

Разработка диагностической шкалы оценки жизненного состояния сосновых древостоев в условиях техногенного загрязнения выбросами крупного алюминиевого завода

О. В., КАЛУГИНА¹, Л. В. АФАНАСЬЕВА²

¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132
E-mail: olignat32@inbox.ru

²Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

Статья поступила 12.05.2023

После доработки 21.06.2023

Принята к печати 22.06.2023

АННОТАЦИЯ

В ходе многолетних исследований оценки состояния сосновых древостоев, загрязняемых выбросами Братского алюминиевого завода, накоплен большой массив разноразмерных данных, при обобщении и структурировании которых выделены две группы репрезентативных показателей. К первой относятся показатели с высокой степенью достоверности, характеризующие состояние ассимилирующей фито-массы и ростовые процессы загрязняемых деревьев: процент зеленой хвои в кроне дерева, масса хвои на побегах, общее содержание хлорофилла в хвое побега, соотношение белкового и небелкового азота в хвое, величина соотношения F_v/F_m . Во вторую группу вошли показатели, отражающие эффективность работы антиоксидантной системы: содержание низкомолекулярных метаболитов (пролина, катехина, общего глутатиона дигетогулоновой кислоты), а также активность фермента пероксидазы. На основе этих параметров были рассчитаны интегральные индексы. Регрессионные зависимости между индексами и уровнем накопления элементов-поллютантов в хвое использованы для разработки шкалы оценки жизненного состояния древостоев в условиях техногенного загрязнения выбросами крупного алюминиевого завода. Применяя данную шкалу, можно выявить изменения на самых ранних стадиях, когда внешние признаки ослабления деревьев еще не проявляются или выражены в минимальной степени. Составлена карта-схема, отражающая распространение сосновых лесов разной степени угнетения. Установлено, что максимальное ухудшение состояния древостоев (более 70 %) наблюдается на локальных участках в промышленной зоне БрАЗа, сильное (в пределах 50–69 %) обнаруживается в разных направлениях от завода на удалении до 10 км, среднее (на 31–49 %) характерно для древостоев на расстоянии до 40 км, слабое (на 11–30 %) – на расстоянии 40–60, реже 80 км от БрАЗа. На остальной части обследованной территории изменения в жизненном состоянии древостоев сосны минимальны, что позволяет охарактеризовать древостои как здоровые (фоновые).

Ключевые слова: диагностическая шкала, *Pinus sylvestris*, жизненное состояние, антиоксидантная система, техногенные эмиссии, алюминиевый завод.

ВВЕДЕНИЕ

Леса как компонент окружающей среды играют важную роль в формировании климата планеты и глобальном балансе углерода, выполняют средоформирующие и средозащитные функции, выступают главной составляющей при сохранении естественного потенциала природной среды [Швиденко и др., 2003]. При этом особая роль отводится бореальным лесам, на долю которых приходится около трети площади мировых лесов [Schulze et al., 2002]. В них сосредоточено около 30 % всего углерода наземных экосистем [Kasischke, 2005]. На территории России бореальные леса занимают площадь 471,7 млн га с запасом древесины более 40 млрд м³, что составляет более 11 % мирового запаса [Лесной фонд..., 1999].

Глобальные климатические изменения, проявляющиеся в возрастании частоты и продолжительности засух [Харук и др., 2016], а также локальное воздействие антропогенных факторов оказывают негативное воздействие на стабильность и продуктивность лесных экосистем бореальной зоны [Щепаченко и др., 2008; Anderegg et al., 2013]. В последние годы для многих стран с мощным экономическим потенциалом приоритетным негативным фактором, оказывающим влияние на леса, является техногенное загрязнение [McEnroe, Helmisaari, 2001; Allen-Gil et al., 2003; Bauduin et al., 2014; Kirdyanov et al., 2020; Takahashi et al., 2020]. Актуальна эта проблема и для промышленно развитых регионов России, таких как Иркутская область, Красноярский край, Мурманская и Архангельская области, Республики Карелия и Коми, на территории которых функционируют крупные металлургические предприятия [Gytarsky et al., 1995; Лукина, Никонов, 1996; Черненко, 2002; Тарханов и др., 2004; Михайлова и др., 2008; Скрипальщикова, Стасова, 2014; Тужилкина, Плюснина, 2020]. Согласно экспертным оценкам, ежегодно в России от воздействия техногенных выбросов погибает около 20 тыс. га леса, а в целом по стране площадь загрязняемых лесов достигает 1,3 млн га [Жидков, Коженков, 2014]. Ослабленные техногенным стрессом деревья становятся восприимчивыми к воздействию фитопатогенов и насекомых-вредителей, что в конечном итоге приводит к их усыханию [Харук, Антамошкина, 2017]. Отсюда следует, что техногенное загрязнение

как негативный фактор наносит существенный ущерб лесам нашей страны.

Оценка состояния лесов проводится с использованием различных программ, методов и подходов, в том числе международной ICP Forests [www.icp-forests.net]. В основе большинства из них лежит определение жизненного состояния (ЖС) главного компонента – древостоя. Понятие ЖС включает в себя совокупность морфоструктурных и ростовых особенностей растительного организма, благодаря которым они фотосинтезируют, размножаются, эффективно используют ресурсы местообитания, а также успешно противостоят стрессовым воздействиям [Злобин, 1989; Brang, 1998].

В конце 70-х годов прошлого века энтомологами для характеристики ослабленности деревьев в очагах размножения насекомых и фитопатогенов была разработана балльная шкала категорий состояния [Санитарные правила..., 1970]. Позже используемые в ней диагностические признаки стали применять для оценки состояния древостоев, находящихся под воздействием локальных очагов атмосферного промышленного загрязнения. В дальнейшем данная методика была модифицирована В. А. Алексеевым [1989], и, хотя она также базировалась на неспецифических реакциях деревьев (густота кроны, наличие суховершинности, сухих веток в кроне, хлорозы, некрозы листьев), возникающих в ответ на действие биотических и абиотических факторов, автором впервые была предложена формула расчета индексов жизненного состояния, позволяющая перейти от условных “номерных” индексов к показателям смыслового значения. Следует отметить, что эта шкала до сих пор не потеряла своей актуальности и часто используется при лесопатологических исследованиях [Бобкова и др., 2010; Авдеева, Извеков, 2021].

Некоторые авторы при оценке ЖС древостоев за основу берут концепцию виталитетной структуры древостоя, характеризующую соотношение встречаемости здоровых, ослабленных, сильно ослабленных, отмирающих и сухих деревьев [Ярмишко и др., 2003]. Анализ виталитетной структуры, как полагают авторы, необходим для оценки исходного состояния древостоев и его динамики, биологической ценности, экологической роли

и ресурсного потенциала лесных сообществ [Демидко, 2006].

Для характеристики состояния древесных растений применяют также балльную шкалу стабильности развития дерева, оцениваемую по величине флуктуирующей асимметрии параметров листа (хвои). Шкала составлена в соответствии со степенью возрастания интегрального показателя стабильности развития: первый балл соответствует условной норме, пятый (для лиственных видов) и шестой (для хвойных) – критическому состоянию [Захаров и др., 2011; Скрипальщикова, Стасова, 2014]. По утверждениям авторов, индекс флуктуирующей асимметрии листьев и хвои может использоваться для раннего обнаружения стресса, вызванного как природными, так и антропогенными факторами. Визуальные и морфометрические параметры крон и побегов также используются исследователями для шкалы оценки степени поражения древостоев промышленными выбросами [Временная методика..., 1986]. Согласно ей степень поражения, исчисляемая в баллах, соответствует определенному состоянию древостоев – от здоровых (ненарушенных) деревьев до погибших (полностью разрушенных).

По результатам многолетних исследований лесных экосистем Восточной Сибири, подверженных техногенному воздействию, нами разработана методика оценки ЖС хвойных древостоев в условиях атмосферного загрязнения [Михайлова и др., 2006, 2017]. В ее основе лежит комплекс показателей состояния деревьев, обнаруживающих наиболее высокий уровень достоверных связей с накоплением элементов-загрязнителей в хвое – доля зеленой хвои в кроне, масса хвои побегов 2-го года жизни, суммарная концентрация зеленых пигментов, соотношение белкового и небелкового азота в хвое. Данные показатели используются для расчета индекса состояния ассимилирующей фитомассы деревьев, на основе которого построена шкала оценки степени снижения фотосинтетической активности в древостоях, ослабленных техногенными эмиссиями. Разработанная методика позволяет выявить не только степень и масштабы поражения лесов промышленными выбросами, но и установить особенности негативного воздействия определенного типа эмиссий.

В последние годы для оценки состояния лесных насаждений все чаще используют методы дистанционного зондирования [Митрофанов, 2013; Lassalle, 2021; Brown et al., 2022]. Одним из основных преимуществ этой технологии является то, что она позволяет обследовать большие площади лесов неинвазивным и неразрушающим способом.

