005). Установленное при техногенном загрязнении вертикальное изменение концентраций подвижных сульфатов по почвенному профилю приводит к восстановительному преобразованию соединений серы с выделением углекислоты и дальнейшему развитию в анаэробных условиях процесса глубокого оглеения.

Дополнительным источником поступления техногенной серы в почву может служить увеличение ее содержания в опаде и лесной подстилке (Hovland, 1981). При определении содержания подвижных сульфатов в лесной подстилке почв импактной зоны нами обнаружено повышение их концентрации от 2.5 до 5.4, а в буферной зоне – от 2 до 2.6 раз по сравнению с фоновым

Таблица 1. Минимальные и максимальные значения содержания подвижных сульфатов (мг/кг) на загрязненных и фоновых территориях

Индекс горизонта почв	Импактная зона ($P = 0.05$, $n = 15$)	Буферная зона ($P = 0.05$, $n = 27$)	Фоновая территория ($P = 0.05$, $n = 9$)
Ad	22.2–32.6	10.5–24.5	5.8 ± 0.4
A	19.3–21.8	6.3–17.7	1.9 ± 0.2
AB	10.2–15.3	4.8–10.2	1.2 ± 0.1
B	9.3–13.6	3.9–9.6	0.7 ± 0.1
BE	7.7–10.9	3.1–7.5	0.5 ± 0.1
Bt, f	14.3–19.5	7.2–14.1	1.7 ± 0.3
BC	7.6–11.2	5.1–8.8	0.8 ± 0.2
C	5.7–8.4	2.1–6.7	0.3 ± 0.1

уровнем. При этом максимальные значения подвижной серы в лесной подстилке импактной зоны достигают 36–50 и в буферной 25–35 мг/кг. Между содержанием серы в лесной подстилке и в верхних гумусовых горизонтах Ad и A выявлена корреляционная связь высокого уровня достоверности ($r = 0.91$; $P = 0.05$; $n = 32$), что подтверждает наличие техногенного поступления серы с выбросами на поверхность почвы и свидетельствует о дальнейшей фиксации серосодержащих соединений органическим веществом, чаще всего гуминовыми кислотами.

Связывание обменных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) поллютантами в загрязненных почвах. Выявленное подщелачивание почв в лесах, подверженных аэротехногенному воздействию Усольского промышленного центра, является следствием поступления выбросов теплоэлектростанций, использующих уголь с высоким содержанием щелочноземельных соединений (Государственный доклад..., 2017). Щелочные компоненты выбросов, среди которых доминируют соединения кальция, способствуют образованию в почвах комплексных органических и минеральных соединений с элементами-поллютантами, что показано нами ранее (Шергина, Михайлова, 2011). В данном случае рассмотрена связь между содержанием токсичных ионов SO_4^{2-} , Pb^{2+} с подвижной формой кальция (Ca^{2+}) в горизонтах почв импактной и буферной зон (рис. 4).

Установлено, что эта связь прямо пропорциональная. Максимальные значения сопряженного накопления токсичных ионов и Ca^{2+} зарегистрированы в гумусовых горизонтах Ad и A, а

также в текстурном горизонте Vt, f, что обусловлено наличием в них гумусовых соединений и тонкой илистой фракции, обладающих высокой адсорбционной способностью.

В фоновых почвах накопление поллютантов отсутствует и сопряженность связи между содержанием подвижных форм серы и кальция, а также свинца и кальция не выявлена. Прямая зависимость обнаружена также между содержанием токсичных ионов серы и свинца с другими катионами ППК (Mg^{2+} , K^+ , Na^+) в горизонтах загрязненных почв, причем для всех почвенных горизонтов в импактной и буферной зоне эти связи достоверны ($r = 0.58–0.78$; $P = 0.05$; $n = 52$). На основании полученных данных для загрязненных почв можно представить следующий ряд тесноты связей (в порядке убывания) катионов ППК с сульфат-ионом (SO_4^{2-}) и ионом свинца (Pb^{2+}) в пределах почвенного профиля: $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$, который означает, что наиболее тесная связь токсичных ионов наблюдается с двухвалентным катионом кальция (Ca^{2+}), а наименьшая – с одновалентным катионом K^+ . Таким образом, связывание ионов ППК с токсичными ионами является одной из основных причин нарушения биогеохимической миграции биогенных элементов в профиле почв и снижения их потока в корневые системы растений.

