

УДК 581.5 (571.53)

ВИДОВОЙ СОСТАВ И СТРУКТУРА РАСТИТЕЛЬНОСТИ СВЕТЛОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЫБРОСАМИ АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАВОДОВ

Т. М. Харпухаева¹, Л. В. Афанасьева¹, О. В. Калугина², М. В. Оскорбина²

¹ Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047, Республика Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

² Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132

E-mail: takhar@mail.ru, afanl@mail.ru, olignat32@inbox.ru, omaria-84@ya.ru

Поступила в редакцию 24.06.2022 г.

Изучено видовое разнообразие светлохвойных лесов на территории Иркутской области, загрязняемой выбросами трех алюминиевых заводов (Братского, Иркутского и Тайшетского), отличающихся технологией производства и продолжительностью воздействия на леса, где выявлено 188 видов сосудистых растений из 49 семейств, 102 вида лишайников, в том числе 26 видов эпигейных, и 13 видов напочвенных мхов. Установлено, что большая часть видов принадлежит лесному флористическому комплексу, преимущественно светлохвойной поясно-зональной группе. В биоморфологическом спектре доминируют многолетние травянистые растения, наиболее часто встречаются длиннокорневищные (30 % от всей флоры), коротко- (26 %), и стержнекорневые (13 %) растения. В экологическом спектре преобладают виды мезофитного ряда. Обнаружено, что наиболее существенную трансформацию видового состава претерпели лесные сообщества, расположенные в промышленной зоне (в радиусе 0.5 км) БрАЗа, где отмечены критический уровень загрязнения деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), их усыхание и замена на лиственные породы, а деградация травяно-кустарничкового яруса способствовала формированию на почве сплошной моховой подушки из бриума серебристого (*Bryum argenteum* Hedw.). В промышленной зоне ТАЗа и ИркАЗа, где выявлен средний и сильный уровень загрязнения древостоев, соответственно наблюдается увеличение проективного покрытия до 70–85 % и общего числа видов сосудистых растений за счет появления луговых, лесостепных и рудеральных, при этом состав фитоценозов часто меняется в сторону преобладания фотофильных видов. При слабом уровне загрязнения древостоев изменения флористического комплекса менее выражены и статистически не значимы по сравнению с фоновыми территориями.

Ключевые слова: флористический состав, структура светлохвойных лесов, техногенные эмиссии, алюминиевое производство.

DOI: 10.15372/SJFS20220605

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие техногенных эмиссий – один из приоритетных негативных факторов, оказывающих влияние на состояние лесных экосистем Иркутской области. Здесь сосредоточены крупные индустриальные центры теплоэнергетики, топливной, химической и нефтехимической промышленности, при этом ведущей отраслью экономики является металлургическая, в частности алюминиевая, промышленность. В насто-

ящее время в регионе действуют два мощных алюминиевых завода – Братский (БрАЗ) и Иркутский (ИркАЗ), выпускающие ежегодно около 1.5 млн т алюминия. При этом с выбросами БрАЗа в атмосферу поступает около 80 тыс. т загрязняющих веществ /год, с выбросами ИркАЗа около 25 тыс. т/год (Государственный доклад..., 2021). В эксплуатацию БрАЗ и ИркАЗ введены в 1960-х годах, причем на БрАЗе применяется технология Содерберга, на ИркАЗе – технология обожженных анодов. Технология Содерберга по

себестоимости значительно выгоднее, поскольку аноды в течение более продолжительного использования являются электропроводными и механически крепкими. Однако по мере их сгорания выделяется большое количество смолистых веществ, часть из которых высокотоксична для живых организмов. Технология с использованием обожженных анодов хотя и дорогая, но более эффективная в экологическом плане, поскольку израсходованные аноды заменяются предварительно обожженными анодными блоками. В 2020 г. на территории области введен в эксплуатацию еще один завод – Тайшетский (ТАЗ). Это новое высокотехнологическое предприятие, работающее по технологии обожженных анодов, с производственной мощностью 430 тыс. т алюминия.

