

О.В. КАЛУГИНА\*, Т.А. МИХАЙЛОВА\*, Л.В. АФАНАСЬЕВА\*\*

\*Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132, Россия, olignat32@inbox.ru, mikh@sifibr.irk.ru

\*\*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН,  
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия, afanl@mail.ru

## ДИНАМИКА СОСТОЯНИЯ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ В ОКРЕСТНОСТЯХ ШЕЛЕХОВСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЦЕНТРА (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Проанализирована многолетняя динамика (более 50 лет) состояния сосновых лесов, загрязняемых выбросами Шелеховского промышленного центра, где основным источником техногенных эмиссий является Иркутский алюминиевый завод (ИркАЗ). Выявлена прямая зависимость жизненного состояния сосновых древостоев от объемов выбросов ИркАЗа. Установлено, что период максимального объема выбросов (90–100 тыс. т/год) завода, наблюдаемый в конце 1970-х – начале 1980-х гг., сопровождался быстрым развитием визуальных признаков острого поражения хвои в виде некрозов и хлорозов, охватывающих 40–90 % поверхности хвоинок, увеличением уровня дефолиации крон деревьев до 70 %, появлением на локальных участках вблизи завода (в основном в пониженных формах рельефа) усыхающих деревьев, в хвое которых содержание фтора достигало 210 мг/кг сухой массы. Индекс жизненного состояния (ИЖС) деревьев, рассчитанный по репрезентативным визуальным, морфометрическим и биохимическим показателям, не превышал 2–3 балла, что свидетельствовало о сильном ухудшении параметров сосновых древостоев, при этом площадь сильно угнетенных древостоев достигала 20 тыс. га. К концу 1990-х годов на фоне снижения объемов производства и уровня техногенных выбросов ИркАЗа наблюдалось улучшение состояния древостоев — ИЖС деревьев вблизи завода увеличился до 4,9 баллов, площадь сильно угнетенных сократилась до 11,9 тыс. га. В последние пять лет количество выбросов Шелеховского промцентра остается практически неизменным (около 35 тыс. т/год), уровень фтора в хвое деревьев вблизи завода довольно стабильный (70–80 мг/кг сухой массы), об улучшении состояния древостоев свидетельствует увеличение ИЖС до 5,3 баллов, усыхающие древостои отсутствуют, площадь сильно ослабленных лесов не превышает 2 тыс. га. Несмотря на явную положительную динамику в изменении состояния сосновых древостоев, наблюдаемую в современный период, требуется дальнейший мониторинг их состояния для адекватной оценки и прогнозирования изменений структурно-функциональных свойств и устойчивости лесов на загрязняемых территориях Иркутской области.

**Ключевые слова:** жизненное состояние леса, сосновые древостои, содержание фтора в хвое, техногенные эмиссии, Иркутский алюминиевый завод, мониторинговые исследования.

O.V. KALUGINA\*, T.A. MIKHAILOVA\*, L.V. AFANASYEVA\*\*

\*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 132, Russia, olignat32@inbox.ru, mikh@sifibr.irk.ru

\*\*Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
670047, Ulan-Ude, ul. Sakhyanova, 6, Russia, afanl@mail.ru

## DYNAMICS OF THE STATE OF SCOTCH PINE FORESTS IN THE VICINITY OF THE SHELEKHOVSKY INDUSTRIAL CENTER (IRKUTSK OBLAST)

The purpose of this work was to analyze the state of Scotch pine forests polluted by technogenic emissions from the Irkutsk aluminum smelter (IrkAZ) from the moment it was launched to the present (more than 50 years). The level of the forest pollution was assessed based on the content of inorganic elements in the pine needles. The trees vital state was estimated using the life status index (LSI). A direct dependence of the vital state of pine stands on the dynamics of emissions from the IrkAZ was revealed. Thus, the rapid development of visual signs of needle damage (necrosis and chlorosis), an increase in the level of tree crowns defoliation up to 70 %, the appearance of drying trees in local areas near IrkAZ were observed in the late 1970s and early 1980s (period of maximum emissions, 90–100 thousand tons/year). The fluorine content in the needles reached 210 mg/kg of dry weight. LSI of trees did not exceed 2–3 points, which indicated a strong deterioration in the parameters of pine stands. The area of heavily oppressed tree-stands reached 20 thousand hectares. The level of technogenic emissions from IrkAZ decreased at the end of the 1990s, and the state of pine stands began to improve, LSI of trees increased to 4,9 points. In the last 5 years, the

*amount of emissions from IrkAZ has remained unchanged (about 35 thousand tons/year), the level of fluorine in the tree needles near the plant is quite stable (70–80 mg/kg of dry weight). LSI of trees has increased to 5,3 points, there are no drying tree-stands. The area of heavily weakened forests does not exceed 2 thousand hectares. Despite the positive dynamics in the change in the state of pine stands, further monitoring of their state is required to predict changes in sustainability of forests in the polluted areas of the region.*

**Keywords:** vital state of the forest, pine stands, fluorine content in needles, technogenic emissions, Irkutsk aluminum smelter, monitoring studies.