Накопление элементов-поллютантов в хвое деревьев сосны. Результаты анализа проб хвои сосны, отобранных на ПП в зонах загрязнения, показали значительное накопление поллютантов (серы, свинца, кадмия) в ассимиляционных органах деревьев. Наиболее высокий уровень элементов-загрязнителей в хвое регистрирует-

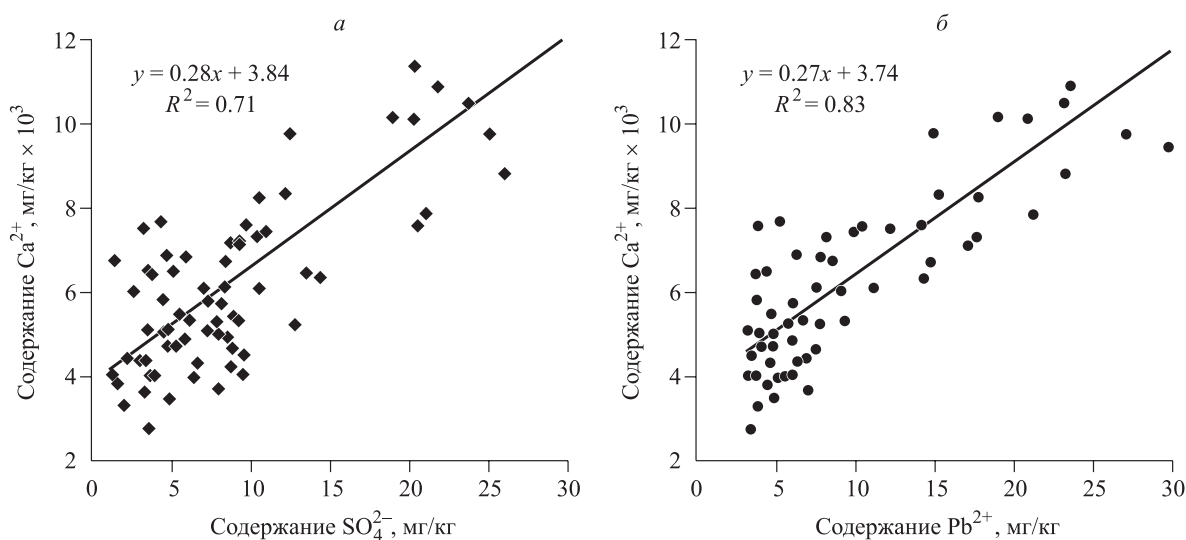


Рис. 4. Связь между содержанием обменного катиона Ca^{2+} и токсичных ионов SO_4^{2-} (а) и Pb^{2+} (б) в загрязненных почвах.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между содержанием серы, свинца, кадмия в почвах и хвое сосны в импактной зоне загрязнения ($P = 0.05$; $n = 45$)

Индекс горизонта почвы	Сера	Свинец	Кадмий
O	0.85	0.79	0.65
Ad	0.76	0.74	0.63
A	0.66	0.60	0.59
AB	0.61	0.52	0.54
B	0.58	0.51	0.49
BE	0.54	0.49	0.48
Bt, f	0.78	0.71	0.67
BC	0.69	0.65	0.61
C	0.62	0.59	0.52

ся в импактной зоне техногенного загрязнения: концентрация серы повышается в 2–6 раз, свинца – в 5–17, кадмия – в 4–10 раз в сравнении с фоновыми значениями. Расчет корреляций между содержанием элементов-поллютантов в хвое и горизонтах почв показал, что это связи высокого уровня значимости (табл. 2).

Они свидетельствуют о наличии активного поступления поллютантов (серы, свинца, кадмия) из почвенных горизонтов через корневую систему с ксилемным током в ассимиляционные органы растений.

Высокая аккумуляция элементов-поллютантов вызывает нарушение соотношения биогенных элементов в хвое деревьев. Показано, что возрастание доли серы, кадмия и особенно свинца в хвое приводит к значимому уменьшению в ней долей биогенных элементов (табл. 3).