В силу технологической специфики алюминиевые заводы поставляют в атмосферу значительное количество опасных веществ, таких как фторсодержащие соединения, диоксид серы, оксид углерода, аэрозоли тяжелых металлов, полициклические ароматические углеводороды. Например, с выбросами БрАЗа в 2020 г. в атмосферу поступило оксида углерода 63.4 тыс. т, плохорастворимых фторидов – 1.6 тыс., фтористого водорода – 1.1 тыс., пыли неорганической – 3.4 тыс., диоксида серы – 6.8 тыс., смолистых веществ – 1.4 тыс. т, с выбросами ИркАЗа – 28.4, 0.5, 0.4, 2.1 и 0.4 тыс. т соответственно (Государственный доклад ..., 2021). Официальных данных о качественном и количественном составе эмиссий ТАЗа пока нет. Токсические соединения, поступающие в составе техногенных выбросов, являются сильными стрессорами и могут привести к изменению питательного статуса растений и нарушению многих метаболических процессов. Результаты многолетнего мониторинга состояния сосновых лесов на территориях, подвергающихся воздействию техногенных эмиссий БрАЗа и ИркАЗа, свидетельствуют о наличии выраженного тренда в сторону ухудшения жизненного состояния древостоев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (одной из основных лесобразующих пород региона), снижении ее средообразующего и продукционного потенциала (Михайлова и др., 2017, 2020; Kalugina et al., 2017). Как следствие, в ослабленных лесах отмечается изменение породного состава – снижение доли хвойных деревьев и увеличение доли мелколиственных (Калугина, Афанасьева, 2020), что может стать причиной трансформации исходного облика лесной экосистемы, изменения видового

состава напочвенного покрова, исчезновения целого ряда видов.

Несмотря на длительный период работы БрАЗа и ИркАЗа, исследований по оценке видового разнообразия лесов на территориях рассеивания техногенных выбросов ранее не проводилось. Недостаточность научных знаний о закономерностях техногенной динамики лесных экосистем бореальной зоны, где доминируют хвойные породы, чувствительные к промышленному загрязнению, определяет актуальность таких исследований.

Цель данной работы – провести анализ флористического состава и структуры светлохвойных лесов на территории рассеивания выбросов трех алюминиевых заводов Иркутской области, различающихся технологией производства и продолжительностью воздействия на леса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Натурные исследования проведены с 15 июля по 10 августа 2020 г. в светлохвойных лесах на территории четырех административных районов Иркутской области: Тайшетского, Братского, Шелеховского и Иркутского. Подробно исследовались леса, произрастающие в зонах рассеивания техногенных выбросов Тайшетского, Братского и Иркутского алюминиевых заводов. Вблизи заводов (в радиусе 0.5 км) и на удалении от них (от 1 до 100 км) закладывали пробные площади (пп) размером 25 × 25 м по принятым в лесном хозяйстве методикам, а также с использованием рекомендаций международного руководства ICP Forests (Методы..., 2002; Manual..., 2010). Закладка пп осуществлялась с учетом регионального переноса атмосферного воздуха, специфики локальной циркуляции воздушных масс, особенностей рельефа и гидросети. Всего было заложено 45 пп, расположенных в разных направлениях от заводов, из них на территории рассеивания эмиссий ТАЗа – 15 пп, БрАЗа – 18 пп, ИркАЗа – 12 пп (рис. 1).

На каждой пп были выполнены геоботанические и лесотаксационные описания по стандартным методикам (Шенников, 1964; Методы..., 2002). Номенклатуру видов давали по сводке С. К. Черепанова (1995). Уровень дефолиации крон деревьев сосны оценивали визуально, на основе учета данных не менее трех специалистов с использованием атласа W. Bosshard (1986). Для анализа жизненных форм (биоморф) растений использовали классификацию И. Г. Сереб-