Вместе с тем существующие и успешно используемые методики и шкалы для оценки ЖС древесных растений не отражают того, как деревья противостоят стрессовым воздействиям. Об этом можно судить по параметрам многокомпонентной системы антиоксидантной защиты (АОС), включающей низкомолекулярные метаболиты и антиоксидантные ферменты [Blokhina et al., 2003; Kumar et al., 2017; Hasanuzzaman et al., 2020]. Следовательно, дополнение шкал показателями, характеризующими эффективность работы АОС у деревьев, на наш взгляд, позволит более точно охарактеризовать ЖС того или иного древостоя в условиях негативного воздействия стрессовых факторов, в том числе техногенного загрязнения.

Цель работы – разработать диагностическую шкалу оценки жизненного состояния сосновых древостоев, загрязняемых техногенными эмиссиями алюминиевого производства, с учетом показателей, характеризующих эффективность их защитной системы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Полигоном для исследований выбрана территория в северо-западной части Иркутской области, в окрестностях г. Братска – крупного промышленного города России. По данным Росгидромета России, г. Братск входит в приоритетный список городов России с очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха (<http://voeikovmgo.ru>). На территории города и его окрестностях располагается более 40 крупных и мелких промышленных предприятий. Наибольший вклад в загрязнение атмосферы вносят три ведущие отрасли промышленности: цветная металлургия (около 45 % от общего объема выбросов), теплоэнергетика (около 25 %), деревообрабатывающая и деревоперерабатывающая промышленности (около 20 %). Дополнительным источником техногенного загрязнения является

автомобильный транспорт. Основным источником загрязнения в г. Братске – ОАО “Братский алюминиевый завод” (БрАЗ) – крупнейшее предприятие алюминиевой промышленности нашей страны. Ежегодный объем аэровыбросов БрАЗа составляет более 75 тыс. т загрязняющих веществ [Государственный доклад..., 2022]. Наиболее токсичными компонентами выбросов завода являются фторсодержащие соединения, в частности фтористый водород и твердые фториды, а также диоксид серы, оксид углерода, неорганическая пыль, в составе которой велика доля алюминия, кремния, кальция, магния, натрия и тяжелых металлов. Кроме того, этот завод является основным источником полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), выделение которых в атмосферу происходит в процессе электролиза и при производстве анодной массы из каменноугольного пека. По данным Гидрометеослужбы г. Братска, при неблагоприятных метеорологических условиях соединения фтора, диоксид серы и взвешенные вещества способны накапливаться в атмосфере в количествах, превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК) в десятки раз [Государственный доклад..., 2022].

Натурными обследованиями была охвачена лесопокрываемая территория в радиусе до 100 км в разных направлениях от основного источника загрязнения – БрАЗа. В соответствии с международной методикой ICP Forests [www.icp-forests.net] в 2011–2022 гг. на данной территории произведена закладка 40 пробных площадей (ПП). При закладке ПП учитывали особенности рельефа, региональный ветровой режим и локальную циркуляцию воздушных масс. Территория обследования занята коренными лесами из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.). Сосновые древостои занимают различные местообитания – равнинные хорошо прогреваемые участки, повышенные формы рельефа, заболоченные участки. Преобладают сосняки разнотравные и осоково-разнотравные III класса бонитета, почвы дерново-карбонатные, оподзоленные, на пестрой карбонатной коре выветривания. Широкое распространение древостоев сосны на территории обследования и высокая их чувствительность к токсикантам [Mikhailova, 2000] обусловили выбор данного

вида в качестве основного объекта исследований.

На каждой ПП отбирали хвою второго года жизни как наиболее физиологически активную из средней части крон 5–6 деревьев 40-летнего возраста с южной и юго-западной сторон. Пробы отбирали в середине вегетационного периода после окончания фазы роста побегов, в период с 25 июля по 5 августа. В этот период времени на обследованной территории складываются оптимальные температурные условия для всех метаболических процессов, в том числе фотосинтеза [Суворова, Попова, 2015].

Для оценки загрязнения хвои в ней определяли содержание фтора, серы, ряда тяжелых металлов (ТМ), кремния, алюминия и ПАУ. Для определения концентраций серы, алюминия и ТМ высушенную хвою минерализовали в муфельной печи при 450 °С в течение трех часов, золу растворяли в 0,1 М азотной кислоте. В полученных растворах содержание элементов определяли атомно-эмиссионным методом на спектрометре SPECTRO ARCOS (фирма Spectro Analytical Instruments GmbH, Германия) в аккредитованной лаборатории ГКК ГП “РАЦ” (г. Улан-Удэ, аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.5111112). Для контроля аналитического качества процедур использовали стандартные образцы NCS DC 73350, относительная ошибка метода не превышала 5–10 %. Содержание кремния в хвое сосны определяли весовым методом [Ермаков и др., 1987], фтора – спектрофотометрически при длине волны 540 нм с индикатором ксиленоловым оранжевым после сухого озоления пробы и дистилляции полученной золы с водяным паром в хлорной кислоте, используя сернокислое серебро для удаления сопутствующих примесей хлора [Михайлова и др., 2006].

Определение приоритетных ПАУ в хвое проводили по методике А. Г. Горшкова [2008]. Экстрагирование ПАУ из хвои осуществляли *n*-гексаном при облучении ультразвуком. Выделенную фракцию ПАУ анализировали на хромато-масс-спектрометре Agilent GC System 6890, MSD 5973. Количественные измерения проводили по методу внутреннего стандарта. Суммарная погрешность определения ПАУ в пробах 7–10 %.

О состоянии ассимилирующей фитомассы сосны на всех обследованных ПП судили

по изменению визуальных и морфометрических параметров крон деревьев. В частности, определяли процент дефолиации и дехромации крон деревьев, продолжительность жизни хвои сосны, фиксировали наличие некрозов, также вычисляли длину и массу побегов 2-го года жизни, длину, ширину, толщину и массу хвои, число пар хвоинок на побегах 2-го года жизни. Функциональное состояние ассимилирующего аппарата оценивали по содержанию пигментов в хвое и параметрам флуоресценции хлорофилла. Определение содержания пигментов проводили в этанольных экстрактах хвои спектрофотометрическим методом [Lichtenthaler, Welburn, 1983]. Параметры флуоресценции хлорофилла измеряли с помощью импульсного флуориметра PAM 2000 (Heinz Waltz, Effeltrich, Germany) в полевых условиях, в 9:00 утра в солнечную погоду.

Для исследования активности компонентов антиоксидантной системы защиты использовали свежую хвою сосны. В полевых условиях ее фиксировали в жидком азоте и доставляли в лабораторию в сосуде Дьюара, где хранили в алюминиевой фольге в низкотемпературном холодильнике при -83°C . Фенольные соединения экстрагировали из хвои 70%-м этанолом на ультразвуковой бане в течение 40 мин при температуре 45°C [Запрометов, 1993]. Общее содержание фенольных соединений определяли по реакции с реактивом Фолина – Чокалтеу по калибровочной кривой, построенной по галловой кислоте, флавоноидов – по реакции с хлоридом алюминия по калибровочной кривой, построенной по рутину (Sigma, Великобритания), катехина – по реакции с ванилиновым реактивом [Ермаков и др., 1987]. Для определения проантоцианидинов использовали метод Портера [Porter et al., 1985]. Определение содержания аскорбиновой (АК), дегидроаскорбиновой и дикетогулоновой кислот проводили спектрофотометрическим методом с использованием в качестве индикатора 2,6-дихлорфенолиндофенол [Чаплыгина, Антонова, 2002]. Содержание общего глутатиона, а также его восстановленной и окисленной форм определяли с помощью спектрофотометрического рециклирующего метода с 5,5'-дитиобис-2-нитробензойной кислотой (реактив Элмана) с предварительной дегидратацией 2-винилпиридином [Forman et al., 2009]. Экстракцию свободного пролина прово-

дили по методу L. S. Bates et al. [1973], его содержание определяли с помощью кислого нингидринового реактива на спектрофотометре ПЭ-5400 при длине волны 520 нм.