## ВВЕДЕНИЕ

Иркутская область — самый лесной регион России, показатель лесистости составляет 82,9 %. По породному составу преобладают хвойные леса, где видами-доминантами являются лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) (40 %) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) (34 %), меньшая доля приходится на кедр (*P. sibirica* Du Tour) (15 %), ель (*Picea obovata* Ledeb.) (7 %) и пихту (*Abies sibirica* Ledeb.) (4 %) [1]. При этом доля особо ценных хвойных пород, таких как сосна и кедр, значительна даже в масштабах планеты. Леса как важнейший природный ресурс особо значимы не только для области, но и для Байкальского региона в целом, поскольку представляют собой главный фактор, обеспечивающий устойчивость экосистемы уникального оз. Байкал и прилегающих к нему территорий. Они выполняют средообразующие, водоохраные, водорегулирующие, защитные, санитарно-гигиенические и другие экосистемные функции. Однако структурная целостность и устойчивость лесов во многом зависит от воздействия неблагоприятных природных и антропогенных факторов, из которых природоохранными органами регистрируется влияние пожаров, распространение насекомых-вредителей и болезней, интенсивность рубок [2]. Вместе с тем в последние десятилетия особо значимым негативным фактором, влияющим на состояние лесов области, является техногенное загрязнение [3].

Шелеховский промышленный центр — один из наиболее крупных, расположенных в юго-западной части Иркутской области. В его составе насчитывается более 15 промышленных предприятий, в том числе завод железобетонных изделий, известковый и кабельный заводы, Иркутская ТЭЦ-5. Основным предприятием-загрязнителем, на долю которого приходится более 70 % всех выбросов промцентра, является Иркутский алюминиевый завод (ИркАЗ). При производстве алюминия в атмосферу выбрасывается значительное количество загрязняющих веществ, таких как фтористый водород, твердые фториды, диоксид серы, оксиды азота, оксид углерода, стойкие органические соединения, техногенная пыль, в составе которой велика доля тяжелых металлов. Многие загрязняющие агенты обладают высокотоксичным и канцерогенным эффектом, оказывая неблагоприятное воздействие на компоненты природной среды и здоровье населения [4–6].

ИркАЗ введен в эксплуатацию в 1962 г., выпуск алюминия осуществлялся по технологии Содерберга с использованием самообжигающихся анодов. В последующие годы происходило постепенное наращивание технологических мощностей завода, были запущены в действие новые электролизные корпуса и цех по производству кристаллического кремния. В 2002 г. на ИркАЗе было получено 275 тыс. т алюминия, в настоящее время производственная мощность завода составляет 400 тыс. т алюминия.

В начале 2000-х годов на заводе началась реализация масштабных экологических проектов. Приоритетным проектом модернизации производства стало внедрение технологии «Экологический Содерберг», позволяющей существенно снизить негативное воздействие на окружающую среду, а также повысить энергоэффективность. Комплексная модернизация затронула и очистные сооружения, так, на предприятии регулярно проходят замену электрофильтры, внедряются в работу системы оборотного водоснабжения и сухой газоочистки [2]. Благодаря проводимым экологическим мероприятиям ежегодный объем выбросов в последние годы варьирует в пределах 32–35 тыс. т загрязняющих веществ. Тем не менее долговременное техногенное загрязнение выбросами ИркАЗа и значительный объем эмиссий (превышающий 90 тыс. т/год) в прошлые годы не могли не сказаться на ослаблении состояния лесов в зоне влияния выбросов завода. Поэтому мы считаем, что на таких территориях особенно важен постоянный мониторинг загрязнения и ослабления лесов. Данные мониторинга необходимы как основа для долгосрочного прогнозирования экологической ситуации в лесах, для разработки норм допустимых техногенных нагрузок на древостои. В связи с этим цель данной работы — проанализировать состояние сосновых лесов, загрязняемых техногенными эмиссиями Иркутского алюминиевого завода, с момента его пуска по настоящее время, выявить связь между изменением жизненного состояния сосновых древостоев и динамикой эмиссий.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Натурные обследования лесов проводили в юго-западной части Иркутской области в зоне рассеивания выбросов ИркАЗа ( $52^{\circ}11'$  с. ш.,  $104^{\circ}04'$  в. д.) (рис. 1). Данная территория характеризуется специфическими природными условиями (сильно пересеченный рельеф, продолжительные мощные приземные инверсии и застойные явления в нижних слоях атмосферы, длительный холодный период), что обуславливает низкий потенциал самоочищения приземного слоя воздуха и способствует резкому увеличению в нем концентраций загрязняющих веществ [7]. Преобладают ветры западного и северо-западного направлений, почвы преимущественно небогатые средне- и маломощные с низкой буферной способностью.

