

УДК 581.5(581.192)504.5

МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И СОСТОЯНИЯ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ НА ПРИМЕРЕ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2020 г. Т. А. Михайлова^а, *, О. В. Калугина^а, О. В. Шергина^а

^аСибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН,
ул. Лермонтова, 132, а/я 317, Иркутск, 664033 Россия

*E-mail: mikh@sifibr.irk.ru

Поступила в редакцию 24.09.2018 г.

После доработки 13.11.2018 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Излагаются результаты исследования загрязнения и ослабления сосновых (*Pinus sylvestris* L.) лесов аэровыбросами промышленных центров Иркутской области в 2015–2017 гг. В ходе натурных обследований создана сеть мониторинга лесов, включающая более 150 пробных площадей, заложенных по принятым в лесном хозяйстве методикам, а также с использованием рекомендаций международного руководства ICP Forests. Об уровне загрязнения лесов судили по накоплению в хвое сосны (вида-индикатора) неорганических и органических поллютантов — серы, фтора, алюминия, лития, мышьяка, тяжелых металлов, полициклических ароматических углеводородов. Ослабление древостоев оценивали по комплексу морфоструктурных и биохимических показателей (уровню дефолиации крон, длине и массе хвои и побегов, содержанию в хвое фотосинтетических пигментов, органического кислоторастворимого фосфора, белкового и небелкового азота, углерода). Наиболее высокое накопление поллютантов в хвое выявляется на расстоянии 3–10 км от промцентров, вместе с тем превышение фоновых уровней для многих загрязняющих веществ фиксируется и на больших расстояниях (до 30–60 км). Выявлена тесная обратная корреляция между индексом жизненного состояния древостоев и накоплением поллютантов в ассимиляционных органах сосны ($R = -0.82$, $n = 45$). Показано, что ухудшение состояния древостоев на территориях, загрязняемых разными промцентрами, развивается по сходному тренду, описываемому степенной функцией. По полученным данным разработана карта-схема, показывающая территории, где сосновые древостои обнаруживают статистически значимое ухудшение показателей жизненного состояния. Ослабление лесов выражено на удалении до 20 км от большинства промцентров южной части области и до 40 км — от Братского промцентра, расположенного севернее. Лесные массивы, находящиеся на этих расстояниях, можно рассматривать как мощные фитофильтры, осаждающие основной поток техногенных аэровыбросов и поэтому требующие особых мер по охране и лесовосстановлению.

Ключевые слова: сосновые леса, техногенное загрязнение, неорганические и органические поллютанты, жизненное состояние древостоев, карта-схема, Иркутская область.

DOI: 10.31857/S0024114820020072

Для регионов нашей страны, характеризующихся мощным экономическим потенциалом, мониторинг атмосферного загрязнения лесов имеет большую значимость как один из аспектов при выполнении требований Лесного кодекса Российской Федерации, а именно той его части, где говорится, что "...при использовании лесов, охране лесов от пожаров, защите, воспроизводстве лесов, в том числе при выполнении лесосечных работ, должны соблюдаться установленные законодательством Российской Федерации требования по охране окружающей среды от загрязнения и иного негативного воздействия, включая меры по сохранению лесных насаждений, лесных почв, а также должна осуществляться, в том числе посредством лесовосстановления и лесоразведе-

ния, рекультивация земель, на которых расположены леса и которые подверглись загрязнению и иному негативному воздействию" (Статья 60.12 Лесного кодекса Российской Федерации). Соответственно, первоочередным и необходимым этапом при выполнении этих требований служит выявление территорий, проблемных по признаку техногенного загрязнения лесных экосистем. Другими словами, природоохранные организации должны руководствоваться выверенной информацией о пространственном распространении аэровыбросов и степени их воздействия на леса, чтобы оценить снижение их ресурсно-экологического потенциала и применить адекватные меры по оптимизации их состояния. Подобная информация особенно актуальна в настоящее

время, когда повсеместно уменьшаются площади малонарушенных лесов, в том числе бореальной зоны.

В азиатской части нашей страны уникальные лесные ресурсы пока еще сохранились на ряде территорий, в том числе в Иркутской области. По данным Государственного лесного реестра в 2017 г. покрытые лесной растительностью земли области занимали 64.1 млн га, что составляет 82.7% от всей ее территории. По этому показателю регион относится к числу наиболее многолесных среди субъектов Российской Федерации. Леса области представлены на 73% насаждениями с преобладанием в составе хвойных пород, на 19.4% – мягколиственных, 7.7% земель занято кустарниковыми зарослями (Атлас, 2004). Если же учитывать только древостои, то на долю хвойных приходится 81% их площади, на долю мягколиственных – 19%. Сосняки (*Pinus sylvestris* L.) занимают 15.3 млн га, или 24.5% покрытых лесом земель области. Наибольшее распространение сосна получила в равнинной и низкогорной центральной части Иркутской области, по долинам рек Ангара, Лена и их притокам (Государственный ..., 2017a). Средний класс бонитета древостоев сосны – IV. Состояние сосновых лесов области заметно ухудшилось, особенно в последнее десятилетие, вследствие усиления воздействия целого ряда неблагоприятных факторов природного и антропогенного происхождения: лесные пожары, несанкционированные рубки, вредители и болезни леса, нерациональное лесопользование и др. А такой негативный для лесов фактор, как атмосферные выбросы промышленных предприятий, часто считается малозначимым и не рассматривается как угроза лесам. Например, в Государственном докладе о состоянии окружающей среды Российской Федерации (2017б) приводится минимум информации о воздействии промышленных выбросов на леса, и, тем не менее, даже там подчеркивается, что больше всего поврежденных от выбросов древостоев регистрируется в Сибирском федеральном округе, в том числе в Иркутской области, Республике Бурятия, Забайкальском крае (около 4 тыс. га). Но, согласно экспертным оценкам, ежегодно в России от воздействия техногенных выбросов леса гибнут на площади, составляющей в среднем 20 тыс. га, а в целом по стране площадь загрязняемых лесов достигает 1.3 млн га. Еще большую площадь, оцениваемую в 18 млн га, занимают загрязненные земли вокруг промышленных объектов (Жидков, Коженков, 2014; Мартынюк, Рыкова, 2014). Отсюда следует, что техногенное загрязнение как негативный фактор наносит существенный ущерб лесам нашей страны и подлежит обязательному мониторингу со стороны природоохранных органов.