Определение показателей проводили в трех биологических и аналитических повторностях. Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью пакета прикладных программ MS Excel 2016 и “Среда статистических вычислений R”, версия 3.1.1. (2014 г.). Полученные данные были проверены на нормальность (Shapiro-Wilk's test, $p < 0,05$) и равенство дисперсий (Levene's test). Для оценки статистически значимой зависимости считали коэффициент корреляции по Пирсону [Shipunov, 2016].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Комплексные обследования сосновых древостоев, загрязняемых выбросами Братского промцентра, проводятся нами на протяжении последних 10 лет [Kalugina et al., 2017]. Показано, что наиболее высокие уровни элементов-поллютантов и ПАУ в хвое обнаруживаются в радиусе 1,5 км от основного источника эмиссий – БрАЗа, в промышленной зоне завода (до 0,5 км) их концентрации достигают максимальных значений. С увеличением расстояния от источника эмиссий уровень загрязняющих элементов в хвое снижается, однако количество F и сумма приоритетных ПАУ остается выше фоновых значений на расстоянии до 60 км от источника, Zn , Pb , Cd – до 50 км, S – до 40 км, Fe и Cu – до 35 км, преимущественно в северо-восточном и юго-восточном направлениях, соответствующих преобладающему атмосферному переносу выбросов. Пространственное распространение серы и твердого аэрозоля на обследованной территории во многом совпадает между собой (рис. 1). Площади территорий, загрязняемых фторидами и ПАУ, также сходны, при этом они более обширны, чем территории, загрязняемые серосодержащими соединениями и твердым аэрозолем.

Установлено, что при воздействии техногенных поллютантов изменяются морфоструктурные параметры крон и побегов сосны [Калугина, Афанасьева, 2020], питательный статус древостоев [Afanasyeva et al., 2021], биохимические показатели, активность и изо-

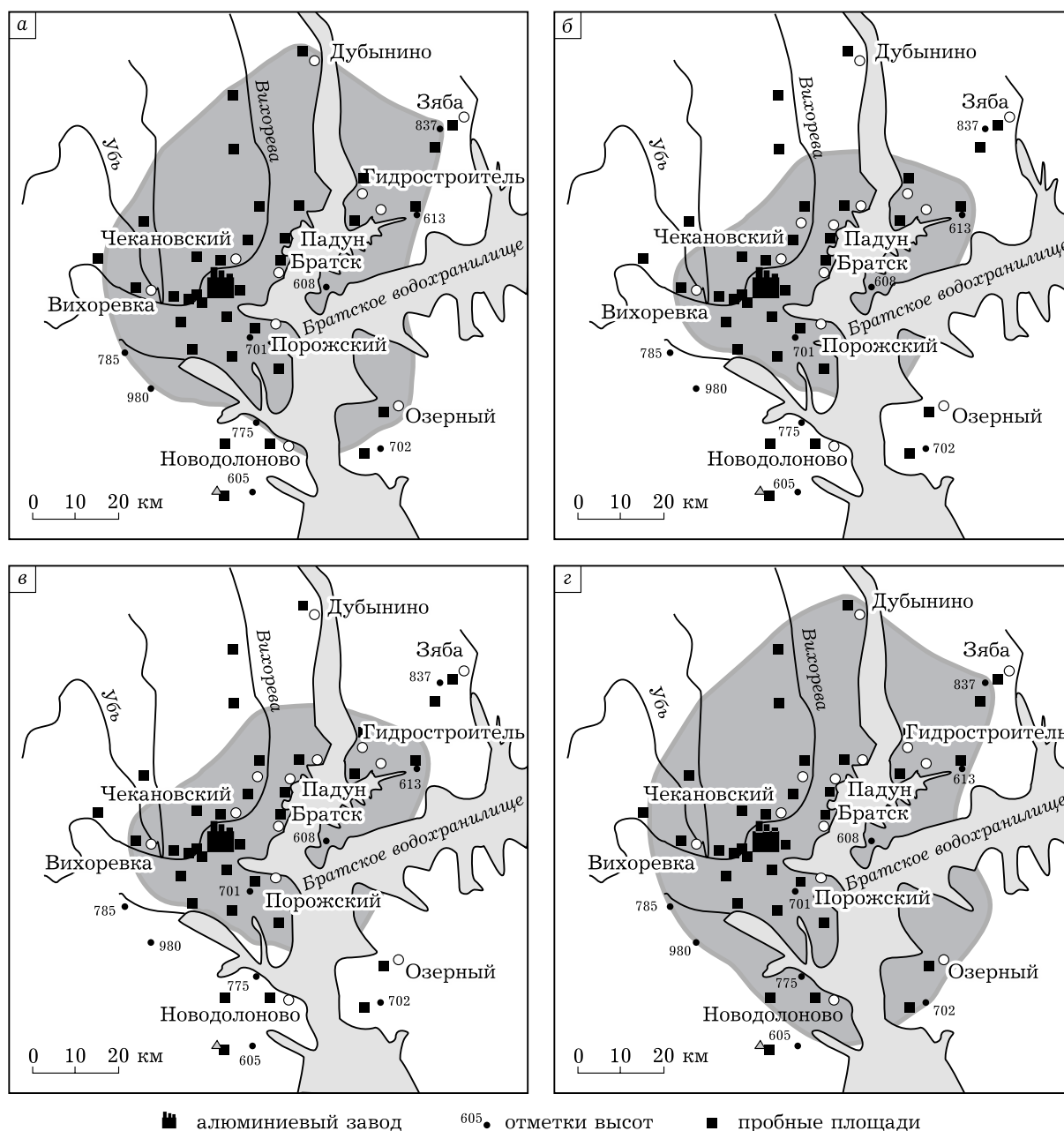


Рис. 1. Карты-схемы распространения фторсодержащих (а) и серосодержащих (б) выбросов, твердой аэрозольной фракции (в), полициклических ароматических углеводородов (г) с выбросами Братского алюминиевого завода

ферментный состав антиоксидантных ферментов [Калугина и др., 2018; Kalugina et al., 2021б], жирнокислотный состав суммарных липидов хвои [Kalugina et al., 2021а]. Полученные результаты свидетельствуют о выраженной мобилизации защитных свойств сосны, причем в зависимости от уровня техногенного загрязнения хвои меняется степень проявления защитных функций ферментативных

и неферментативных антиоксидантных компонентов. При критическом уровне нагрузки, выявленной в промышленной зоне БрАЗа, происходит резкое снижение активности ферментов и достоверное истощение пула низкомолекулярных антиоксидантов.

На следующем этапе необходимо было оценить ЖС сосновых древостоев с учетом структурно-функциональных изменений

ассимиляционного аппарата и функционирования антиоксидантной системы защиты на территориях, загрязняемых выбросами алюминиевого производства. Эта задача была сопряжена с необходимостью учета многих параметров, имеющих разные значения и размерности, поскольку само понятие ЖС является комплексным и характеризуется большим набором частных показателей, имеющих разные единицы измерения, как качественные, так и количественные. Например, уровень дефолиации крон деревьев оценивается в процентах, длина побегов – в сантиметрах, а масса хвои – в миллиграммах, содержание пигментов – в миллиграммах на массу хвои побега, активность ферментов – в условных единицах на 1 мг сырой массы хвои, концентрация неорганических элементов – в миллиграммах на 1 кг сухой массы, ПАУ – в нанограммах на 1 г. Таким образом, оценка ЖС древостоев – задача многокритериальная, требующая использования математических методов для преобразования исходных данных и перехода к интервальным градициям результирующей шкалы. Часто при необходимости выбора из большого количества данных возникает необходимость в использовании специальных числовых шкал.

Для разработки диагностической шкалы и ранжирования древостоев по степени снижения их ЖС из большого набора измеренных параметров были выделены две группы наиболее тесно связанных с ключевым параметром загрязнения – уровнем накопления элементов-поллютантов в хвое. В первую группу вошли показатели, характеризующие

состояние ассимилирующей фитомассы деревьев и ростовых процессов у сосны. К ним относятся: процент зеленой хвои в кроне дерева (показатель, обратный уровню дефолиации), масса хвои на побегах, количество хлорофиллов ($a + b$) в хвое побега, величина соотношения белкового и небелкового азота в хвое, величина соотношения F_v/F_m – показателя максимальной фотохимической эффективности фотосистемы II. Выделенные репрезентативные показатели обнаруживают наиболее тесную отрицательную корреляционную связь с накоплением в хвое фтора, серы, элементов, входящих в состав твердого аэрозоля, приоритетных ПАУ (табл. 1).

Эти показатели имеют сходную динамику, зависящую от уровня аккумуляции загрязняющих элементов в хвое. Она выражается в нелинейном их снижении с ростом концентрации органических и неорганических поллютантов в хвое (рис. 2). При этом значительный спад часто обнаруживается уже при двукратном увеличении количества поллютантов по сравнению с фоновым уровнем. При увеличении содержания загрязняющих элементов в 3 раза и более происходит резкое снижение рассматриваемых параметров, а минимальный уровень регистрируется при увеличении количества поллютантов в хвое более чем в 25 раз.