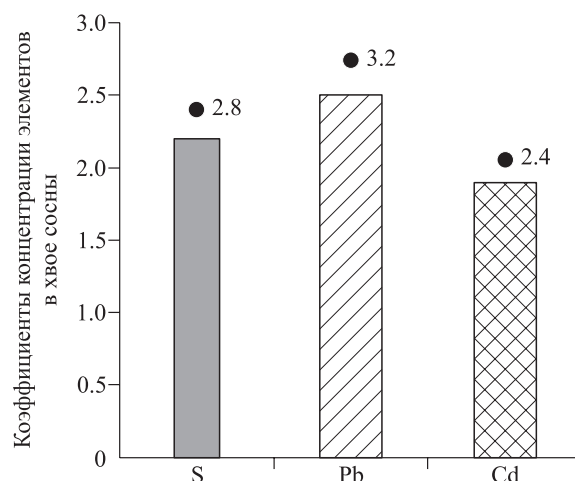
Таблица 3. Изменение соотношений (%) концентраций элементов в хвое и листьях деревьев на загрязненных и фоновых территориях

Соотношение элементов	Импактная зона	Буферная зона	Фоновая территория
Ca : S	85 : 15	90 : 10	96 : 4
Mg : S	80 : 20	87 : 13	93 : 7
K : S	76 : 24	81 : 19	92 : 8
Na : S	72 : 28	77 : 23	91 : 9
Ca : Pb	90 : 10	95 : 5	97 : 3
Mg : Pb	80 : 20	88 : 12	94 : 6
K : Pb	70 : 30	79 : 21	92 : 8
Na : Pb	68 : 32	75 : 25	91 : 9
Ca : Cd	95 : 5	98 : 2	99 : 1
Mg : Cd	87 : 13	92 : 8	97 : 3
K : Cd	79 : 21	86 : 14	94 : 6
Na : Cd	76 : 24	82 : 18	92 : 8

В зоне импактного загрязнения Усольского промышленного центра в ассимиляционных органах деревьев самое сильное снижение уровня биогенных элементов на фоне увеличения концентраций элементов-поллютантов. В буферной зоне дисбаланс элементов в хвое деревьев меньше, но он явно выражен в сравнении с фоновыми территориями.

Следовательно, на загрязненных почвах обнаружено нарушение режима питания деревьев сосны вследствие недостатка основных элементов-биогенов. Следует отметить существенную роль аэрального поглощения хвоей деревьев элементов-поллютантов из загрязненного воздуха в дисбалансе соотношений элементов-биогенов и нарушении минерального питания сосны. Об активности этого пути поступления загрязняющих веществ можно судить по сопоставлению коэффициентов концентрации элементов-поллютантов в хвое с кратностью превышения их ПДК в загрязненном атмосферном воздухе в пределах промышленного центра (рис. 5).

Прослеживается хорошо выраженное соответствие между превышением ПДК и превышением накопления поллютантов в хвое относительно фоновых уровней, т. е. коэффициентами концентрации. Кроме того, при поглощении поллютантов в процессе газообмена одновременно нарушаются и минеральное питание, и процесс фотосинтеза. В дальнейшем негативное изменение питательного режима деревьев сосны на загрязненной территории проявляется в угнетении их ростовых процессов, в первую очередь ассимиляционных органов. Так, в импактной

**Рис. 5.** Накопление элементов-поллютантов в хвое деревьев сосны при превышении их ПДК (показаны черными кружками) в атмосферном воздухе промышленного центра Усолье-Сибирское.