В Иркутской области нами обследовались сосновые леса в окрестностях крупных промышленных центров – Братского, Саянского, Черемхов-

ского, Ангарского, Усольского, Иркутского, Шелеховского, в которых сосредоточены предприятия теплоэнергетики, цветной металлургии, топливной, химической и нефтехимической промышленности. Общий ежегодный объем атмосферных выбросов предприятий области составляет более 640 тыс. т, при этом выраженной тенденции к его уменьшению не наблюдается (Государственный ..., 2017a). Такие объемы аэровыбросов не могут не сказаться на состоянии лесов, их ослаблении, снижении их средообразующего, средовосстанавливающего и продукционного потенциала. Между тем лесные ресурсы служат одним из главнейших элементов экономической базы региона. Так, в структуре экономики Иркутской области удельный вес отраслей лесопромышленного комплекса составляет около 24% (Иркутская область. Официальный сайт. Электронный ресурс). А значимость лесов как стабилизаторов природной среды региона вообще не поддается измерению, она огромна и многогранна. Отсюда вытекает актуальность разработки и применения эффективных методов мониторинга, позволяющих с наибольшей достоверностью диагностировать изменения состояния этого важнейшего ресурса, в том числе в условиях техногенеза. В этом плане значительным преимуществом отличаются методы, использующие биологические индикаторы, или мониторы, поскольку они дают возможность определить не только уровень загрязнения лесов, но и распространение загрязненных воздушных масс по территории, исходя из данных о пространственной динамике накопления поллютантов в биологических объектах. Более того, биологические индикаторы позволяют одновременно оценить и негативный эффект техногенных эмиссий для биоты, в данном случае для компонентов лесных экосистем, а именно, выявить степень их ослабления, скорость развития патологического процесса и активность защитных реакций.

Нами в качестве биоиндикатора состояния лесных экосистем была выбрана сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Этот вид, помимо широкого распространения и важных лесообразующих функций, обладает высокой чувствительностью к антропогенным воздействиям, включая атмосферное загрязнение. Наши многолетние исследования показали, что хвоя сосны является по существу универсальным биоаккумулятором, поскольку может накапливать из загрязненного воздуха как неорганические поллютанты (диоксид серы, фтористый водород, аэрозоли тяжелых металлов, алюминия, кремния и др.), так и стойкие органические загрязнители, в частности, полициклические ароматические углеводороды (Mikhailova et al., 2008; Kalugina et al., 2017). Средняя продолжительность жизни хвои сосны в регионе на фоновых (незагрязненных) территориях составляет 5–

7 лет, а при воздействии атмосферных поллютантов (в зависимости от типа эмиссий, интенсивности их влияния) она может сокращаться до 2–3 лет. При анализе накопления поллютантов в разновозрастной хвое сосны показано, что для большинства из них эта динамика не линейна, хотя уровень токсикантов может быть несколько выше в хвое старших возрастов. Но, поскольку вблизи крупных промышленных центров не всегда обнаруживается даже 3-летняя хвоя, для мониторинга используется хвоя второго года жизни. На примере сосны показано также, что воздействие атмосферных поллютантов на растения носит системный характер, нарушая по существу метаболизм в целом. Прежде всего происходит нарушение фотосинтеза и дыхания, азотного, углеводного, минерального обменов, на уровне организма – угнетение процессов роста и развития и в целом снижение продуктивности. В соответствии с изложенным, целью данной работы – на основе применения в качестве биоиндикатора сосны обыкновенной выявить уровень аэротехногенного загрязнения лесов выбросами промышленных центров и оценить степень ослабления древостоев по ряду морфоструктурных и биохимических показателей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Натурные обследования лесов проводились в Иркутской области в 2015–2017 гг. в окрестностях основных промышленных центров: Братского, Саянского, Черемховского, Усольского, Ангарского, Иркутского, Шелеховского. Была создана сеть мониторинга лесов, включающая более 150 пробных площадей, заложенных по принятым в лесном хозяйстве методикам, а также с использованием рекомендаций международного руководства ICP Forests (Методические ... 1981; Пробные ..., 1990; Manual ..., 2010). Закладка пробных площадей осуществлялась с учетом расположения промышленных источников загрязнения, регионального переноса атмосферного воздуха, специфики локальной циркуляции воздушных масс, особенностей рельефа и гидросети. Пробные площади располагались в основном в подтаежных лесах, в которых доминируют сосняки разнотравные и разнотравно-брусничные III–IV класса бонитета. На каждой пробной площади производился отбор образцов хвои сосны для последующего анализа на содержание загрязняющих веществ. Фоновые (контрольные) образцы хвои сосны отбирали на расстоянии не менее 100 км от промцентров по направлениям, не подпадающим под основной перенос выбросов. Анализировали хвою второго года жизни как наиболее физиологически активную, отобранную из средней части крон 5–6 деревьев 40-летнего возраста. Поскольку спектр поллютантов, поступающих с аэровы-