Во вторую группу вошли репрезентативные показатели, характеризующие эффективность работы антиоксидантной системы у деревьев, подвергающихся воздействию выбросов алюминиевого производства. Это содержание низкомолекулярных метаболитов –

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты корреляции между параметрами, характеризующими состояние ассимилирующей фитомассы и ростовые процессы деревьев, и содержанием приоритетных органических и неорганических поллютантов в хвое сосны (уровень существенности 0,05, $n = 43$ значения для каждого параметра)

Параметр деревьев	Поллютант			
	Фтор	Сера	Твердый аэрозоль	Сумма ПАУ*
Процент зеленой хвои в кроне	–0,845	–0,517	–0,647	–0,718
Масса хвои побегов 2-го года жизни	–0,629	–0,506	–0,602	–0,628
Уровень хлорофиллов ($a + b$) в хвое	–0,676	–0,509	–0,484	–0,527
Соотношение N белковый / N небелковый	–0,757	–0,409	–0,459	–0,619
Соотношение F_v/F_m	–0,670	–0,483	–0,721	–0,772

* Приводятся данные суммарного содержания 16 приоритетных ПАУ и перилена.

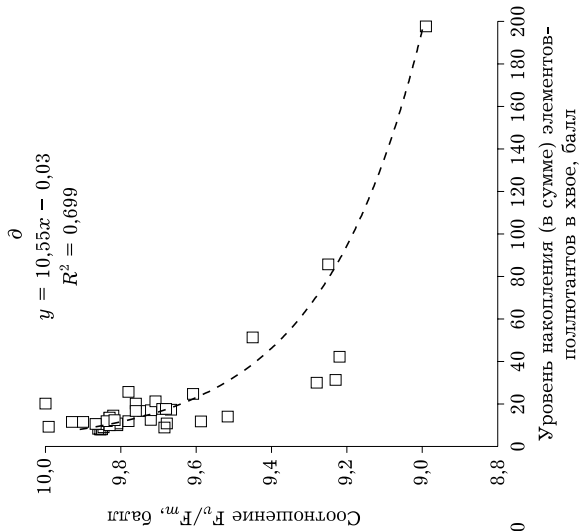
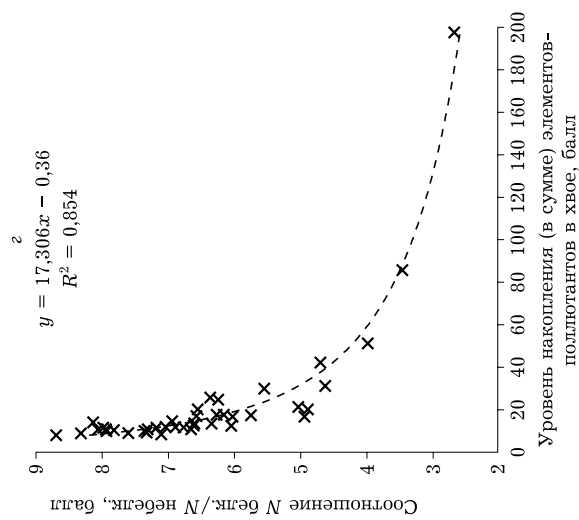
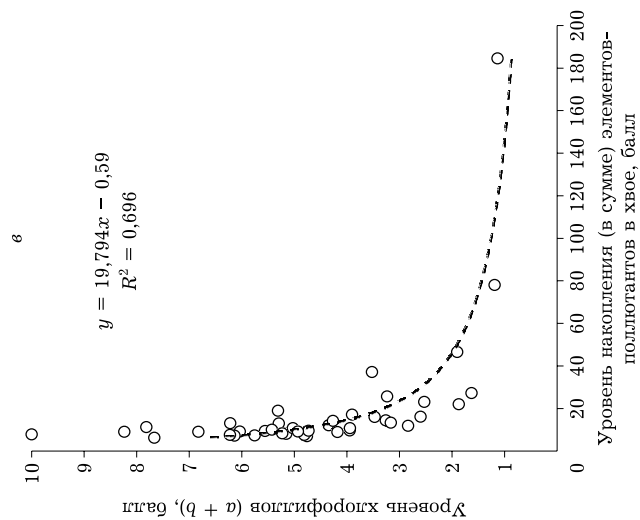
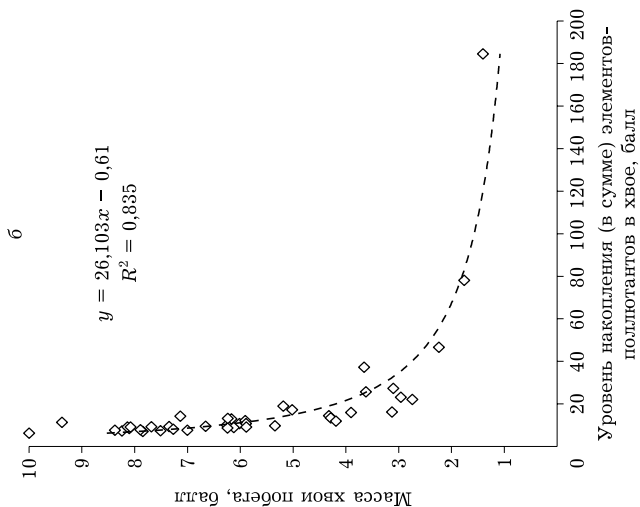
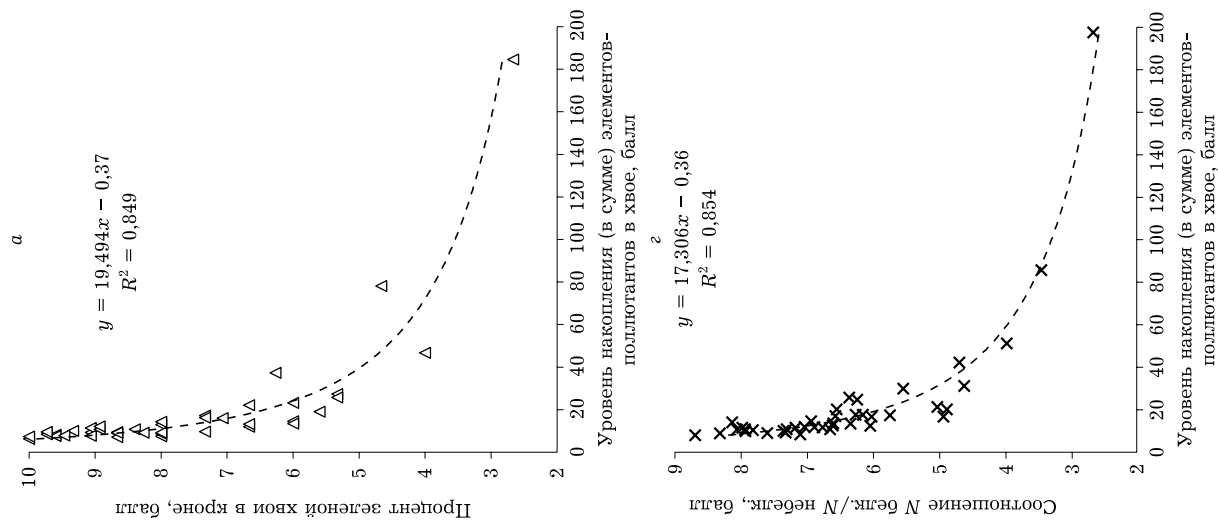


Рис. 2. Изменение репрезентативных показателей состояния ассимилирующей фитомассы деревьев и ростовых процессов сосны при накоплении загрязняющих элементов в хвое.

а – процент зеленой хвои; б – масса хвои побега 2-го года жизни; в – уровень хлорофиллов (a + б); з – соотношение белкового и небелкового азота; д – соотношение F_v/F_m в хвое. Все показатели выражены в нормированных относительно фона единицах (баллах)

пролина, катехина (индивидуальных органических соединений из группы флавоноидов), общего глутатиона и дигетогулоновой кислоты (ДКГК), образующейся при необратимом окислении аскорбиновой кислоты, а также активность фермента пероксидазы.

В отличие от показателей 1-й группы, эти параметры имеют достоверную положительную корреляционную связь с накоплением в хвое приоритетных поллютантов (табл. 2). Между показателями 2-й группы и уровнем аккумуляции загрязняющих соединений выявлена схожая полиномиальная зависимость с высоким уровнем аппроксимации ($R^2 = 0,674-0,731$) (рис. 3). При увеличении концентрации поллютантов до 80 раз в сравнении с фоновым уровнем содержание низкомолекулярных метаболитов и активность пероксидазы возрастают, при большем загрязнении происходит ингибирование их синтеза и активности.

Далее, на основе показателей, входящих в 1-ю группу, вычислялся интегральный индекс состояния ассимилирующей фитомассы и ростовых процессов деревьев на каждой ПП. Он рассчитывался как средний балл от суммы пяти показателей и выражался в единицах, нормированных относительно фоновых значений, принятых за 10 баллов. Метод расчета подробно изложен ранее в [Михайлова и др., 2005]. Аналогично рассчитывали индекс эффективности работы антиоксидантной системы. Подобная формализация данных позволяет снизить субъективность проводимых оценок и сопоставить несоизмеримые между собой по размерности параметры.