Объектом исследования служили древостои сосны обыкновенной — одной из основных лесообразующих пород области, обладающей высокой чувствительностью к техногенным поллютантам. Изучение состояния сосновых лесов, подвергающихся воздействию выбросов ИркАЗа, начали сотрудники Сибирского института физиологии и биохимии растений (СИФИБР) СО РАН практически со времени пуска завода [8]. В то время на лесопокрытой территории, прилегающей к ИркАЗу, по общепринятым в лесном хозяйстве СССР методикам [9, 10] закладывались пробные площади (ПП), различающиеся по степени угнетения древостоев: усыхающие (распадающийся древостой), сильно, средне, слабо угнетенные, а также ПП, где древостои относительно здоровые (фоновые). Степень угнетения деревьев оценивали по таким показателям, как уровень дефолиации крон, продолжительность жизни хвои, наличие ее некрозов и содержание в ней фторидов. ПП располагались в древосто-

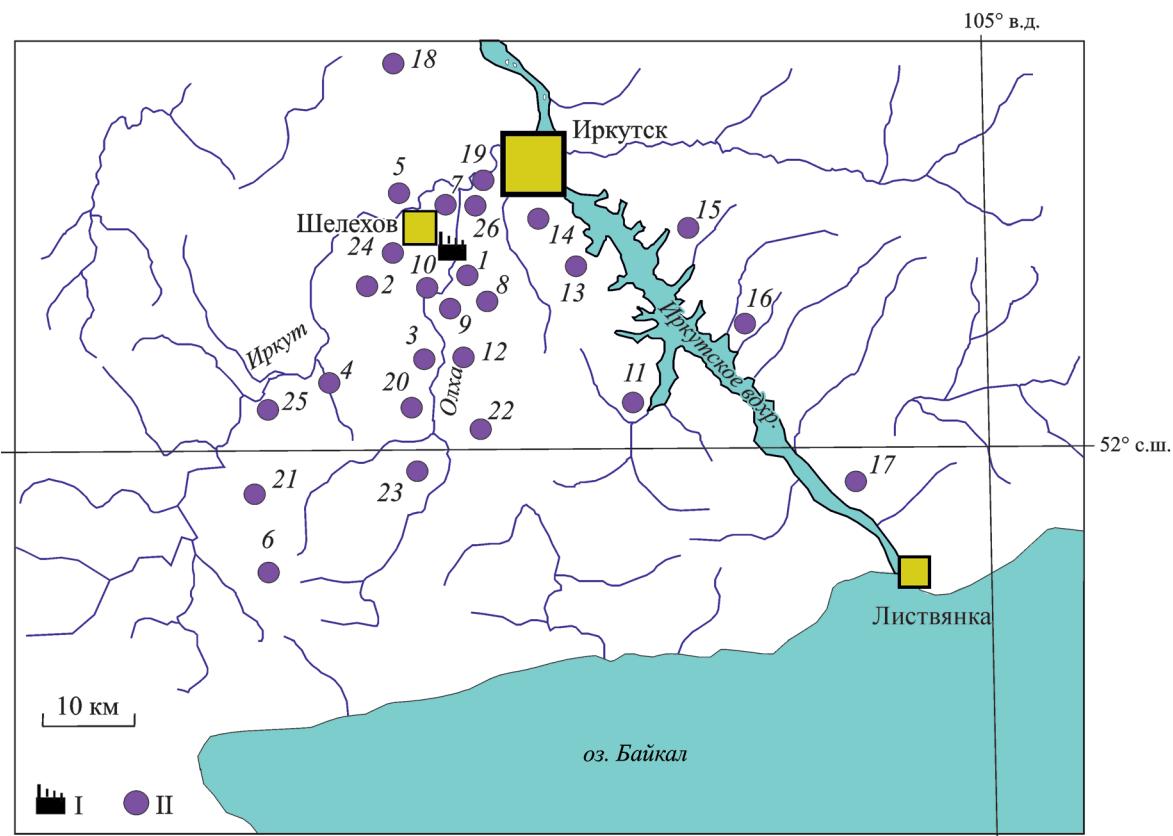


Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей на обследованной территории.

I — Иркутский алюминиевый завод, II — пробные площади. Пробные площади: 1 — с. Олха, 2 — ст. Дачная, 3 — пос. Большой Луг, 4 — пос. Моты, 5 — Карьер, детский оздоровительный лагерь «Авиатор», 6 — пос. Глубокая, 7 — детский оздоровительный лагерь «Крылатый», 8 — с. Олха, 6 км, 9 — с. Олха, высота 740 м, 10 — ст. Голубые Ели, 11 — р. Хея, 12 — гора Радостная, 13 — пос. Падь Мельничная, 14 — г. Иркутск, мкр-н Юбилейный, 15 — пос. Патроны, 16 — пос. Бурдаковка, 17 — пос. Большая Речка, 18 — пос. Водино, 19 — г. Иркутск, садоводство им. В. Дубинина, 20 — ст. Ханчин, 21 — гора Подкаменная, 22 — пос. Таежный, 23 — ст. Орленок, 24 — пос. Чистые Ключи, 25 — с. Шаманка, 26 — г. Иркутск, мкр-н Синюшина Гора.

ях, сходных по возрасту и бонитету (древостои приспевающие, III класса бонитета, полнота 0,5) с доминированием разнотравных ассоциаций. В дальнейшем сеть мониторинга лесов дополнялась новыми ПП и стала состоять из 26 ПП, расположенных в разных направлениях и на разных расстояниях от завода (см. рис. 1). Закладка ПП осуществлялась с учетом более современных методик, а также рекомендаций международного руководства ICP Forests [11, 12].