бросами, очень широк, были выбраны главные поллютанты-маркеры, адекватно отражающие уровень загрязнения лесов, его специфику и территориальное распространение. В частности, в хвое сосны определяли содержание серы, фтора, алюминия, лития, мышьяка, тяжелых металлов (свинца, кадмия, ртути, никеля, бария, цинка, железа, ванадия, вольфрама, молибдена, стронция, тория), а также полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), являющихся маркерами загрязнения лесов стойкими органическими загрязнителями (СОЗ). Содержание элементов в хвое определяли методами пламенной фотометрии, атомно-абсорбционной спектрофотометрии и фотоколориметрирования по сертифицированным методикам с использованием оборудования центров коллективного пользования ИИЦ СО РАН “Ультрамикрoанализ” и “Байкальский аналитический центр”. Чтобы проследить проявление негативного эффекта техногенных эмиссий для лесов, параллельно на каждой пробной площади оценивалась степень ослабления деревьев сосны по комплексу показателей – морфоструктурных и биохимических. В частности, оценивали уровень дефолиации крон деревьев (Bosshard, 1986), измеряли длину побегов с точностью до 1 мм, определяли массу хвои с точностью до 0.01 мг. Объем ствола рассчитывали по формуле, приведенной в работе В.И. Костюка с соавт. (2009). Биохимические изменения оценивали по содержанию в хвое сосны фотосинтетических пигментов, органического кислоторастворимого фосфора, белкового и небелкового азота, углерода (Методы ..., 1987). Для статистической обработки всех полученных данных использовали программу “Среда статистических вычислений R”, версия 3.1.1. (2014 г.). В работе приведены средние величины каждого параметра и их стандартные отклонения, принята достоверность различий при $P \leq 0.05$, коэффициент корреляции рассчитывали по Пирсону (Dalgaard, 2008). Построение карты-схемы выполнено в графической программе CorelDraw X3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные о накоплении в хвое сосны неорганических и органических поллютантов показывают, что уровень техногенного загрязнения лесов эмиссиями промцентров довольно значителен (табл. 1). Даже на расстоянии 10 км от него превышение фонового содержания поллютантов в хвое может составлять от 4 до 70 раз. В меньшей степени загрязнены древостои, прилегающие к Саянскому промузлу, вследствие географического его расположения, при котором значительная доля аэровыбросов разносится вместе с преобладающим атмосферным переносом воздушных масс в южном направлении, до г. Зи-

Таблица 1. Содержание неорганических (S, F, Al, Li, As, Pb, Cd, Hg, Ni, Ba, Zn, Fe, V, W, Mo, Sr, Th) и органических (ПАУ) поллютантов в хвое сосны обыкновенной на территориях, прилегающих к промышленным центрам Иркутской области (на расстоянии 3–10 км)

| Промцентр | Содержание поллютантов | | Кратность превышения в хвое фонового уровня поллютантов | |
|--------------|------------------------|------------------|---|--------------|
| | Σ неорганических* | Σ органических** | неорганических | органических |
| Братский | 2934 ± 297 | 3950 ± 368 | 7.0–7.3 | 70.3–71.5 |
| Саянский | 962 ± 134 | 110 ± 11 | 2.2–2.5 | 1.8–2.2 |
| Черемховский | 1514 ± 162 | 170 ± 19 | 3.5–3.9 | 2.9–3.2 |
| Усольский | 1343 ± 120 | 266 ± 30 | 3.1–3.4 | 4.6–4.9 |
| Ангарский | 1532 ± 146 | 235 ± 43 | 3.6–4.1 | 4.1–4.3 |
| Иркутский | 1784 ± 152 | 257 ± 38 | 4.2–4.5 | 4.4–4.7 |
| Шелеховский | 1682 ± 179 | 1650 ± 147 | 4.0–4.3 | 29.0–31.0 |

* В мг кг⁻¹.

** В нг г⁻¹ сух. массы хвои.

ма и далее. Расположение и природные условия большинства других промцентров (сильно расчлененный горный рельеф, частая повторяемость мощных приземных инверсий, интенсивные речные туманы), напротив, не способствуют активному рассеиванию эмиссий и очищению приземного слоя атмосферного воздуха, соответственно, уровень загрязнения древостоев здесь гораздо выше.