Применяя регрессионный анализ, математически выявлялись зависимости между рассчитанными индексами и уровнем накопления элементов-поллютантов в хвое. Установлено, что формализованная зависимость между индексом состояния ассимилирующей фитомассы и уровнем загрязнения имеет высокий уровень аппроксимации ($R^2 = 0,866$) и описывается уравнением степенной функции следующего вида: $y = 16,208x^{-0,316}$, где y (в баллах) – индекс, свидетельствующий об угнетении состояния ассимилирующей фитомассы и ростовых процессов у деревьев сосны в условиях загрязнения; x (в баллах) – суммарное накопление элементов-поллютантов (рис. 4). Зависимость между индексом эффективности работы антиоксидантной системы и уровнем загрязнения описывается уравнением (полиномом): $y = -0,0005x^2 + 0,107x + 0,929$, где y (в баллах) – показатель увеличения (или ослабления) интенсивности работы антиоксидантной системы; x (в баллах) – суммарное накопление элементов-поллютантов (см. рис. 4).

Выделенный нами комплекс репрезентативных показателей адекватно характеризует состояние ассимилирующей фитомассы и ростовых процессов, а также эффективность работы антиоксидантной системы у сосны, и поэтому, он, на наш взгляд, достаточен для разработки диагностической шкалы, по которой можно оценить степень снижения ЖС древостоев при воздействии эмиссий алюминиевого производства. Использование индексов как интегральной величины для оценки жизненного состояния деревьев сосны на

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты корреляции между параметрами, характеризующими эффективность работы антиоксидантной системы деревьев, и содержанием приоритетных органических и неорганических поллютантов в хвое сосны (уровень существенности 0,05, n – 40 значений для каждого параметра)

Параметр деревьев	Поллютант			
	Фтор	Сера	Твердый аэрозоль	Сумма ПАУ*
Количество пролина	0,761	0,497	0,618	0,805
Количество катехинов	0,628	0,481	0,742	0,689
Количество ДКГК	0,518	0,459	0,613	0,586
Количество глутатиона общего	0,609	0,438	0,419	0,435
Активность пероксидазы	0,669	0,598	0,495	0,758

* Приводятся данные суммарного содержания 16 приоритетных ПАУ и перилена.

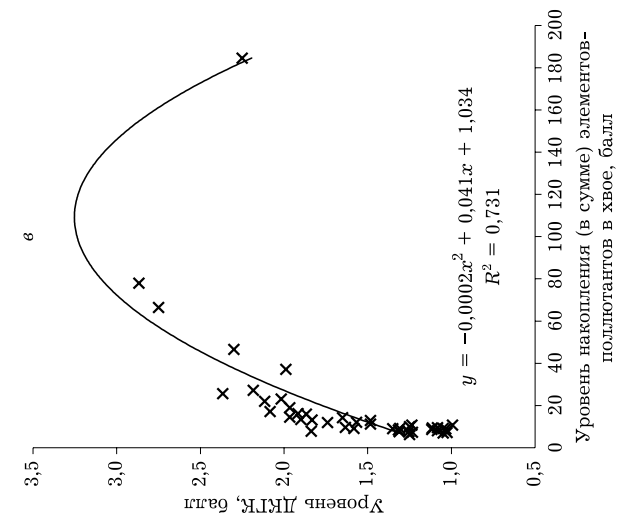
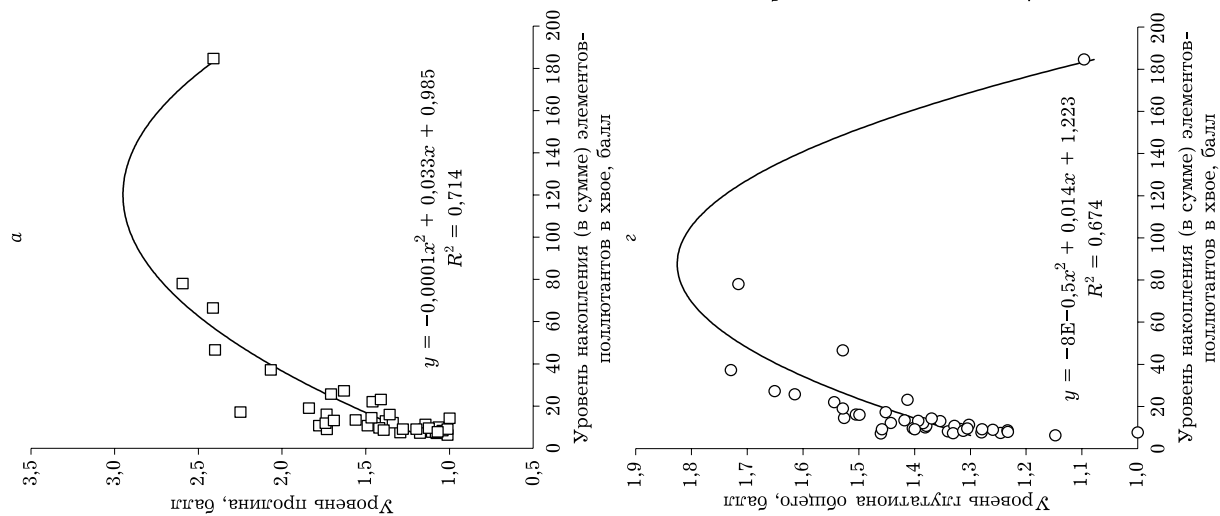
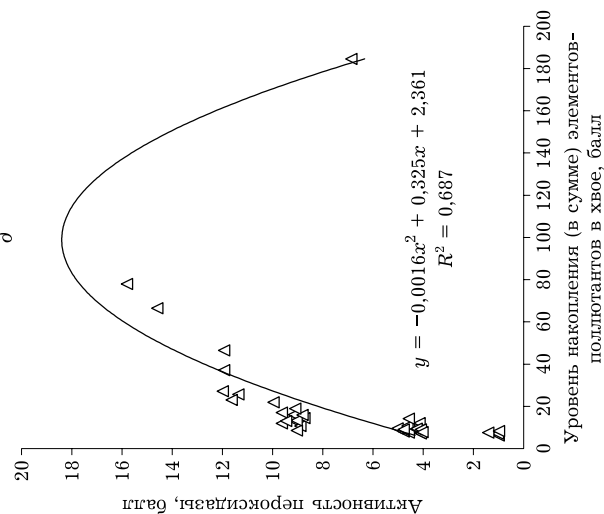


Рис. 3. Изменение репрезентативных показателей эффективности работы антиоксидантной системы у деревьев сосны при накоплении загрязняющих элементов в хвое. а – уровень пролина в хвое побегов 2-го года жизни; б – уровень катехинов в хвое побегов 2-го года жизни; в – уровень дикетоглутоновой кислоты в хвое побегов 2-го года жизни; z – уровень общего глутатиона; д – активность пероксидазы в хвое. Все показатели выражены в нормированных относительно фона единицах (баллах)



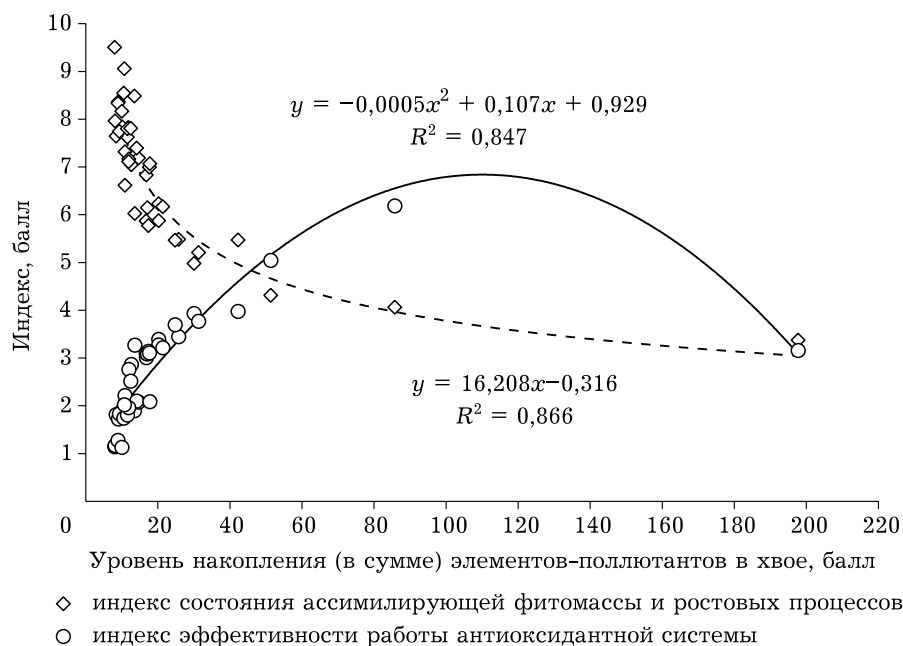


Рис. 4. Зависимость между усредненными индексами состояния ассимилирующей фитомассы и ростовых процессов, эффективности работы антиоксидантной системы и уровнем загрязнения древостоев сосны выбросами алюминиевого производства