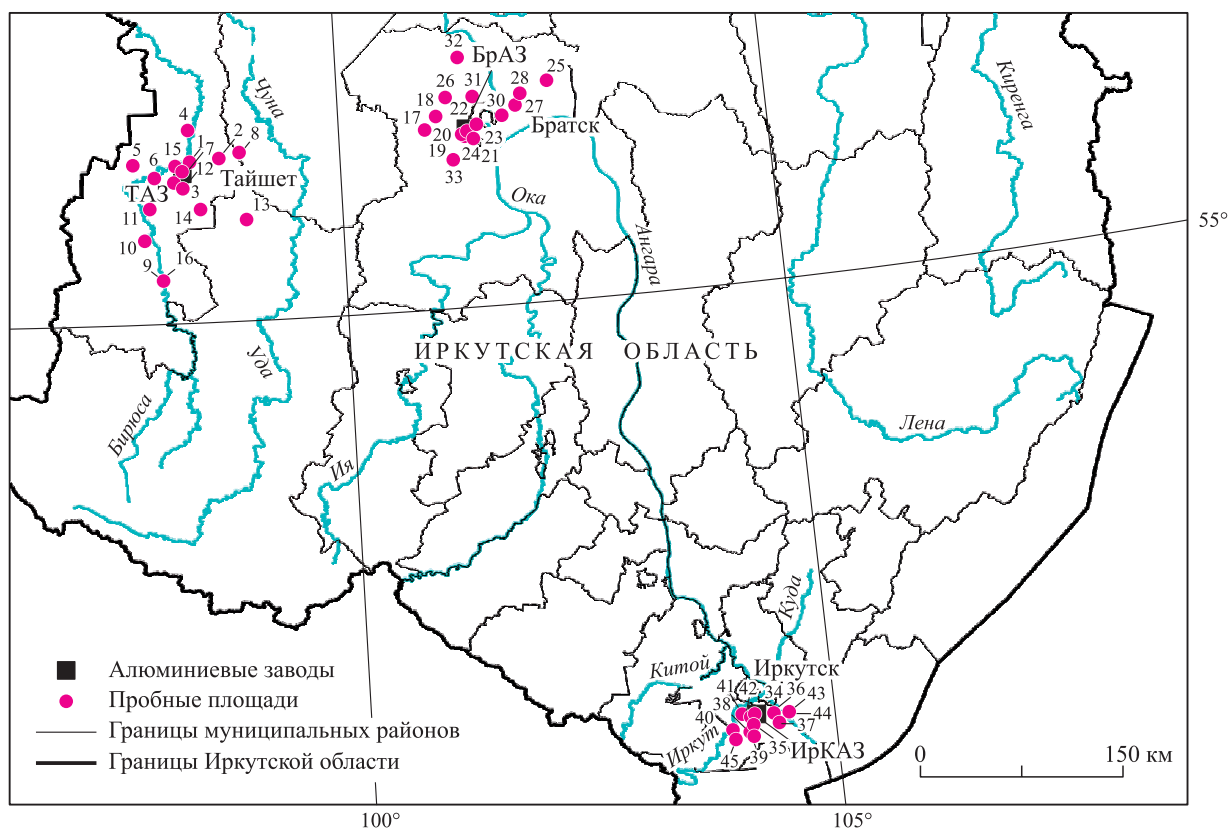


Рис. 1. Схема расположения пробных площадей на территории Иркутской области.

рякова (1962), эколого-ценотическую структуру сообществ устанавливали по общему списку видов, встречаемых в исследуемых сообществах. Обработку описаний и оценку экологических параметров местообитаний фитоценозов проводили с помощью программы IBIS (Зверев, 2007, 2020; Zverev, 2020) по разработанным Д. Н. Цыгановым (1983) шкалам основных прямодействующих факторов, а именно шкале температурного режима (T_m), континентальности (K_n) и влажности (O_m) климата, переменности увлажнения (fH), режима освещенности (L_c), увлажнения почв (H_d), их солевого режима (Tr), богатства азотом (N_t) и кислотности (R_c).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика светлохвойных лесов. Обследованные территории, входят в зону темнохвойных и лиственничных таежных лесов, в настоящее время замененных длительно производными сукцессионными рядами сосновых и лиственнично-сосновых лесов (зоны рассеивания эмиссий ТАЗа и БрАЗа), а также в зону подтаежных сосновых лесов (зона рассеивания эмиссий ИркАЗа). Они относятся к Ангаро-Саянскому флористическому району: на тер-

ритории более северных районов (Тайшетский и Братский, где расположены ТАЗ и БрАЗ соответственно) – к выделу Плато западное, южных районов (Иркутский и Шелеховский, подпадающих под перенос выбросов ИркАЗа) – к выделу Плато южное (Чепинога, 2009). Основные типы почв – серая лесная и подзолистая (Воробьева, 1999; Шишов и др., 2004).

По геоботаническому районированию обследованная территория входит в состав Средне-сибирской таежной области Ангарской южно-таежной подпровинции. При этом Тайшетский район относится к Бирюсинской подтаежно-южно-таежному елово-сосновому округу с лиственницей (*Larix Mill.*) и березой (*Betula L.*), Братский район – к Среднеангарскому подтаежно-южно-таежному елово-сосново-березовому округу, Иркутский и Шелеховский – к Иркутско-Черемховской подгорной подтаежной провинции (Бардаш и др., 2004). Большая часть обследованных лесов в Тайшетском, Шелеховском и Иркутском районах произрастает на серых лесных, в Братском районе – на литоземах и дерново-карбонатных оподзоленных почвах.