На каждой ПП определяли основные лесотаксационные характеристики древостоев, визуальные и морфометрические параметры крон деревьев. В середине вегетационного периода из средней части крон пяти-шести деревьев 40-летнего возраста отбирались пробы хвои второго года жизни, как наиболее физиологически активной. Для определения концентрации элементов хвою высушивали в течение 48 ч при температуре 60 °C, измельчали до порошкообразного состояния и просеивали через сито с диаметром отверстий 0,5 мм. Далее образцы хвои минерализовали в муфельной печи SNOL при 450 °C в течение 3 ч, золу растворяли в 0,1 М HNO<sub>3</sub> [13]. В полученных растворах содержание элементов выявляли атомно-эмиссионным методом с помощью спектрометра SPECTRO ARCOS в аккредитованной лаборатории ГКК ГП «РАЦ» (г. Улан-Удэ, аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511112). Для контроля аналитического качества процедур использовались стандартные образцы NCS DC 73350, относительная ошибка метода не превышала 5–10 %. Содержание азота и фтора определяли спектрофотометрически: азота — после мокрого озоления хвои в серной кислоте при 80–120 °C, фтора — после сухого озоления хвои и дистилляции полученной золы с водяным паром в хлорной кислоте, используя сернокислое серебро для удаления сопутствующих примесей хлора [14]. Содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов определяли спектрофотометрическим методом в замороженной хвои после предварительной экстракции 96%-м этанолом [15]. Оптическую плотность измеряли при 665, 649 и 440,5 нм. Расчет пигментов проводили по формулам Дж.Ф. Винтермана и А. Де Мотса [16].

Для оценки состояния древостоев сосны была разработана диагностическая шкала на основе индекса жизненного состояния (ИЖС), который рассчитывался по репрезентативным параметрам [17]. К ним относятся: процент зеленой хвои в кроне, объем ствола дерева, масса хвои побегов 2-го года жизни, сумма зеленых пигментов, соотношение белкового и небелкового азота в хвое. ИЖС деревьев рассчитывался как средний балл от суммы указанных репрезентативных показателей, выраженных в единицах, нормированных относительно фоновых значений, принятых за 10 баллов. Подобная формализация позволяет снизить субъективность проводимых оценок и сопоставить несопоставимые между собой по размерности параметры. Данные об объемах атмосферных выбросов Шелеховского промцентра взяты из официальных источников [2]. Статистическую обработку результатов проводили с использованием стандартных методов [18] и пакета прикладных программ Ms Office (Excel) и STATISTICA 8.0. Полученные данные были проверены на нормальность (Shapiro-Wilk's test,  $p < 0,05$ ) и равенство дисперсий (Levene's test). На рисунках и в таблицах приведены средние величины каждого параметра ( $M$ ) и их стандартные отклонения ( $\delta$ ). Для оценки статистически значимой зависимости считали коэффициент корреляции по Пирсону [19].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Один из основных путей поступления загрязняющих веществ в окружающую среду — выбросы промышленных предприятий. При этом, по данным официальных источников, износ производственных мощностей металлургических предприятий в России в настоящее время превышает 50 %, и с каждым годом этот показатель увеличивается [20]. Анализ динамики аэровыбросов Шелеховского промцентра показал высокую зависимость их объемов от работы ИркАЗа ( $r = 0,97$ ,  $p < 0,05$ ). В первые годы после запуска алюминиевого завода в связи с наращиванием темпов производства объем технологических эмиссий Шелеховского промцентра постепенно увеличивался и достиг максимального уровня (около 100 тыс. т/год) к началу 1980-х гг. (рис. 2, *a*). Следует отметить, что в этот период общее содержание фторидов — приоритетных фитотоксикантов выбросов алюминиевого производства — составляло более 4,5 тыс. т, из них фтористого водорода и твердых фторидов — 2,5 и 2,0 тыс. т соответственно [21]. Со второй половины 1980-х гг. количество выбросов начало снижаться, к 1991 г. их объем сократился до 57 тыс. т, а к 1999 г. — до 30 тыс. т/год, уровень фтористого водорода в составе эмиссий упал до 0,49 тыс. т, твердых фторидов — до 1,0 тыс. т/год [22]. В 2000–2009 гг. в результате проводимых на ИркАЗе экологических мероприятий и совершенствования технологического процесса ежегодный объем эмиссий стабилизировался на уровне 27–30 тыс. т загрязняющих веществ. С 2010 г. в связи с наращиванием объемов производства количество выбросов вновь увеличилось, и в 2016 г. оно достигло 38 тыс. т/год. В последние пять лет объем выбросов находится в пределах