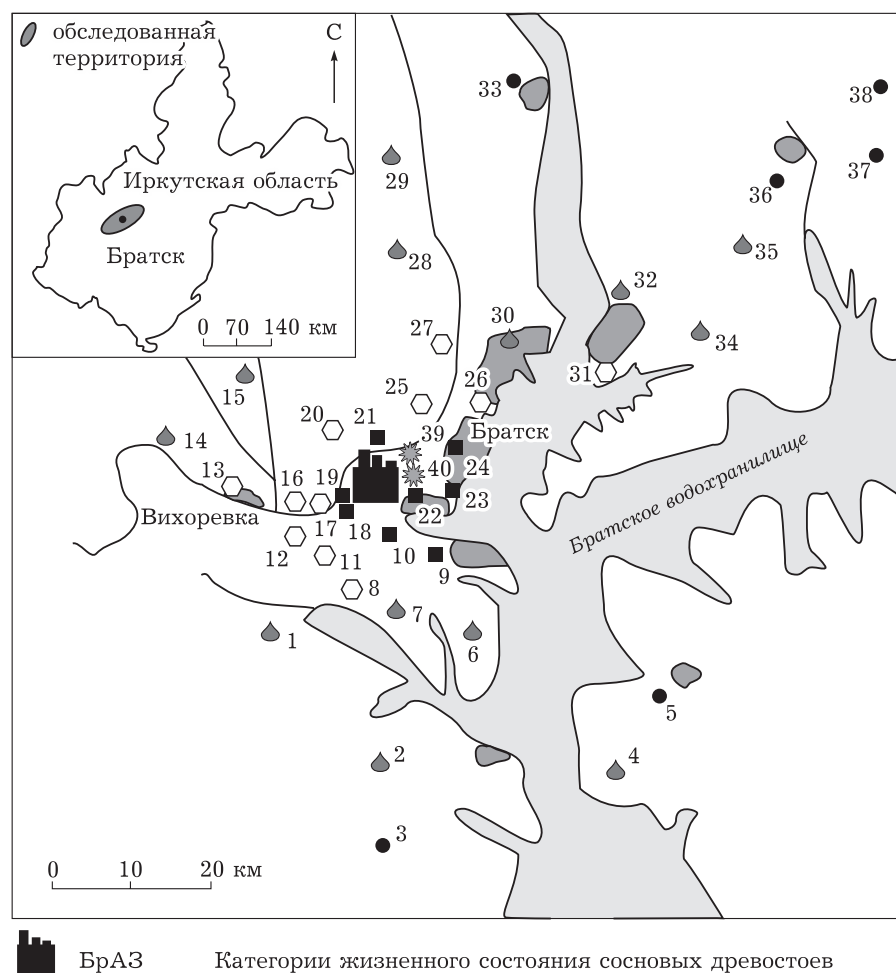


Рис. 5. Карта-схема распространения сосновых древостоев разных категорий жизненного состояния на территории, загрязняемой выбросами Братского алюминиевого завода

Т а б л и ц а 3

Шкала оценки жизненного состояния сосновых древостоев на территориях, загрязняемых выбросами алюминиевого производства

Категория жизненного состояния	Степень снижения жизненного состояния, %	Индекс состояния фитомассы и ростовых процессов, балл	Репрезентативные показатели состояния ассимилирующей фитомассы и ростовых процессов*				Индекс эффективности работы антиоксидантной системы, балл				Репрезентативные показатели эффективности работы антиоксидантной системы			
			Доля зеленой хвой в кроне дерев	Масса хвой на побегах 2-го года жизни, г	Содержание хлорофиллов в хвое побега 2-го года жизни, мг/ масса побега	Соотноше- ние N белк./ N небелк.	Соотно- шение F_v/F_m	Уровень пролина в хвое, мг/г сухой массы	Уровень катехинов в хвое, мг/г сухой массы	Уровень ДНК в хвое, мг/г сырой массы	Уровень глютаино- на общего, мкмоль/г сырой массы	Актив- ность перокси- дазы, мкмоль/ мг белка		
Здоровые (фоновые)	0–10	8,5–10,0	75–80	7,78 ± 0,6	8,68 ± 0,5	7,08 ± 0,8	0,80 ± 0,03	1,0–1,8	0,51 ± 0,05	5,26 ± 0,2	0,07 ± 0,01	0,34 ± 0,03	0,06 ± 0,01	
Слабо угнетенные	11–30	7,1–8,4	61–74	5,50 ± 0,5	4,74 ± 0,3	5,11 ± 0,4	0,78 ± 0,01	1,9–2,5	0,59 ± 0,05	6,35 ± 0,6	0,08 ± 0,01	0,35 ± 0,04	0,24 ± 0,01	
Среднеугнетенные	31–49	5,2–7,0	41–60	3,59 ± 0,4	3,28 ± 0,2	4,29 ± 0,4	0,76 ± 0,03	2,6–3,5	0,77 ± 0,07	7,71 ± 0,7	0,11 ± 0,02	0,38 ± 0,05	0,55 ± 0,04	
Сильно угнетенные	50–69	4,3–5,1	31–40	2,45 ± 0,2	2,23 ± 0,1	3,34 ± 0,3	0,74 ± 0,03	3,6–6,2	0,99 ± 0,09	9,67 ± 0,9	0,14 ± 0,02	0,44 ± 0,06	0,72 ± 0,04	
Усыхающие	> 70	<4,2	25–30	1,23 ± 0,2	1,01 ± 0,1	2,18 ± 0,2	0,72 ± 0,02	3,0–3,5	0,60 ± 0,03	7,08 ± 0,6	0,12 ± 0,02	0,27 ± 0,04	0,41 ± 0,03	

* Величина показателей для каждого шага шкалы дана с учетом отклонений фактически полученных величин от рассчитанных по уравнению регрессии.

загрязняемых территориях, по нашему мнению, наиболее приемлемо для свертывания большого объема полученных эмпирических данных. Подобный подход, основанный на интегрировании фактических материалов в виде обобщенных индексов, довольно широко применяется в экспертных оценках состояния техногенно загрязняемых лесных экосистем [Бутусов, Степанов, 2000; Власенко и др., 2001; Беднова, 2014; Ромашкин и др., 2019].

На основании установленных зависимостей нами построена шкала оценки жизненного состояния сосновых древостоев на территориях, загрязняемых выбросами алюминиевого производства (табл. 3). В соответствии с количественными данными репрезентативных показателей выделено пять категорий жизненного состояния древостоев: здоровые (фоновые), слабо угнетенные, среднеугнетенные, сильно угнетенные и усыхающие. Согласно шкале можно определить, на сколько процентов снижено ЖС деревьев на конкретной пробной площади. Применяя данную шкалу, возможно выявить изменения на самых ранних стадиях, когда внешние признаки ослабления деревьев еще не проявляются или выражены в минимальной степени.

На основе разработанной шкалы составлена карта-схема, отражающая распространение сосновых лесов разной степени угнетения их ЖС при воздействии техногенных эмиссий Братского алюминиевого завода. Для построения использованы данные о состоянии деревьев сосны на всех 40 ПП, заложенных на обследованной территории. В результате проведенного картографирования выделены территории с разным уровнем ЖС сосновых насаждений (рис. 5). Максимальное снижение ЖС (более 70 %) наблюдается в усыхающих древостоях на локальных участках в промышленной зоне БрАЗа, снижение в пределах 50–69 % обнаруживается в сильно угнетенных древостоях, произрастающих в разных направлениях от завода на удалении до 10 км, снижение на 31–49 % характерно для среднеугнетенных древостоев на расстоянии до 40 км, снижение ЖС на 11–30 % – для слабо угнетенных древостоев на расстоянии 40–60, реже 80 км от БрАЗа. На остальной части обследованной территории изменения в ЖС древостоев сосны минимальны, что позволяет охарактеризовать их как здоровые (фоновые).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате многолетних исследований состояния сосновых древостоев, загрязняемых выбросами Братского алюминиевого завода, накоплен обширный материал. Из большого набора разноразмерных показателей выбраны наиболее репрезентативные, которые в дальнейшем легли в основу диагностической шкалы оценки жизненного состояния древостоев, подвергающихся воздействию техногенных эмиссий. Введение в шкалу интегральных индексов, характеризующих состояние ассимилирующей фитомассы и ростовых процессов деревьев сосны, а также эффективность работы антиоксидантной системы, оказалось эффективным при свертывании разнообразных данных. Применяя данную шкалу, возможно выявить изменения на самых ранних стадиях, когда внешние признаки ослабления деревьев еще не проявляются или выражены в минимальной степени. Результаты расчетов перенесены на топографическую основу, что позволило визуализировать состояние сосновых древостоев и дифференцировать обследуемую территорию по рассматриваемому параметру. В целом разработанная нами диагностическая шкала пригодна для использования оценки степени снижения жизненного состояния сосновых древостоев, загрязняемых выбросами алюминиевого производства, на территориях других регионов нашей страны с учетом их возрастной структуры и особенностей воздействующих абиотических факторов.