Что касается отдельных поллютантов, то высокие концентрации серы в хвое (до 0.082% от сух. вещества хвои при фоновом значении 0.031%) регистрируются вблизи всех промцентров. Это объясняется широким распространением диоксида серы, его присутствием в атмосферных выбросах практически всех промышленных предприятий. Наибольший уровень фтора (0.012–0.019% при фоновой величине 0.001%) в хвое сосны обнаружен на территориях, прилегающих к алюминиевым заводам, входящим в состав Братского и Шелеховского промышленных центров. Вблизи Черемховского и Ангарского промцентров выявлено значительное загрязнение хвои мышьяком (до $24 \times 10^{-6}\%$, фоновое значение $3 \times 10^{-6}\%$). Повышенный уровень ртути (от 1.5 до $3.0 \times 10^{-6}\%$, фоновое значение не превышает $0.5 \times 10^{-6}\%$) в хвое обнаружен в окрестностях Саянского и Усольского промцентров, а также на территории Иркутского промцентра. Загрязнение хвои свинцом регистрируется практически на всех территориях, прилегающих к промышленным центрам, при этом накопление этого элемента в хвое превышает фоновое в 15–30 раз. Наиболее загрязнены свинцом древостои вблизи Иркутского и Братского промцентров, во многом это обусловлено большим объемом выбросов автотранспорта (до 60% от всего объема загрязняющих веществ). Концентрации других тяжелых металлов (никеля, ванадия, молибдена, вольфрама, кадмия) наиболее высоки в хвое сосны вблизи Братского, Иркут-

ского, Ангарского промцентров, где превышение их фоновых уровней составляет от 8 до 35 раз. Обнаружено также повышенное содержание стронция и тория в хвое сосны (превышающее фоновое от 3 до 9 раз) на пробных площадях вблизи Черемховского, Ангарского, Усольского, Иркутского промцентров. При удалении от источников загрязнения уровни поллютантов в хвое постепенно снижаются и приближаются к фоновым на расстоянии 20–40 км, это характерно для серы, фтора, аэрозолей тяжелых металлов, алюминия.

При исследовании накопления в хвое сосны ПАУ (маркеров загрязнения атмосферного воздуха CO₃) высокий их уровень (сумма 20 соединений) зарегистрирован в хвое сосны на территориях, непосредственно прилегающих к промцентрам (табл. 1), а наибольший – вблизи Шелеховского промцентра (1500 – 1700 нг г⁻¹), где располагается алюминиевый завод – один из мощных источников выбросов CO₃. Такие концентрации ПАУ, превышающие фоновые до 30 раз, выявлены на удалении до 3 км от завода. На большем расстоянии сумма ПАУ снижается, однако в 20 км она еще остается несколько выше фоновой. При анализе хвои показано преобладание в ней доли ПАУ, имеющих в структуре 3–4 ароматических кольца (фенантрен, флуорантен, пирен, хризен и др.), а доля соединений с 5–6 кольцами (бенз[а]пирен, бенз[е]пирен, бенз[б]флуорантен и др.) значительно ниже, однако именно они характеризуются особенно высокой токсичностью для биоты (Ракитский, Турусов, 2005). Полученные данные указывают на преимущественно локальное распространение ПАУ от Шелеховского и других промцентров южной части области.

О загрязнении лесов вблизи Братского промышленного центра, расположенного севернее, на территории с более жесткими природными условиями, чем в южной части области, следует

Таблица 2. Показатели ослабления деревьев сосны вблизи крупных промышленных центров Иркутской области (на расстоянии 3–10 км)

| Показатель | Промышленный центр | | | | | Фоновые территории |
|---|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|
| | Братский | Усольский | Ангарский | Иркутский | Шелеховский | |
| Уровень дефолиации крон, % | 75–80 | 55–60 | 55–60 | 55–60 | 60–65 | 15–20 |
| Объем ствола, м ³ | 0.17 ± 0.03 | 0.41 ± 0.06 | 0.58 ± 0.07 | 0.44 ± 0.09 | 0.55 ± 0.03 | 0.94 ± 0.08 |
| Масса хвои на побеге, г | 0.86 ± 0.11 | 2.19 ± 0.53 | 1.11 ± 0.36 | 1.99 ± 0.62 | 2.19 ± 0.43 | 4.18 ± 0.65 |
| Масса одной хвоинки, мг | 6.46 ± 0.18 | 7.68 ± 0.09 | 8.32 ± 0.04 | 10.59 ± 0.05 | 8.67 ± 1.52 | 21.99 ± 3.59 |
| Длина побега, см | 5.37 ± 1.19 | 6.34 ± 0.62 | 9.99 ± 1.21 | 15.53 ± 3.40 | 10.75 ± 2.48 | 19.60 ± 2.79 |
| Содержание хлорофилла в хвое, мг г ⁻¹ | 1.38 ± 0.24 | 4.21 ± 0.31 | 3.68 ± 0.41 | 4.04 ± 0.48 | 3.22 ± 0.57 | 9.98 ± 0.22 |
| Содержание углерода в хвое, % | 28.68 ± 0.27 | 41.77 ± 0.30 | 42.25 ± 0.75 | 33.96 ± 0.53 | 31.58 ± 0.84 | 46.15 ± 0.49 |
| Соотношение белково-го и небелкового азота в хвое | 2.35 ± 0.19 | 4.02 ± 0.35 | 3.44 ± 0.23 | 3.30 ± 0.17 | 3.45 ± 0.38 | 6.26 ± 1.35 |