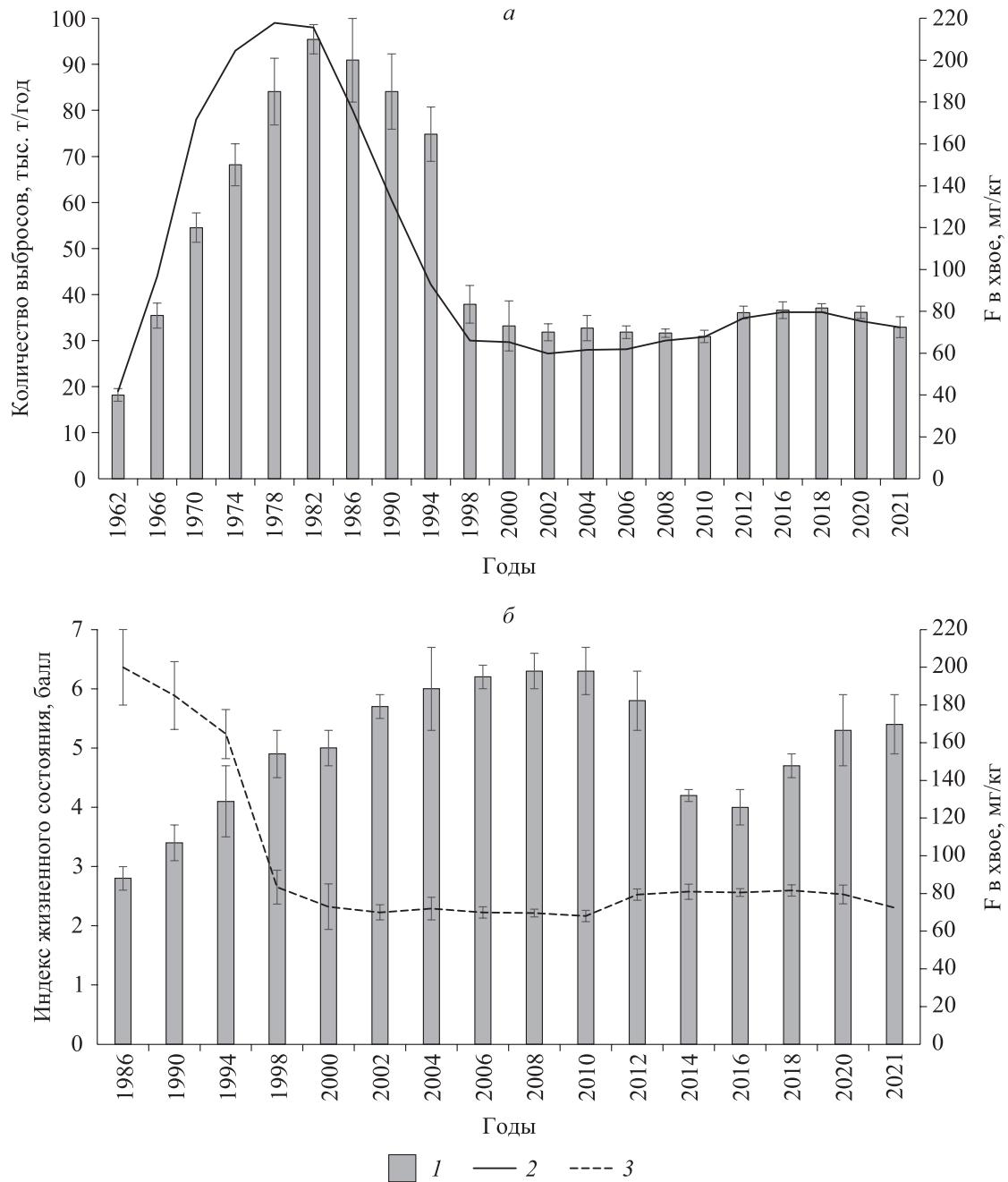


Рис. 2. Динамика атмосферных выбросов Шелеховского промцентра в 1962–2021 гг. (а) и жизненного состояния сосны вблизи ИркАЗа в 1986–2021 гг. (б), а также содержания фтора ( $M \pm \delta$ ) в ее хвое.

1 — содержание фтора в хвое сосны, мг/кг; 2 — количество выбросов, тыс. т/год, 3 — индекс жизненного состояния, баллы.

35 тыс. т/год, при этом отмечается сокращение доли высокоагрессивных фитотоксикантов, в первую очередь фторидов. Так, количество фтористого водорода в выбросах ИркАЗа снизилось до 0,34 тыс. т/год, твердых фторидов — до 0,41 тыс. т/год [2].

Как уже упоминалось, исследования состояния сосновых лесов на территории рассеивания выбросов алюминиевого завода были начаты практически со времени его пуска в эксплуатацию. В первое десятилетие происходило скрытое угнетение деревьев. Хотя визуальные признаки ослабления их жизненного состояния отсутствовали, содержание фтора в хвое сосны вблизи завода постепенно

увеличивалось, к 1970 г. оно превышало фоновый уровень (10 мг/кг сухой массы) уже в 6–8 раз (см. рис. 2, а). С середины 1970-х гг. при резком увеличении объема выбросов до максимального (почти в 100 тыс. т/год) быстро развились визуальные признаки острого поражения хвои в виде сильных некрозов и хлорозов, уровень дефолиации крон вырос до 70 %, содержание фтора превысило фоновые концентрации в 16–18 раз. На локальных участках вблизи ИркАЗа (в основном в пониженных формах рельефа) появились усыхающие деревья, в хвое которых содержание фтора достигало 210 мг/кг сухой массы. До середины 1980-х гг. процесс угнетения сосновых древостоев характеризовался высокой динамичностью, содержание фтора в хвое варьировало от 60 до 195 мг/кг сухой массы, вблизи ИркАЗа на хвое наблюдались обширные некрозы, охватывающие 40–90 % поверхности хвоинки, уровень дефолиации достигал 75–90 %, продолжительность жизни хвои снизилась до 1–2 лет, у многих деревьев появилась суховершинность (рис. 3). ИЖС деревьев в те годы составлял 2–3 балла, что свидетельствовало о сильном ухудшении параметров сосновых древостоев.