зоне загрязнения масса одной хвоинки уменьшается в 2 раза в сравнении с фоновой, масса хвои на побеге – в 4.5–5, охвоенность побега – в 2–3 раза, продолжительность жизни хвои сокращается до 2–3 лет, уровень дефолиации крон возрастает до 50–60 %. Таким образом, морфоструктурные показатели древесных растений свидетельствуют о сильном повреждающем воздействии промышленного загрязнения Усольского промышленного центра на жизненное состояние древесных растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован комплекс биогеохимических показателей сосновых лесов в импактной и буферной зонах влияния аэротехногенного загрязнения от крупного промышленного центра Иркутской области, расположенного в северной части г. Усолье-Сибирское. Установлено, что техногенное воздействие привело к существенному смещению баланса среды в сторону щелочных значений: $pH_{\text{водн}}$ в лесной подстилке может достигать 7.8–8.2, а в верхних горизонтах почв – 7.6–8.0. Нарушенный кислотно-щелочной баланс вызвал изменение миграционных потоков элементов-поллютантов в почве. Выявлены активное перемещение и накопление сульфат-иона и подвижных форм свинца и кадмия во всех горизонтах серых лесных почв, вплоть до почвообразующего, при этом их содержание превышало фоновые значения в 14–28 раз. Показано, что подвижные формы тяжелых металлов и серы изменяют миграционную способность и количественный состав обменных катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ в ППК гумусовых и минеральных горизонтов. Связывание ионов ППК с токсичными ионами может рассматриваться как одна из основных причин нарушения биогеохимической миграции биогенных элементов в профиле почв, изменения их питательного режима, снижения миграционного потока биогенов в корневые системы растений. Показано, что активное поступление элементов-поллютантов из почвы и загрязненного воздуха в ассимиляционные органы деревьев приводит к дисбалансу элементов-биогенов и, как следствие, к подавлению ростовых процессов. Поскольку исследованные биогеохимические показатели характеризуются взаимообусловленным изменением в компонентах лесной экосистемы, они могут служить адекватными критериями для оценки ее состояния в условиях техногенного загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В. А. Экологическая геохимия: учеб. для вузов по естест.-науч. спец. М.: Логос, 2000. 627 с.
- Атлас. Иркутская область: экологические условия развития. М.: Роскартография; Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2004. 90 с.
- Батуев А. Р., Белов А. В., Воробьев В. В. Региональный экологический атлас (концепция, проблематика, научное содержание). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 321 с.
- Безуглова О. С., Орлов Д. С. Биогеохимия. Учеб. для студ. вузов. Ростов н/Д: Феникс, 2000. 320 с.
- Воробьева Г. А. Классификация и систематика почв южной (освоенной) части Иркутской области: метод. указ. Ч. 1. Иркутск: Облмашинформ, 1999. 47 с.
- Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2016 году». Иркутск: Мегапринт, 2017. 274 с.
- Кайгородова С. Ю., Воробейчик Е. Л. Трансформация некоторых свойств серых лесных почв под действием выбросов медеплавильного комбината // Экология. 1996. № 3. С. 187–193.
- Классификация и диагностика почв СССР / Сост. В. В. Егоров, В. М. Фридланд, Е. Н. Иванова, Н. Н. Розов, В. А. Носин, Т. А. Фриев. М.: Колос, 1977. 225 с.
- Латыпова В. З. Факторы формирования кислотно-основных свойств природной среды // Соросовск. образоват. журн. 2000. Т. 6. № 7. С. 47–52.
- Маслова И. Я. Воздействие содержащих серу аэротехногенных веществ на некоторые агрохимически значимые процессы и свойства почв // Агрохимия. 2008. № 6. С. 80–94.
- Медведев И. Ф., Деревягин С. С. Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов: Ракурс, 2017. 178 с.
- Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / Под ред. Н. Г. Зырина, С. Г. Малахова. М.: Гидрометеоиздат, 1981. 108 с.
- Методы биохимического исследования растений / А. И. Ермаков, В. В. Арасимович, М. И. Смирнова-Иконникова, Н. П. Ярош, Г. А. Луковникова. Под ред. А. И. Ермакова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Агропромиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. 430 с.
- Михайлова Т. А., Калугина О. В., Шергина О. В. Динамика состояния сосновых лесов Предбайкалья в условиях воздействия антропогенных факторов // Сиб. лесн. журн. 2017. № 1. С. 44–55.
- Михайлова Т. А., Шергина О. В. Биогеохимическая миграция элементов-загрязнителей в урбоэкосистеме // Теор. прикл. экол. 2010. № 3. С. 27–32.
- Михайлова Т. А., Шергина О. В., Калугина О. В. Характеристики питательного статуса сосновых древостоев Байкальской природной территории // Раст. рес. 2016. Т. 52. № 1. С. 28–48.
- Мотузова Г. В. Принципы и методы почвенно-химического мониторинга. М.: Изд-во МГУ, 1988. 99 с.
- Мотузова Г. В. Загрязнение почв и сопредельных сред. М.: Изд-во Московск. ун-та, 2000. 71 с.