Анализ научной литературы показал, что сведения о флористическом составе светлохвойных лесов в районе исследований немногочисленны.

Исходный подзональный тип леса – темнохвойные леса – сокращают свою площадь с середины XX в. (Пармузин, 1964). В настоящее время они представлены преимущественно сосново-березовыми и сосново-осиновыми лесами. Коренные типы сообществ – елово-пихтовые леса с участием лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) – сохранились на грядах на значительном удалении от населенных пунктов.

Во флоре светлохвойных лесов выявлено 188 видов сосудистых растений из 49 семейств, 102 вида лишайников, в том числе 26 видов эпигейных, и 13 видов напочвенных мхов. В семейственно-родовом спектре сосудистых растений преобладают виды семейства сложноцветных (Asteraceae Bercht. & J. Presl) – 22 вида, лютиковых (Ranunculaceae Juss.) – 19 видов, бобовых (Fabaceae Lindl.) и мятликовых (Poaceae Barnhart) – по 15 видов в каждом. Десять крупнейших семейств (вместе с розоцветными (Rosaceae Juss.), вересковыми (Ericaceae Juss.), зонтичными (Apiaceae Lindl.), гвоздичными (Caryophyllaceae Juss.), орхидными (Orchidaceae Juss.), сосновыми (Pinaceae Lindl.)) объединяют 119 видов, или 63 % всей флоры. Во флоре преобладают представители 10 родов, из которых самые крупные – вика (*Vicia* L.) – 8 видов, полынь (*Artemisia* L.) и осока (*Carex* L.) – содержат по 4 вида, вейник (*Calamagrostis* Adans.), колокольчик (*Campanula* L.), хвощ (*Equisetum* L.), чина (*Lathyrus* L.), мытник (*Pedicularis* L.), смолевка (*Silene* L.), клевер (*Trifolium* L.) – по 3 вида, остальные – по 1–2 вида.

Видовое богатство. Число видов в описаниях на пп варьирует от 18 до 59 шт. Самыми бедными являются преобразованные фитоценозы – гари, лесные культуры и ленточные рубки. Большинство видов широко распространены и угрозы их существованию в настоящее время нет. Вместе с тем мы обнаружили один сосудистый вид – венерин башмачок настоящий (*Cypripedium calceolus* L.) и 2 вида лишайников – лобария легочная (*Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm.) и лептогиум Бурнета (*Leptogium burnetiae* C. W. Dodge), включенных в Красную книгу Российской Федерации (2008). Эти виды, а также еще 4 вида сосудистых растений занесены в Красную книгу Иркутской области (2020) с присвоением венерину башмачку настоящему 2-й (уязвимый вид) категории статуса редкости, зимолюбке зонтичной (*Chimaphila umbellata* (L.) W. P. C. Barton), дремлинику чемерицевидному (*Epipactis helleborine* (L.) Crantz), волчегоднику обыкновенному (*Daphne mezereum* L.) лептоги-

уму Бурнета – 3-й (редкий вид), лобарии легочной – 4-й (вид с неопределенным статусом), луносемяннику даурскому (*Menispermum dauricum* DC.) – 5-й (вид, восстанавливающийся в численности) категории.

Эколого-географический анализ показал, что флора светлохвойных лесов района исследований относится к бореальной, сочетающей признаки гумидности и аридности, что обусловлено ее переходным характером. Ядро флоры составляют виды с широкими ареалами: голарктическим, циркумполярным, евразоамериканским, евразийским (Малышев, Пешкова, 1984) (табл. 1). В то же время географическое положение обуславливает присутствие северо- и восточноазиатских видов, маньчжуро-даурских, а также центральноазиатских и охотских. Отмечено, что большая часть видов во флоре принадлежит лесному флористическому комплексу, причем по числу видов наиболее представительной является светлохвойная группа – 96 видов (51 % от общего количества видов), лесостепная – 28 видов (15 %), темнохвойная – 23 вида (12 %), лесолуговая – 17 видов (9 %), горно-степная – 11 видов (6 %). Также широко представлена во флоре группа степных видов (лесо-, горно- и собственно степные), она объединяет 41 вид, что составляет 22 % от общего количества обнаруженных видов.