сказать подробнее. Это наиболее крупный на территории Иркутской области источник техногенных эмиссий, включающий более 40 предприятий, в том числе мощный алюминиевый завод. Ежегодный суммарный объем выбросов этого промцентра достигает 110 тыс. тонн (Государственный..., 2017а). При анализе хвои сосны обнаружено очень высокое накопление в ней неорганических элементов-поллютантов в радиусе 5–10 км от промцентра (табл. 1). С увеличением расстояния от источника эмиссий уровень загрязняющих элементов в хвое снижается, однако количество фтора остается выше фоновых значений на расстоянии до 60 км, цинка, свинца, кадмия – до 50 км, серы – до 40 км, железа и меди – до 35 км от этого промцентра, преимущественно в северо-восточном и юго-восточном направлениях, соответствующих преобладающему атмосферному переносу выбросов. Загрязнение ПАУ также наиболее выражено на расстоянии до 3–10 км от источника эмиссий и максимально может достигать 6000 нг г⁻¹ (на территории промзоны), на расстоянии 10 км оно еще значительно превышает фоновое – до 60–70 раз, далее оно снижается и на удалении более 60 км соответствует фоновым концентрациям. Дальний перенос ПАУ от Братского промцентра обусловлен легколетучими ПАУ, имеющими 3–4 ароматических кольца в структуре и составляющими 70–90% от их общего содержания в хвое. ПАУ, имеющие 5–6 ароматических колец в структуре, как правило, адсорбированы на твердых носителях (пыль, сажа) и характеризуются более низкой летучестью, но высокой токсичностью (Kalugina et al., 2018). Среди них самой сильной канцерогенной активностью обладает бенз[а]пирен, его максимальный уровень выявляется в хвое сосны (единичные деревья) на расстоянии до 3 км от Братского промцентра. Кроме того, вблизи промцентра в хвое накапливаются и другие ток-

сичные соединения с пятью-шестью ароматическими кольцами в структуре: бенз[б]флуорантен, бенз[к]флуорантен, перилен, бенз[е]пирен, индено[1,2,3-с,d]пирен, бенз[g,h,i]перилен, дибенз[а,h]антрацен, что подтверждает техногенный характер загрязнения лесов.

Воздействие техногенного загрязнения привело к ослаблению сосновых лесов, о чем свидетельствуют изменения ряда морфоструктурных и биохимических показателей физиологического состояния деревьев (табл. 2). Так, уровень дефолиации крон деревьев очень высок – до 60–65%, а вблизи Братского промцентра он достигает 80%, причем, на удалении 4–5 км от него, на более близком расстоянии древостоев как таковых по существу нет, присутствуют только одиночные сильно угнетенные деревья. На значительное ухудшение состояния ассимилирующей фитомассы деревьев вблизи промцентров указывает существенное снижение параметров хвои и побегов – длина побегов второго года жизни уменьшена в 2–4 раза, масса хвои на них – в 2–5 раз, масса одной хвоинки – в 2–3.5 раза в сравнении с фоновыми показателями. Содержание фотосинтетических пигментов (суммы хлорофиллов А и В) снижено в среднем в 2.7 раз, вблизи Братского промцентра – в 7 раз. Такой выраженный недостаток хлорофилла в хвое отражает снижение потенциальной фотосинтетической способности растений, следовательно, активности ростовых процессов. Установлено, что в хвое угнетенных деревьев значительно снижено и содержание углерода – на фоновой пробной площади углерод составляет 46% от сух. массы хвои, в то время как на пробных площадях вблизи промцентров – в среднем 36%, а при расчете содержания углерода на массу одной хвоинки снижение более резкое – максимально до 2.5 раз по сравнению с фоновым значением, что связано с уменьшением как раз-

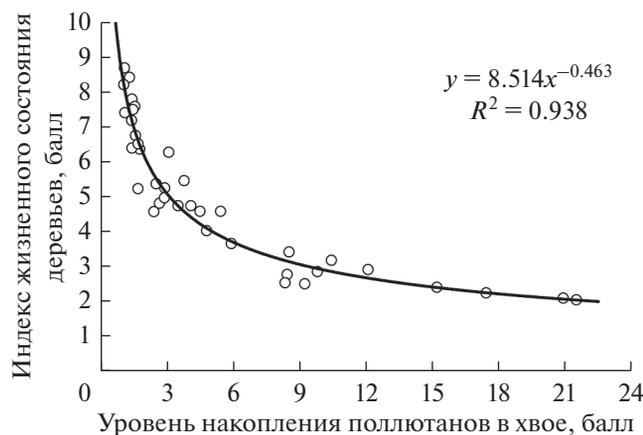


Рис. 1. Зависимость индекса жизненного состояния сосновых древостоев от уровня накопления элементов-поллютантов в хвое.