ЛИТЕРАТУРА

- Авдеева Е. В., Извеков А. А. Урбодендрология. Ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) и ель колючая (*Picea pungens* Engelm.) в насаждениях города Красноярска. Красноярск, 2021. 180 с.
- Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.
- Беднова О. В. Технология нормирования и индикации состояния лесных экосистем в условиях городских особо охраняемых природных территорий // Лесн. вестник. 2014. № 6. С. 36–52.
- Бобкова К. С., Робакидзе Е. А., Галенко Э. П. Жизненное состояние древостоев и подрост коренных ельников предгорий Урала бассейна верхней Печоры // Сиб. экол. журн. 2010. Т. 17, № 2. С. 271–280. [Bobkova K. S., Robakidze E. A., Galenko E. P. Health state of the stands and the young growth in the native Spruce forests at the Ural foothills, the upper reaches of the Pechora river // Contemporary Problems of Ecology. 2010. Vol. 3, N 2. P. 196–202].
- Бутусов О. Б., Степанов А. М. Анализ экологического состояния лесных экосистем в районах атмосферного химического загрязнения // Лесоведение. 2000. № 1. С. 32–38.
- Власенко В. Э., Менщиков С. Л., Андреев Г. В. К вопросу об изучении продуктивности сосновых лесов в условиях регионального промышленного загрязнения // Лесн. таксация и лесоустройство. 2001. № 1. С. 145–147, 199–207.
- Временная методика по учету сосновых насаждений, подверженных влиянию промышленных выбросов. М., 1986. 36 с.
- Горшков А. Г. Определение полициклических ароматических углеводородов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – биомонитор загрязнения атмосферы // Журн. аналит. химии. 2008. Т. 63, № 8. С. 880–886. [Gorshkov A. G. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Needles of a Scotch Pine (*Pinus Sylvestris* L.), a Biomonitor of Atmospheric Pollution // J. Analyt. Chem. 2008. Vol. 63, N 8. P. 805–811].
- Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды в Иркутской области в 2021 году. Ижевск: ООО “Принт”, 2022. 252 с.
- Демидко Д. А. Виталитетная структура ненарушенных древостоев кедров сибирского в субальпийском подпоисе и на верхней границе леса в Горном Алтае // Экология. 2006. Т. 37, № 5. С. 359–362. [Demidko D. A. Vitality structure of undisturbed Siberian stone Pine stands in the subalpine belt and the timberline in the mountain // Russian Journal of Ecology. 2006. Vol. 37, N 5. P. 359–362].
- Ермаков А. И., Арасимович В. В., Ярош Н. П., Перуанский Ю. В., Луковникова Г. А., Иконникова М. И. Методы биохимического исследования растений / под ред. А. И. Ермакова. М.: Агропромиздат. Ленингр. отделение, 1987. 430 с.
- Жидков А. Н., Коженков Л. Л. Экологические проблемы охраны лесов // Лесохозяйственная информация. 2014. № 4. С. 25–32.
- Запрометов М. Н. Фенольные соединения: распространение, метаболизм и функции в растениях. М.: Наука, 1993. 271 с.
- Захаров В. М., Кряжева Н. Г., Дмитриев С. Г., Трофимов И. Е. Оценка возможных изменений состояния популяций вследствие климатических изменений (на примере исследования стабильности развития березы повислой) // Успехи соврем. биологии. 2011. Т. 131, № 4. С. 425–430.
- Злобин Ю. А. Принципы и методы изучения ценологических популяций растений. Казань: Казанский ун-т, 1989. 146 с.
- Калугина О. В., Афанасьева Л. В. Особенности морфоструктурных параметров *Pinus sylvestris* L. в условиях воздействия эмиссий алюминиевого производства // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. Вып. 3. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2020. С. 99–103.
- Калугина О. В., Михайлова Т. А., Шергина О. В. Биохимическая адаптация сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) к техногенному загрязнению // Сиб. экол. журн. 2018. Т. 25, № 1. С. 98–110. [Kalugina O. V., Mikhailova T. A., Shergina O. V. Biochemical Adaptation of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) to technogenic pollution // Contemporary Problems of Ecology. 2018. Vol. 11, N 1. P. 79–88].

- Лесной фонд России (по учету на 1 января 1998 года): справочник. М.: ВНИИЦлесресурс, 1999. 649 с.
- Лукина Н. В., Никонов В. В. Биохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. В 2 ч. Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра РАН, 1996. Ч. 1. 213 с.; Ч. 2. 192 с.
- Митрофанов Е. М. Разработка методики геопространственного анализа деградации лесной растительности по гиперспектральным данным дистанционного зондирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 24 с.
- Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Игнатьева О. В. Элементный состав хвои и морфофизиологические параметры сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения / отв. ред. А. С. Плешанов. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2006. 134 с.
- Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Суворова Г. Г., Игнатьева О. В., Шергина О. В. Трансформация ассимиляции углерода в древостоях, ослабленных промышленными эмиссиями // Сиб. экол. журн. 2005. Т. 12, № 4. С. 745–751.
- 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., Плешанов А. С., Афанасьева Л. В. Картографическая оценка загрязнения лесных экосистем Байкальской природной территории техногенными эмиссиями // География и природ. ресурсы. 2008. № 4. С. 18–23. [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 and Natural Resources. 2008. Vol. 29, N. 4. P. 317–320].
- Ромашкин Д. Ю., Ромашкина И. В., Калнин В. В., Прокопов А. А., Карпов А. Д. Морфогенетическая оценка биологической устойчивости лесных насаждений в условиях радиоактивного загрязнения // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2019. Т. 23, № 2. С. 84–91.
- Санитарные правила в лесах СССР. М.: Гослесхоз СССР, 1970. 16 с.
- Скрипальщикова Л. Н., Стасова В. В. Биоиндикационные показатели стабильности развития насаждений в нарушенных ландшафтах // Сиб. лесн. журн. 2014. № 2. С. 67–72.
- Суворова Г. Г., Попова Е. В. Фотосинтетическая продуктивность хвойных древостоев Иркутской области / отв. ред. Р. К. Салаяев. Новосибирск: Акад. изд-во Гео, 2015. 95 с.
- Тарханов С. Н., Прожерина Н. А., Коновалов В. Н. Лесные экосистемы бассейна Северной Двины в условиях атмосферного загрязнения: диагностика состояния. Екатеринбург: Уральск. отд-ние РАН, 2004. 333 с.
- Тужилкина В. В., Плюснина С. Н. Структурно-функциональные изменения хвои сосны в условиях аэротехногенного загрязнения // Лесоведение. 2020. № 6. С. 537–547.
- Харук В. И., Антамошкина О. А. Воздействие сибирского шелкопряда на горимость лесных территорий // Сиб. экол. журн. 2017. Т. 24, № 5. С. 647–654. [Kharuk V. I., Antamoshkina O. A. Impact of Silkmouth outbreak on taiga wildfires // Contemporary Problems of Ecology. 2017. Vol. 10, N 5. P. 556–562].
- Харук В. И., Им С. Т., Петров И. А., Ягунов М. Н. Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья // Сиб. экол. журн. 2016. Т. 23, № 5. С. 750–760. [Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Yagunov M. N. Decline of dark coniferous stands in Baikal Region // Contemporary Problems of Ecology. 2016. Vol. 9, N 5. P. 617–625].
- Чаплыгина И. А., Антонова Г. Ф. Опыт определения аскорбиновой и дегидроаскорбиновой кислот в формирующейся древесине лиственницы сибирской // Ботанические исследования в Сибири / под ред. В. Л. Черепнина и др. Красноярск, 2002. С. 254–257.
- Черненко Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука, 2002. 191 с.
- Швиденко А. З., Ваганов Е. А., Нильссон С. Биосферная роль лесов на старте третьего тысячелетия: углеродный бюджет и протокол Киото // Сиб. экол. журн. 2003. Т. 10, № 6. С. 649–658.
- Щепаченко Д. Г., Швиденко А. З., Шалаев В. С. Биологическая продуктивность и бюджет углерода лиственничных лесов Северо-Востока России. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 296 с.
- Ярмишко В. Т., Горшков В. В., Ставрова Н. И. Виталитетная структура *Pinus sylvestris* L. в лесных сообществах с разной степенью и типом антропогенной нарушенности (Кольский полуостров) // Раст. ресурсы. 2003. Т. 39, вып. 4. С. 1–18.
- Afanasyeva L. V., Kalugina O. V., Mikhailova T. A. The effect of aluminum smelter emissions on nutritional status of coniferous trees (Irkutsk Region, Russia) // Environ. Sci. Pollut. Res. 2021. Vol. 28, N 44. P. 62605–62615.
- Allen-Gil S. M., Ford J., Lasorsa B. K., Monetti M., Vlasova T., Landers D. H. Heavy metal contamination in the Taimyr Peninsula, Siberian Arctic // Sci. Total Environ. 2003. Vol. 301, N 1–3. P. 119–138.
- Anderegg L. D. L., Anderegg W. R. L., Berry J. A. Tree physiology review: Not all droughts are created equal: Translating meteorological drought into woody plant mortality // Tree Physiol. 2013. Vol. 33, N 7. P. 701–712.
- Bates L. S., Walden R. P., Tear J. D. Rapid determination of free proline for water stress studies // Plant Soil. 1973. Vol. 39, N 1. P. 205–210.
- Bauduin S. L., Clerbaux C. C., Hurtmans D., Coheur P.-F. IASI observations of sulfur dioxide (SO₂) in the boundary layer of Norilsk // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. Vol. 119. P. 4253–4263.
- Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K. V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivative stress: a review // Annals of Botany. 2003. Vol. 91, N 2. P. 179–194.
- Brang P. (Ed.) Sanasilva-Bericht 1997. Zustand und Gefährdung des Schweizer Waldes eine Zwischenbilanz nach 15 Jahren Waldschadenforschung. Ber. Eidgenöss. Forsch. anst. Wald, Schnee Landsch. 345. 1998. 102 S. (in German, with English abstract).
- Brown S., Narine L. L., Gilbert J. Using Airborne Lidar, Multispectral Imagery, and Field Inventory Data to Estimate Basal Area, Volume, and Aboveground Biomass in Heterogeneous Mixed Species Forests: A Case Study in Southern Alabama // Remote Sens. 2022. Vol. 14, N 11. P. 2708.
- Forman H. J., Zhang H., Rinna A. Glutathione: overview of its protective roles, measurement, and biosynthesis // Mol. Aspects Med. 2009. Vol. 30, N 1–2. P. 1–12.
- Gytarsky M., Karaban R., Nasarov I. M., Sysygina T. I., Cheremis M. V. Monitoring of forest ecosystems in the Russian subarctic; effects of industrial pollution // Sci. Total Environ. 1995. Vol. 164. P. 57–68.