- Мотузова Г. В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. Учебник. Изд. 3-е. М.: Либроком, 2013. 168 с.
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2016 год. М.: Росгидромет, 2017. 216 с.
- Орлов Д. С., Садовникова Л. К., Суханова Н. И. Химия почв. М.: Высш. шк., 2005. 558 с.
- Руководящий документ. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.186-89. Дата введения 01.07.1991 г. М.: Гос. комитет СССР по гидрометеорологии; Мин-во здравоохранения СССР, 1991. 615 с.
- Строганова М. Н., Прокофьева Т. В., Прохоров А. Н., Лысак Л. В., Сизов А. П., Яковлев А. С. Экологическое состояние городских почв и стоимостная оценка земель // Почвоведение. 2003. № 7. С. 867–875.
- Федорец Н. Г., Бахмет О. Н. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: Карельск. науч. центр РАН, 2003. 240 с.
- Фокин А. Д., Евдокимова А. В., Гозный С. В., Грачева Н. М. Миграция сульфатов и масштабы их накопления в почвах подзолистого типа // Почвоведение. 1982. № 10. С. 27–35.
- Шергина О. В., Михайлова Т. А. Биогеохимическое перераспределение свинца в урбоэкосистеме (на примере г. Иркутска) // Химия в интересах устойчивого развития. 2011. Т. 19. № 2. С. 203–209.
- Шпиунов А. Б., Балдин Е. М., Волкова П. А., Коробейников А. И., Назарова С. А., Петров С. В., Суфиянов В. Г. Наглядная статистика. Используем R! М.: ДМК Пресс, 2014. 298 с.
- Экологический энциклопедический словарь / Гл. ред. А. С. Мони́н. М.: Ноосфера, 1999. 930 с.
- Alewel C. Predicting reversibility of acidification: the European sulfur story // Water, Air, & Soil Pollut. 2001. V. 130. Iss. 1–4. P. 1271–1276.
- Alewel C., Matzner E. Reversibility of soil solution acidity and of sulfate retention in acid forest soils // Water, Air, & Soil Pollut. 1993. V. 71. Iss. 1–2. P. 155–165.
- Burrascano S., Sabatini F. M., Blasi C. Testing indicators of sustainable forest management on understory composition and diversity in southern Italy through variation partitioning // Plant Ecol. 2011. V. 212. Iss. 5. P. 829–841.
- De Vries W., Groenenberg J. E. Evaluation of approaches to calculate critical metal loads for forest ecosystems // Environ. Pollut. 2009. V. 157. Iss. 12. P. 3422–3432.
- Dmichowski W., Brogowski Z., Baczevska A. H. Evaluation of vigor and health of «street» trees using foliar ionic status // Polish J. Environ. Stud. 2011. V. 20. N. 2. P. 489–496.
- Hovland J. The effect of artificial acid rain on respiration and cellulase activity in Norway spruce needle litter // Soil Biol. Biochem. 1981. V. 13. Iss. 1. P. 23–26.
- Hue N. V., Evans C. E. A computer-assisted method for CEC estimation and quality control in a routine soil-test operation // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 1983. V. 14. Iss. 8. P. 655–667.
- Lindenmayer D. B., Margules C. R., Botkin D. B. Indicators of biodiversity forecologically sustainable forest management // Conserv. Biol. 2000. V. 14. N. 14. P. 941–950.
- Makarov M. I., Nedbayev N. P., Okuneva R. M. Adsorption of sulphates by forest soils as affected by anthropogenic acidification // Moscow Univ. Soil Sci. Bull. 1995. V. 50. N. 1. P. 27–33.
- Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE, ICP Forests, Hamburg, Germany, Inst. World Forestry, 2010. <http://www.icp-forests.org/Manual.htm>
- Moffat A. J. Indicators of soil quality for UK forestry // Forestry. 2003. V. 76. Iss. 5. P. 547–568.
- Paoletti E., Schaub M., Matyssek R., Wieser G., Augustaitis A., Bastrup-Birk A. M., Bytnerowicz A., Günthardt-Goerg M. S., Müller-Starck G., Serengil Y. Advances of air pollution science: From forest decline to multiple-stress effects on forest ecosystem services // Environ. Pollut. 2010. V. 158. Iss. 6. P. 1986–1989.
- Pierzynski G. M., Sims J. T., Vance G. F. Soils and Environmental Quality. 3rd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005. 569 p.
- Piirainen S., Finér L., Starr M. Deposition and leaching of sulphate and base cations in a mixed boreal forest in Eastern Finland // Water, Air, & Soil Pollut. 2002. V. 131. Iss. 1–4. P. 185–204.
- Schabenberger O., Pierce F. J. Contemporary statistical models for the plant and soil sciences. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001. 738 p.
- Schroth A. W., Friedland A. J., Bostick B. C. Macronutrient depletion and redistribution in soils under conifer and northern hardwood forests // Soil Sci. Soc. Amer. J. 2007. V. 71. N. 2. P. 457–468.
- Selim H. M., Gobran G. R., Guan X., Clarke N. Mobility of sulfate in forest soils: kinetic modeling // J. Environ. Qual. 2004. V. 33 N. 2. P. 488–495.
- Shamrikova E. V., Ryazanov M. A., Vanchikova E. V. Acid-base properties of water-soluble organic matter of forest soils, studied by the pK-spectroscopy method // Chemosphere. 2006. V. 65. P. 1426–1431.
- Soil sampling and methods of analysis. 2nd ed. / M. R. Carter, E. G. Gregorich (Eds.). Boca Raton, Florida: CRC Press, 2007. 1224 p.
- Soil Survey Laboratory Methods Manual / R. Burt (Ed.). Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 4.0. November 2004. Washington D. C., U.S.: USDA, Nat. Res. Conserv. Serv., 2004. 701 p.
- Vašát R., Pavlů L., Borůvka L., Tejnecký V., Nikodem A. Modelling the impact of acid deposition on forest soils in North Bohemian Mountains with two dynamic models: the Very Simple Dynamic Model (VSD) and the Model of Acidification of Groundwater in Catchments (MAGIC) // Soil & Water Res. 2015. V. 10. N. 1. P. 10–18.
- Zhang P. C., Sparks D. L. Kinetics and mechanisms of sulfate adsorption/desorption on goethite using pressure-jump relaxation // Soil Sci. Soc. Amer. J. 1990. V. 54. Iss. 5. P. 1266–1273.