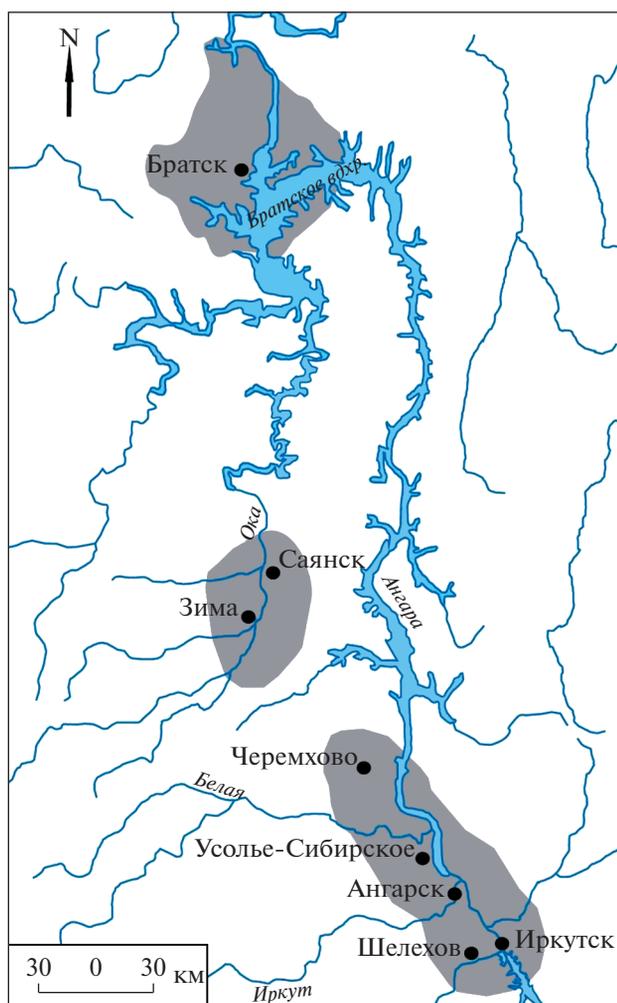


Рис. 2. Карта-схема расположения участков сосновых лесов, ослабленных выбросами промышленных центров Иркутской области.

меров, так и массы хвоинок. Эти данные свидетельствуют о значительном снижении уровня органического вещества в хвое, что является косвенным подтверждением замедления биосинтеза сложных соединений. На дефицит полимеров, в том числе макроэргических соединений (лабильных форм фосфорных соединений, а также фосфорных эфиров сахаров), указывает и падение в 1.5–3.1 раза содержания органического кислоторастворимого фосфора в хвое деревьев вблизи промцентров. Другим информативным показателем ослабления жизненного состояния деревьев служит изменение соотношения белкового и небелкового азота в хвое в сторону уменьшения за счет накопления небелковых веществ (Михайлова и др., 2006). Судя по полученным данным, этот показатель довольно резко снижается в хвое деревьев вблизи промцентров (табл. 2), что еще раз подтверждает наличие нарушений их физиологического состояния.

На основе исследованных показателей рассчитывался индекс жизненного состояния древостоев для каждой пробной площади. Он вычислялся как средний балл от суммы всех показателей, выраженных в единицах, нормированных относительно фоновых значений, которые принимались за 10 баллов. Накопление поллютантов в хвое также вычислялось в баллах, при этом фоновое содержание элементов принималось за 1 балл. Подобная формализация позволяет снизить субъективность проводимых оценок и сопоставить несоизмеримые между собой по размерности параметры. Далее выявлялась связь между рассчитанным индексом жизненного состояния древостоев и накоплением поллютантов в ассимиляционных органах сосны. В результате обнаружена тесная обратная корреляция ($R = -0.82$, $n = 45$) между этими параметрами. Исходя из этого показано, что ухудшение состояния древостоев на территориях, загрязняемых разными промцентрами, развивается по сходному тренду, описываемому степенной функцией (рис. 1). Формализованный подход подтверждает наличие ослабления лесов, обусловленного воздействием именно техногенного загрязнения. Применяя разработанный ранее метод картографирования (Плешанов и др., 2000), на основе полученных данных была создана карта-схема, показывающая территории, где сосновые древостои обнаруживают статистически значимое ухудшение показателей жизненного состояния вследствие загрязнения техногенными эмиссиями промышленных центров (рис. 2). В южной части области такие участки ослабленных сосновых лесов выявляются на расстоянии до 20 км от промцентров, в северной части — до 40 км. Следовательно, значительное ухудшение жизненного состояния древостоев обнаруживается на территориях наибольшего техногенного загрязнения. Отсюда следует, что прилегающие к пром-

центрам лесные массивы шириной 20–40 км можно рассматривать как мощные фитофильтры, осаждающие основной поток техногенных аэро-выбросов и поэтому требующие разработки особых мер по охране и лесовосстановлению.