В результате острого и кумулятивного воздействия выбросов ИркАЗа границы угнетения лесов постоянно расширялись, захватывая древостои на возвышенных частях территории. Сформировались зоны разного уровня угнетения лесов. К 1990 г. площади сильно, средне и слабо угнетенных древостоев составляли примерно 20 тыс. га каждая, усыхающие древостои занимали более 2,2 тыс. га, при этом они располагались локально внутри зоны сильного угнетения на удалении 3–10 км от Шелеховского промцентра в юго-восточном, южном и северо-западном направлениях.

Со второй половины 1980-х гг. в результате спада производства количество техногенных эмиссий начало постепенно снижаться и к 1998 г. сократилось в 3,2 раза. Временные ряды изменения содержания фтора в хвое деревьев разной степени угнетения свидетельствовали об уменьшении его концентрации на всех ПП в 2,0–2,5 раза, что положительно коррелирует с динамикой уровня фторсодержащих соединений в эмиссиях ИркАЗа ( $r = 0,74–0,83$ ,  $p < 0,05$ ,  $n = 26$ ). Причем самое значительное снижение уровня фтора произошло в хвое сильно и средне угнетенных деревьев. За этот временной период в хвое угнетенных деревьев в 1,5–1,7 раза уменьшилось также содержание серы, уровень тяжелых металлов изменился менее значительно (табл. 1).



Рис. 3. Некрозы хвои сосны, вызванные воздействием фторсодержащих эмиссий (а) и суховершинное дерево (б) на территории, загрязняемой выбросами алюминиевого завода.

Таблица 1

**Содержание элементов-поллютантов ( $M \pm \delta$ ) в хвое сосны  
на пробной площадке сильной степени угнетения (ПП 1–с. Олха) в период 1992–2021 гг.**

Год исследования	Содержание элементов, мг/кг					
	S	Al	Si	Pb	Fe	Zn
1992	1380 ± 115	283 ± 14	1810 ± 94	0,51 ± 0,01	130 ± 11	46,7 ± 1,2
1998	820 ± 73	293 ± 28	2930 ± 56	0,44 ± 0,02	276 ± 15	48,7 ± 1,4
2003	600 ± 35	550 ± 34	2110 ± 42	0,45 ± 0,01	188 ± 12	62,0 ± 1,9
2009	530 ± 24	437 ± 21	2000 ± 77	0,50 ± 0,01	175 ± 10	53,5 ± 1,6
2012	850 ± 31	514 ± 35	1840 ± 29	0,30 ± 0,03	178 ± 9	59,4 ± 1,4
2020	1140 ± 181	1305 ± 68	1860 ± 89	0,25 ± 0,01	242 ± 13	63,3 ± 1,2
2021	1136 ± 143	1246 ± 49	1855 ± 74	0,28 ± 0,01	226 ± 27	60,6 ± 1,8

Ответный отклик деревьев на снижение выбросов с 1986 г. был отмечен спустя почти 10 лет, при этом наиболее сильные изменения были выявлены у деревьев вблизи завода: увеличились линейные размеры хвои и побегов (табл. 2), продолжительность жизни хвои возросла до 2–3 лет, дефолиация крон не превышала 55 %, площадь некрозов хвои не превышала 10 % поверхности хвоинки. ИЖС к 1994 г. увеличился до 4,1 баллов, к 1998 г. — до 4,9 баллов (см. рис. 2, б). Выраженная положительная динамика в изменении жизненного состояния сосновых древостоев наблюдалась вплоть до начала 2000-х гг. В результате наметившейся тенденции к улучшению жизненного состояния лесов к началу нового тысячелетия площадь сильно угнетенных древостоев сократилась до 11,9 тыс. га, а площадь средне и слабо угнетенных древостоев, наоборот, увеличилась до 53,5 и 65,7 тыс. га соответственно.

В период с 2000 по 2009 г. на территории Шелеховского промцентра преобладало хроническое угнетение древостоев при относительно стабильном объеме эмиссий (27–30 тыс. т/год). Практически неизменным оставалось и содержание фтора в хвое деревьев ( $6,8\text{--}7,2 \times 10^{-3}$  % от сухой массы). Значимо изменились ростовые показатели деревьев, о чем свидетельствует снижение уровня дефолиации крон до 50–55 %, отсутствие некрозов хвои и суховершинности крон, возрастание продолжительности жизни хвои до 3–4 лет, увеличение линейных размеров хвои и побегов на 20–40 %, а также массы хвои на побегах на 30–50 %. ИЖС составлял от 5,7 до 6,3.