- Hasanuzzaman M., Bhuyan M. H. M., Zulfiqar F., Raza A., Mohsin S. M., Mahmud J. A., Fujita M., Fotopoulos V. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator // *Antioxidants*. 2020. Vol. 9, N 8. P. 681.
- Kalugina O. V., Mikhailova T. A., Afanasyeva L. V., Gurina V. V., Ivanova M. V. Changes in the fatty acid composition of pine needle lipids under the aluminum smelter emissions // *Ecotoxicology*. 2021a. Vol. 29, N 4. P. 1287–1289.
- Kalugina O. V., Mikhailova T. A., Afanasyeva L. V., Shergina O. V. Activity and isozyme composition of peroxidase in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles effected by technogenic emissions from various enterprises and vehicles // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2021b. Vol. 13, N 1. C. 11–34.
- Kalugina O. V., Mikhailova T. A., Shergina O. V. *Pinus sylvestris* as a bio-indicator of territory pollution from aluminum smelter emissions // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2017. Vol. 24, N 11. P. 10279–10291.
- Kasischke E. S., Hyer E. J., Novelli P. C., Bruhwiler L. P., French N. H. F., Sukhinin A. I., Hewson J. H., Stocks B. J. Influences of boreal fire emissions on Northern Hemisphere atmospheric carbon and carbon monoxide // *Global Biogeochem. Cycles*. 2005. Vol. 19. GB1012.
- Kirdyanov A. V., Krusic P. J., Shishov V. V., Vaganov E. A., Fertikov A. I., Myglan V. S., Barinov V. V., Browse J., Esper J., Ilyin V. A., Knorre A. A., Korets M. A., Kulkarskikh V. V., Mashukov D. A., Onuchin A. A., Piermattei A., Pimenov A. V., Prokushkin A. S., Ryzhkova V. A., Shishikin A. S., Smith K. T., Taynik A. V., Wild M., Zorita E., Buntgen U. Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution // *Ecol. Lett.* 2020. Vol. 23. P. 1827–1837.
- Kumar V., Khare T., Sharma M., Wani S. H. ROS-induced signaling and gene expression in crops under salinity stress. In *Reactive Oxygen Species and Antioxidant Systems in Plants: Role and Regulation under Abiotic Stress*. Singapore: Springer, 2017. P. 159–184.
- Lassalle G. Monitoring natural and anthropogenic plant stressors by hyperspectral remote sensing: Recommendations and guidelines based on a meta-review // *Sci. Total Environ.* 2021. Vol. 788. P. 147758.
- Lichtenthaler H. K., Welburn A. R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents // *Biochem. Soc. Trans.* 1983. Vol. 11, N 6. P. 591–592.
- McEnroe N. A., Helmisaari H.-S. Decomposition of coniferous forest litter along a heavy metal pollution gradient, south-west Finland // *Environ. Pollut.* 2001. Vol. 113. P. 11–18.
- Mikhailova T. A. The physiological condition of pine trees in the Prebaikalia (East Siberia) // *Forest Pathol.* 2000. N 30. P. 345–359.
- Porter L. J., Hrstich L. N., Chan B. G. The conversion of procyanidins and prodelphinidins to cyanidin and delphinidin // *Phytochemistry*. 1985. Vol. 25, N 1. P. 223–230.
- Schulze E.-D., Vygodskaya N. N., Tchepakova N. M., Czimeczik C. I., Kozlov D. N., Lloyd J., Mollicone D., Parfenova E., Sidorov K. N., Varlagin A. V., Wirth C. The eurosiberian transect: an introduction to the experimental region // *Tellus*. 2002. Vol. 54B (5). P. 421–428.
- Shipunov A. et al. (2016). Visual statistics. Use R. version 2016. http://ashipunov.info/shipunov/school/biol_240/en/.
- Takahashi M., Feng Z., Mikhailova T. A., Kalugina O. V., Shergina O. V., Afanasieva L. V., Jui Heng R. K., Muhammad Abd Majid N., Sase H. Air pollution monitoring and tree and forest decline in East Asia: A review // *Sci. Total Environ.* 2020. Vol. 742. P. 140288.

Development of diagnostic scale for assessing the vital state of pine stands under technogenic pollution by emissions from a large aluminum smelter

O. V. KALUGINA¹, L. V. AFANASYEVA²

¹*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS
664033, Irkutsk, Lermontov str., 132
E-mail: olignat32@inbox.ru*

²*Institute of General and Experimental Biology SB RAS
670047, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6*

In course of many years of research on assessing the state of pine forests polluted by emissions from the Bratsk aluminum smelter, a large array of data of different sizes has been accumulated, and when generalized and structured, two groups of representative indicators were identified. The first group includes indicators with a high degree of reliability characterizing a state of the assimilating phytomass and growth processes of polluted trees: percentage of green needles in the tree crown, mass of needles on the shoots, total content of chlorophyll in the needles of the shoot, ratio of protein and non-protein nitrogen in the needles, value of the ratio F_v/F_m . The second group included indicators reflecting the efficiency of the antioxidant system: content of low-molecular metabolites (proline, catechin, total glutathione digetogulonic acid), as well as the activity of peroxidase enzyme. Based on these parameters, integral indices were calculated. The regression dependences between the indices and a level of pollutant elements accumulation in needles were used to develop a scale for assessing the vital state of forest stands under conditions of technogenic pollution by emissions from a large aluminum smelter. Applying this scale, it is possible to identify changes at the earliest stages, when the external signs of tree weakening are not yet manifested or are minimally expressed. A schematic map has been compiled, reflecting the distribution of pine forests of varying degrees of oppression. It has been established that the maximum weakening in the state of forest stands (more than 70 %) is observed in local areas in the industrial zone of BrAZ, strong (within 50–69 %) is found in different directions from the smelter at a distance of up to 10 km, average (by 31–49 %) – typical for forest stands at a distance of up to 40 km, weak (by 11–30 %) – at a distance of 40–60, less often 80 km from BrA Z. In the rest of the surveyed area, changes in the vital state of pine stands are minimal, which makes it possible to characterize the stands as healthy (background).

Key words: diagnostic scale, *Pinus sylvestris*, vital status, antioxidant system, technogenic emissions, aluminum smelter.