Заключение. Мониторинг техногенного загрязнения и ослабления сосновых лесов проведен на основе интеграции натуральных, химико-аналитических, биохимических, статистических, картографических методов. В результате получен значительный массив данных, характеризующих состояние лесов на модельной территории (Иркутская область). В качестве вида-индикатора выбрана сосна обыкновенная, имеющая большую ценность для региона как лесообразователь и хозяйственный ресурс. По результатам анализа хвои сосны выявлен значительный уровень загрязнения лесов неорганическими и органическими поллютантами, поступающими с аэровыбросами промышленных центров, расположенных в южной и северной частях Иркутской области. Обнаружено, что содержание серы, фтора, мышьяка, алюминия, тяжелых металлов (свинца, никеля, ванадия, молибдена, вольфрама, кадмия, стронция, тория) в хвое древостоев, прилегающих к промцентрам, может превышать фоновое до 30–35 раз. Значителен также “вклад” СОЗ, в частности ПАУ, в техногенное загрязнение сосновых лесов региона. Сумма 20 соединений этого класса оказалась наибольшей в хвое деревьев вблизи алюминиевых заводов (Шелеховского и Братского) и превышала фоновые значения от 30 до 70 раз, соответственно. Особенно загрязнены древостои вблизи Братского промцентра, характеризующегося очень высоким объемом аэровыбросов как органических, так и неорганических поллютантов. Загрязненные леса обнаруживают выраженное ослабление, о чем свидетельствует изменение в сторону снижения морфоструктурных и биохимических параметров деревьев. Рассчитанный на их основе индекс жизненного состояния древостоев показал тесную обратную корреляцию с накоплением поллютантов в ассимиляционных органах сосны. Таким образом, подтверждается, что ослабление лесов вызвано воздействием именно техногенного загрязнения. Показано, что ухудшение состояния древостоев, загрязняемых разными промцентрами, развивается по сходному тренду, описываемому степенной функцией. Подобная формализация позволяет спрогнозировать жизненное состояние древостоев в динамике, при изменении уровня их загрязнения аэровыбросами того или иного промышленного центра. Построенная по результатам исследования карта-схема может служить информационной основой при разработке лесозащитных и лесовосстановительных мероприятий на загрязняемых территориях, она обосновывает необходимость введения особого режима пользования лесами на этих террито-

риях, включающего в том числе проведение обязательных санитарных рубок и лесопосадок, но запрет на лесозаготовительные работы. При строительстве хозяйственных объектов на этих территориях обязательна экологическая экспертиза для выявления потенциальной техногенной опасности таких объектов. Необходимость сохранения и восстановления лесов на территориях, прилегающих к промцентрам (на расстоянии до 20–40 км), крайне важна, поскольку эти леса служат своеобразным “зеленым барьером”, значимо ослабляющим перенос техногенных аэровыбросов по территории региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас. Иркутская область (экологические условия развития). М.; Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2004. 90 с.
- Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2016 г.”. Иркутск: ООО Мегапринт, 2017а. 274 с.
- Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 г.”. М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2017б. 746 с.
- Жидков А.Н., Коженков Л.Л.* Экологические проблемы охраны лесов // Лесохозяйственная информация. 2014. № 4. С. 25–32.
- Иркутская область. Официальный сайт. <http://irkobl.ru/region/economy/forest> [Электронный ресурс] (дата обращения 30.09.2018 г.).
- Костюк В.И., Мельник Н.А., Шмакова Н.Ю.* Состояние ассимилирующих органов растений в условиях техногенного загрязнения. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2009. 82 с.
- Мартынюк А.А., Рыкова Т.В.* Особенности пространственного загрязнения лесных экосистем выбросами промышленных предприятий // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2014. № 38. С. 104–110.
- Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами. М.: Гидрометеоздат, 1981. 108 с.
- Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 430 с.
- Михайлова Т.А., Бережная Н.С., Игнатьева О.В.* Элементный состав хвои и морфофизиологические параметры сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2006. 134с.
- Плешанов А.С., Михайлова Т.А., Бережная Н.С., Тоцаков С.Ю.* Методологический подход к комплексному картографированию техногенно нарушенных экосистем // Проблемы региональной экологии. Вып. 8. Матер. Второй Всерос. конф. (Томск, 15–19 мая 2000 г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. С. 44–45.
- Пробные площади лесоустроительные. ОСТ 16128-90. М.: Изд-во стандартов, 1990. 8 с.
- Ракитский В.Н., Турусов В.С.* Мутагенная и канцерогенная активность химических соединений // Вестник РАМН. 2005. № 3. С. 7–9.

Статья 60.12 “Общие положения об охране лесов от загрязнения и иного негативного воздействия”. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 03.07.2016) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2017).

Bosshard W. Kronenbilber. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen. Birmensdorf: Sanasilva, 1986. 98 S.

Dalgaard P. Introductory statistics with R. New York: Springer Science & Business Media, 2008. 363 p.

Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V. *Pinus sylvestris* as a bio-indicator of territory pollution from aluminum

smelter emissions // *Environmental Science & Pollution Research*. 2017. V 24. № 11. P. 10279–10291. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8674-5>

Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE, ICP Forests Programme Coordinating Centre. Hamburg, 2010. 477 p.

Mikhailova T.A., Pleshanov A.S. and Afanasieva L.V. Cartographic assessment of pollution of forest ecosystems on the Baikal natural territory by technogenic emissions // *Geography & Natural Resources*. 2008. V. 29. Is. 4. P. 317–320.

Monitoring of Technogenic Pollution and Pine Forests Weakening

T. A. Mikhailova¹*, O. V. Kalugina¹, and O. V. Shergina¹

¹*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, SB RAS, Lermontova st, 132, Irkutsk, 664033 Russia*