Начиная с 2010 г. вновь отметилась тенденция к увеличению объема выбросов, в 2016 г. в атмосферу поступило 38 тыс. т загрязняющих веществ, что сразу же сказалось на увеличении содержания фтора в хвое на 20–25 %. В этот период вблизи ИрКАЗа практически ежегодно стали фиксироваться случаи острого поражения деревьев фторсодержащими эмиссиями, проявляющиеся в возникновении некрозов хвои. Также отмечался тренд к ухудшению репрезентативных показателей жизненного состояния деревьев. Так, уровень дефолиации крон увеличился до 60 %, линейные параметры хвои и побегов, а также их масса снизились в среднем на 15–35 % и, соответственно, регистрировалось падение ИЖС до 4,2 баллов.

Таблица 2

**Визуальные и морфометрические параметры ( $M \pm \delta$ ) ассимиляционных органов сосны  
на ПП сильной степени угнетения (ПП 1–с. Олха) в период 1992–2021 гг.**

Год исследования	Количество хвоинок на побеге	Масса хвои на побеге, г	Длина побега, см	Длина хвои, мм	Продолжительность жизни хвои, лет	Уровень дефолиации крон, %
1992	59,67 ± 16,83	1,24 ± 0,18	6,04 ± 1,52	33,61 ± 0,32	1–2	70
1998	76,51 ± 10,48	3,69 ± 0,52	9,31 ± 1,26	43,92 ± 1,68	2–3	55
2003	143,60 ± 31,94	4,05 ± 0,75	12,77 ± 2,94	52,80 ± 2,38	3–4	55
2009	159,54 ± 33,82	4,76 ± 1,69	15,71 ± 3,65	60,64 ± 5,89	3–4	50–55
2012	132,16 ± 39,56	3,19 ± 0,87	12,13 ± 3,73	51,50 ± 5,31	3–4	60
2020	169,4 ± 27,67	3,84 ± 0,61	14,77 ± 2,03	62,05 ± 7,25	3–4	50
2021	173,54 ± 24,29	4,06 ± 1,17	15,18 ± 2,71	61,56 ± 4,52	4	50

Примечание. Исследовались побеги второго года жизни.

За последние 5 лет количество выбросов Шелеховского промцентра остается практически неизменным (около 35 тыс. т/год). Вероятно, это связано с реализацией природоохранных мероприятий на ИркАЗе, в частности с переводом части производственных мощностей на технологию «Экологический Содерберг», что должно способствовать снижению выбросов в атмосферу на 30 % и улучшению экологических показателей производства [23]. В современный период нами регистрируется улучшение ростовых показателей сосновых древостоев на всей территории рассеивания выбросов ИркАЗа. Так, вблизи завода уровень дефолиации крон снизился до 50 %, значения длины побегов и хвоинок, а также охвоенность побегов увеличились на 20–35 %, масса хвои возросла на 20–25 %, значения ИЖС увеличились до 5,3 баллов. Тем не менее результаты наших исследований свидетельствуют о наличии хронического угнетения древостоев, как вблизи ИркАЗа, так и на расстоянии до 50 км от него, большей частью в южном и юго-восточном направлениях.

При сопоставлении пространственного распределения угнетенных древостоев по территории Шелеховского промцентра в разные временные периоды обнаруживается, что к настоящему времени усыхающие древостои отсутствуют. Площадь сильно угнетенных древостоев, расположенных преимущественно в низкогорной котловинной части территории в юго-восточном направлении от ИркАЗа, за последние 20 лет сократилась более чем в 4 раза и составляет около 2 тыс. га. Средне и слабо угнетенные древостои обнаруживаются по всем направлениям от завода, при этом их площади достигают 37,5 и 46 тыс. га соответственно.

Таким образом, многолетняя динамика состояния сосновых лесов вблизи Шелеховского промцентра в значительной степени связана с изменением уровня техногенной нагрузки, создаваемой основным предприятием-загрязнителем — ИркАЗом. Несмотря на явное улучшение ростовых показателей сосновых древостоев, наблюдаемое в последние годы, требуется дальнейший мониторинг состояния хвойных лесов для прогнозирования изменений структурно-функциональных свойств и устойчивости лесов на загрязняемых территориях Иркутской области.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В промышленно развитых регионах нашей страны и за рубежом особо значимым негативным фактором, влияющим на состояние лесов, является техногенное загрязнение. Воздействие промышленных эмиссий способно причинять вред лесам, как в повседневном режиме работы, так и в результате нештатных (аварийных) выбросов. При анализе долговременного влияния техногенных эмиссий, поставляемых в атмосферу предприятиями, входящими в состав Шелеховского промцентра (юго-западная часть Иркутской области), на леса выявлена четкая зависимость жизненного состояния сосновых древостоев от динамики объемов выбросов Иркутского алюминиевого завода — основного предприятия-загрязнителя. Мониторинговые исследования, проводимые с использованием комплекса визуальных, морфометрических, физиолого-биохимических, токсикологических параметров, свидетельствуют о широкой амплитуде реакции древостоев на воздействие загрязняющих веществ, поступающих в составе аэровыбросов ИркАЗа. В настоящий период наметилась тенденция к улучшению жизненного состояния лесов, причем положительная динамика в изменении ростовых показателей наблюдается даже у сильно угнетенных древостоев при определенном снижении токсической нагрузки. Проведенные исследования подтверждают необходимость дальнейшего осуществления мониторинга для обоснованного прогнозирования состояния лесов на загрязняемых территориях Иркутской области, в том числе при изменении уровня и характера эмиссионной нагрузки, создаваемой предприятиями алюминиевой промышленности.