Данная группа приурочена преимущественно к таким типам сообществ, как ксерофитные сосняки на южных склонах.

Флора светлохвойных лесов характеризуется относительно невысоким разнообразием биоморф, при этом преобладают многолетние виды, что является характерной особенностью бореальных флор (табл. 2).

Группа древесных и полудревесных растений включает 35 видов, из них 22 вида – кустарники и кустарнички. Травянистые растения по числу видов в 4.3 раза превосходят одревесневающие виды. Основу флоры составляют многолетние виды, приспособленные к резкой смене сезонов и экологических режимов и размножающиеся вегетативным путем. Среди травянистых биоморф доминируют группы длиннокорневищных (30 % от всей флоры), коротко- (26 %) и стержнекорневых (13 %) растений.

Нами установлено, что короткокорневищные растения приурочены в основном к лесостепным сообществам и травянистым лесам, а длиннокорневищные – к таежным сообществам.

Наличие ксерофильных местообитаний способствует проникновению в лесные сообщества

Таблица 1. Состав поясно-зональных групп (ПЗГ) флоры светлохвойных лесов на территориях Иркутской области, загрязняемых выбросами алюминиевых заводов, число видов, шт.

Тип ареала	ЛГ	ВБ	ГМ	ТХ	СХ	ПБ	ЛС	ГС	СС
Голарктический	5		2	9	13		2		
Азиатско-американский				1	4			1	
Евразоамериканский	5	1		3	27	2	10	3	1
Евразийский/евросибирский	2			6	12	5	6		1
Североазиатский				2	12		2	2	
Общеазиатский					5		1		
Восточноазиатский	3			1	4		2	1	
Южносибирский и монгольский	1				8	1	1	4	
Маньчжуро-даурский					3		1		
Центральноазиатский							1		
Охотский					2				
Циркумполярный	1				2		2		
Эндемичный					1				
Неопределенный				1	3				
Итого ...	17	1	2	23	96	8	28	11	2

Примечание. ПЗГ: ЛГ – луговая, ВБ – водно-болотная, ГМ – гипоарктомонтанная, ТХ – темнохвойная, СХ – светлохвойная, ПБ – пребореальная, ЛС – лесостепная, ГС – горно-степная, СС – собственно степная.

Таблица 2. Состав экологических групп и биоморфологический спектр флоры светлохвойных лесов на территориях Иркутской области, загрязняемых выбросами алюминиевых заводов, число видов, шт.

Ряд	Экологическая группа	Одревесневающие			Травянистые									
		деревья	кустарники	кустарнички	дк	кк	р/к	п/к	лук	стк	клк	м	п/к-чек	всего
Ксерофитный	Эуксерофиты	–	–	–	2	–	1	1	–	1	–	–	–	5
	Мезоксерофиты	–	2	–	4	4	–	1	1	2	–	–	–	14
Мезофитный	Ксеромезофиты	2	–	4	7	9	1	2	–	9	1	2	–	37
	Эумезофиты	9	9	1	34	23	1	1	2	9	–	1	2	92
	Гигромезофиты	2	3	–	7	11	2	–	–	2	1	1	–	29
	Мезогигрофиты	–	1	2	2	2	–	–	–	2	–	2	–	11
Всего ...	13	15	7	56	49	5	5	3	25	2	6	2	188	

Примечание. дк – длиннокорневищные; кк – короткорневищные; р/к – рыхлокустовые; п/к – плотнокустовые; лук – луковичные; стк – стержнекорневые; клк – клубнекорневищные; м – малолетние (1–2-летние); п/к-чек – полукустарничек.

стержнекорневых видов. На долю одно- и двулетников приходится всего 3 % от общего количества видов травянистых растений

Экологический анализ флоры проведен на основе выделения групп растений по отношению к фактору увлажнения почвы как наиболее важному для их жизнедеятельности. Отмечено, что на обследованной территории лесорастительные условия довольно схожи по режиму увлажнения. Всего выделено шесть экологических групп, из которых самые многочисленные – группы мезофитного ряда (ксеромезофиты, эумезофиты, гигромезофиты, мезогигрофиты) –

169 видов, или 84 % всей флоры (табл. 2), что отражает климатические условия района исследований, большая часть которого находится в условиях средневлажного климата. Небольшое количество видов ксерофитного ряда (19 видов, или 10 % от флоры) указывает на распространение в настоящее время гемибореальных сосняков и лиственничников.