*E-mail: mikh@sifibr.irk.ru

A study was carried out to assess the pollution and weakening of pine forests by emissions from Irkutsk Oblast industrial centers in 2015–2017. As a result of field research a forest monitoring network was created, including more than 150 test sites, founded based on customary forestry methodics and ICP Forest recommendations. Pollution levels were assessed by measuring the accumulation of organic and non-organic pollutants, such as sulfur, fluorine, aluminium, lithium, arsenic, heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons. Forest stands weakening was assessed based on a complex of morphostructural and biochemical indicators (defoliation ratio, length and weight of needles and shoots, photosynthetic pigments contents in needles, organic acid-soluble phosphorus, protein and non-protein nitrogen and carbon contents). The highest pollutants content in needles was found within the 3–10 km area near the industrial centers, although the exceeding amounts of various pollutants were also found on greater distances (up to 30–60 km). There was also discovered a close inverse correlation between the vitality index of a forest stand and pollutants accumulation in pine's organs ($R = -0.82$, $n = 45$). The weakening of forest stands in areas, polluted by various industrial centers can be approximated as a power function. Based on the obtained data, a scheme map was drawn up, charting the territory of statistically significant vitality deterioration. Forests weakening is most prominent within the 20 km areas around most of the industrial centers of southern part of Irkutsk Oblast and within 40 km around the Bratsk industrial center, situated in the northern part. Forests that fall within those areas act as powerful phytofilters, sedimenting most of the technogenic pollutants and therefore demanding special protection and reforestation treatment.

Keywords: pine forests, technogenic pollution, non-organic and organic pollutants, forest stands vitality, scheme-map, Irkutsk Oblast.

REFERENCES

Atlas. Irkutskaya oblast' (ekologicheskie usloviya razvitiya), (Irkutsk Oblast Atlas (ecological conditions of development)), Moscow, Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii SO RAN, 2004, 90 p.

Bosshard W., Kronenbilber. *Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen.*, Birmensdorf: Sanasilva, 1986, 98 p.

Dalgaard P., *Introductory statistics with R*, N.Y.: Springer Science & Business Media, 2008, 363 p.

Gosudarstvennyi doklad “O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Irkutskoi oblasti v 2016 godu”, (State report: “On environmental conditions and environment preservation in Irkutsk Oblast in 2016”), Irkutsk: OOO Megaprint, 2017a, 274 p.

Gosudarstvennyi doklad “O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2016 godu”, (State report: “On environmental conditions and environment preservation in Russian Federation in 2016”), M.: Minprirody

Rossii; NIA-Priroda, 2017, 746 p.

<http://irkobl.ru/region/economy/forest> (September 30, 2018)

Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V., *Pinus sylvestris* as a bio-indicator of territory pollution from aluminum smelter emissions, *Environmental Science & Pollution Research*, 2017, Vol. 24, No. 11, pp. 10279–1029. Doi 10.1007/s11356-017-8674-5

Kostyuk V.I., Mel'nik N.A., Shmakova N.Yu., *Sostojanie assimilirujushchih organov rastenij v uslovijah tehnogenного zagryaznenija* (Condition of plants assimilating phytomass under the conditions of technogenic pollution), Apatity: Izd-vo Kol'skogo NTs RAN, 2009, 82 p.

Lesnoi kodeks Rossiiskoi Federatsii ot 04.12.2006 № 200-FZ.

Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, Hamburg: UNECE, ICP Forests Programme Coordinating Centre, 2010, 477 p.

Martynuk A.A., Rykova T.V., Osobennosti prostranstvennogo zagryazneniya lesnykh ekosistem vybrosami promyshlennykh predpriyatii (Some features of forest ecosystems

pollution emission from industrial enterprises), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2014, No. 38, pp. 104–110.

Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu polevykh i laboratornykh issledovaniy pochv i rastenii pri kontrole zagryazneniya okruzhayushchei sredy metallami, (Methodic recommendations on carrying out the field and laboratory studies of soils and plants while monitoring the level of metal pollution in the environment), Moscow: Gidrometeoizdat, 1981, 108 p.

Metody biokhimicheskogo issledovaniya rastenii, (Biochemical methods of plants studying), Leningrad: Agropromizdat, 1987, 430 p.

Mikhailova T.A., Berezhnaya N.S., Ignat'eva O.V., *Elementnyi sostav khvoi i morfofiziologicheskie parametry sosny obyknovЕННОЙ v usloviyakh tekhnogennoy zagryazneniya* (Elemental composition of pine needles and morphophysiological parameters of Scots pine under the conditions of technogenic pollution), Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii SO RAN, 2006, 134 p.

Mikhailova T.A., Pleshanov A.S., Afanasieva L.V., Cartographic assessment of pollution of forest ecosystems on the Baikal natural territory by technogenic emissions, *Geography & Natural Resources*, 2008, Vol. 29, No. 4, pp. 317–320. OST 16128-90.

Pleshanov A.S., Mikhailova T.A., Berezhnaya N.S., Toshchakov S.Yu., *Metodologicheskii podkhod k kompleksnomu kartografirovaniyu tekhnogenno narushennykh ekosistem* (Complex mapping of technogenically disturbed ecosystems: a methodological approach), *Problemy regional'noi ekologii* (Problems of Regional Ecology), Issue 8 of Second All-Russian Conf., Tomsk, May 15–19, 2000, Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2000, pp. 44–45.

Rakitskii V.N., Turusov V.S., *Mutagennaya i kantserogen-naya aktivnost' khimicheskikh soedinenii* (Mutagenic and cancerogenic activity of chemical compounds), *Vestnik RAMN*, 2005, No. 3, pp. 7–9.

Zhidkov A.N., Kozhenkov L.L., *Ekologicheskie problemy okhrany lesov* (Environmental problems of forests), *Lesokhozyaistvennaya informatsiya*, 2014, No. 4, pp. 25–32.