*Работа выполнена в рамках фундаментальных научных исследований по программе РАН (FWSS-2022-0002, № гос. регистрации 122041100045-2) «Изучение динамики биологического разнообразия Байкальской Сибири на территориях разной степени нарушенности природными и антропогенными факторами», а также, частично, при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-44-380009.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас. Иркутская область (экологические условия развития) / Под. ред. А.Н. Антипова. — М.; Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2004. — 90 с.

2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2019 году». — Иркутск: ООО «Мегапринт», 2020. — 314 с.
3. Михайлова Т.А., Калугина О.В., Шергина О.В. Мониторинг техногенного загрязнения и состояния сосновых лесов на примере Иркутской области // Лесоведение. — 2020. — № 3. — С. 265–273.
4. Brougham K.M., Roberts S.R., Davison A.W., Port G.R. The impact of aluminium smelter shut-down on the concentration of fluoride in vegetation and soils // Environmental Pollution. — 2013. — Vol. 178. — P. 89–96.
5. Martin S.C., Lariviere C. Community health risk assessment of primary aluminum smelter emissions // Journ. of Occupational and Environmental Medicine. — 2014. — Vol. 56 (5). — P. 33–39.
6. Feng Y., Cheng J., Shen J., Sun H. Spatial effects of air pollution on public health in China // Environmental and Resource Economics. — 2019. — Vol. 73 (11). — P. 229–250.
7. Трофимова И.Е., Буфал В.В., Густокашина Н.Н. Условия формирования качества воздушного бассейна в урбанизированных системах юго-восточного побережья озера Байкал // Сибирский экол. журнал. — 2004. — Т. 11, № 1. — С. 9–17.
8. Rozhkov A.S., Mikhailova T.A. The effects of fluorine-containing emissions on conifers. — Berlin: Heidelberg; Springer, 1993. — 142 p.
9. Инструкция по экспедиционному лесопатологическому обследованию лесов СССР. — М.: Лесн. пром-сть, 1983. — 154 с.
10. Программа-методика организации и проведения работ по региональному мониторингу лесов европейской части СССР. — Каунас: Гирионис, 1989. — 32 с.
11. Методы изучения лесных сообществ. — СПб.: НИИ Химии Санкт-Петербург. ун-та, 2002. — 240 с.
12. Cools N., De Vos B. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. — UNECE, ICP Forests [Электронный ресурс]. — <http://www.icpfo-rests.org/Manual.htm> (дата обращения 13.09.2022).
13. Proidakova O.A., Vasileva I.E. Method to improve schemes of sample preparation and atomic-absorption analysis of geochemical samples // Inorganic Materials. — 2010. — Vol. 46 (4). — P. 1503–1512.
14. Михайлова Т.А., Бережная Н.С., Игнатьева О.В. Элементный состав хвои и морфофизиологические параметры сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2006. — 134 с.
15. Vernon L.P. Spectrophotometric determination of chlorophylls and pheophytins in plant extracts // Analytical Chemistry. — 1960. — Vol. 32 (9). — P. 1144–1150.
16. Wintermans I.F., De Mots A. Spectrophotometric characteristics of chlorophylls *a* and *b* and their pheophytins in ethanol // Biochimica et Biophysica Acta. — 1965. — Vol. 109 (2). — P. 448–453.
17. Михайлова Т.А., Калугина О.В., Шергина О.В. Динамика состояния сосновых лесов Предбайкалья в условиях воздействия антропогенных факторов // Сибир. лесной журнал. — 2017. — № 1. — С. 44–55.
18. Зайцев Г.Н. Математика в экспериментальной ботанике. — М.: Наука, 1990. — 296 с.
19. McKillup S. Statistics explained. An introductory guide for life scientists. — Cambridge: Cambridge University Press, University Printing House, 2011. — 416 p.
20. Промышленное производство в России. 2021: Стат. сборник. — М.: Росстат, 2021. — 305 с.
21. Ежегодник загрязнения атмосферного воздуха в 1983–1986 гг. на территории деятельности ИУГМС. — Иркутск: Росс. комитет по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1987. — 356 с.
22. Обзор выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на территории Иркутской области за 1990–1997 гг. — Иркутск: Гос. комитет по охране окружающей среды РФ, Гос. комитет по охране окружающей среды Иркутской области, 1997. — 459 с.
23. РУСАЛ внедряет технологию «Экологический Содерберг» на ИрКАЗе [Электронный ресурс]. — <https://rusal.ru/press-center/press-releases/rusal-vnedryat-tehnologiyu-ekologicheskiy-soderberg-na-irkaze/> (дата обращения 13.09.2022).

*Поступила в редакцию 01.11.2022*

*После доработки 01.06.2023*

*Принята к публикации 23.11.2023*