CHANGE OF BIOGEOCHEMICAL INDEXES IN PINE FORESTS UNDER TECHNOGENIC POLLUTION

O. V. Shergina, T. A. Mikhailova, O. V. Kalugina

*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry,
Russian Academy of Science, Siberian Branch
Lermontov str., 132, Irkutsk, 664033 Russian Federation*

E-mail: sherolga80@mail.ru, mikh@sifibr.irk.ru, olignat32@inbox.ru

Studies of *Pinus sylvestris* L. forests in the impact (5–10 km) and buffer (11–40 km) technogenic pollution zones in the vicinity of a large industrial centre Usol'e-Sibirskoe of Irkutsk Oblast have been conducted in 2013–2016. Changes of biogeochemical indexes (acid-base balance, accumulation and migration of pollutants and biogenic elements) in the components of a forest ecosystem, such as pine trees, organic litter, and soil horizons were determined. It has been shown that the displacement of acid-base balance to the alkaline range and the active migration of pollutant elements in soil horizons and organic litter are the key processes that cause the violation of the exchange reactions of the Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ cations in a soil absorbing complex as well as decreasing the migration of nutrient elements to the root systems of pine trees. The pronounced changes in the acid-base balance, the high accumulation of pollutant elements, binding of biogenic elements by pollutants in the horizons of soil profiles and plant tissues lead to the disruption of nutrition and inhibition of growth processes in pine trees. The biogeochemical indicators under study are characterized by interconnected changes in the components of the forest ecosystem and can serve as adequate criteria for assessing its state under technogenic pollution. Therefore, the obtained results provide information on the nutrient cycling in pine forests, role of industrial emission elements, their migration and accumulation in individual components of the ecosystem.

Keywords: *pine Pinus sylvestris* L. forests, technogenic pollution, soil profile, acid-base balance, biogeochemical migration of pollutant elements, imbalance of nutrient element.

How to cite: Shergina O. V., Mikhailova T. A., Kalugina O. V. Change of biogeochemical indexes in pine forests under technogenic pollution // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2018. N. 4. P. 29–38 (in Russian with English abstract). DOI: 10.15372/SJFS20180404