Для оценки экологических параметров мест произрастания светлохвойных лесов использован традиционный эколого-фитоценологический подход, позволяющий по составу видов охарактеризовать климатические и почвенные

Таблица 3. Характеристика светлохвойных лесов, расположенных в разных административных районах Иркутской области

Административные районы	Экологическая шкала								
	Tm	Kn	Om	Lc	Hd	Tr	Rc	Nt	fH
Тайшетский	6–8	9–10	8–9	3–5	12–14	5–6	5–8	4–6	4–6
Братский	7–8	9–10	8–9	3–5	12–13	5–6	5–8	4–6	4–6
Шелеховский и Иркутский	7–8	9–11	8–9	3–5	12–13	5–6	6–8	4–5	4–6

Примечание. Tm – температурный режим; Kn – континентальность климата; Om – влажность климата; Lc – освещенность; Hd – увлажнение почвы; Tr – солевой режим почвы; Rc – кислотность почв; Nt – богатство почв азотом; fH – переменность увлажнения почв.

условия. Согласно полученным результатам, обследованные фитоценозы находятся в довольно однородных условиях по экологическим параметрам. Значительная часть изученных сообществ по термоклиматической шкале варьирует от бореальных до суббореальных, по шкале континентальности климата – от материковых до субконтинентальных, по омброклиматической шкале – от субаридных до субгумидных (табл. 3).

Световой режим варьирует от полуоткрытых пространств до светлых лесов. При характеристике эдафических условий отмечено, что по шкале увлажнения почвы на пп, расположенных в зоне воздействия выбросов ТАЗа, варьируют от сухолесолуговых до сырлесолуговых, на пп в зонах воздействия выбросов БрАЗа и ИркаЗа – от сухолесолуговых до влажно-лесолуговых. По параметрам солевого режима в зоне рассеивания выбросов алюминиевых заводов преобладает тип небогатых почв.

По параметрам кислотности, переменного увлажнения и обеспеченности азотом в зоне обследования встречаются кислые и слабокислые, бедные азотом почвы с режимом увлажнения от относительно устойчивого до слабопеременного.

Состояние лесных биоценозов в окрестностях алюминиевых заводов. Поскольку расстояние от источника загрязнения, в частности от конкретного алюминиевого завода, не может служить интегральным критерием степени за-

грязнения среды, для анализа влияния техногенных выбросов на видовой состав лесных сообществ мы провели зонирование обследованных территорий по уровню загрязнения древостоев сосны как наиболее чувствительной породы. Для этого был использован кластерный анализ данных по содержанию поллютантов (сумма приоритетных ПАУ, F, S, Si, Al, Fe, Zn, Cu, Cr, Pb, Ni, Co, Cd) в хвое, в ходе которого выделены кластеры слабого, среднего, сильного и критического уровня загрязнения сосновых древостоев, отдельный кластер (фоновый) сформировали пп, на незагрязненных территориях в 80–100 км в разных направлениях от заводов. Выделенные уровни загрязнения характеризуются разными коэффициентами концентраций поллютантов в хвое и разными значениями индекса биогеохимической трансформации элементного состава хвои (табл. 4).

Подробная методика выделения кластеров приводится в нашей работе (Kalugina et al., 2021). Анализ видовой состава растительности проводили на пп, сгруппированных в тот или иной кластер.

Установлено, что на фоновых пп, расположенных на территории Братского района, флористический комплекс насчитывает в среднем 26 видов сосудистых растений. Здесь произрастают слабо нарушенные леса с хорошо развитым подростом и подлеском. Эдификатором является сосна обыкновенная, образующая чи-

Таблица 4. Коэффициенты концентраций элементов-поллютантов и индекс биогеохимической трансформации элементного состава хвои (Zbt) при разных уровнях техногенного загрязнения

Уровень техногенного загрязнения древостоев	Коэффициенты концентраций поллютантов	Zbt
Слабый	$\Sigma \text{ПАУ}_{2,6} - \text{F}_{1,6} - \text{S}_{1,5} - \text{Si}_{1,4} - \text{Al}_{1,6} - \text{Fe}_{2,1} - \text{Zn}_{1,6} - \text{Cu}_{2,1} - \text{Cr}_{1,9} - \text{Pb}_{1,8} - \text{Ni}_{1,6} - \text{Co}_{1,2} - \text{Cd}_{3,1}$	24.1
Средний	$\Sigma \text{ПАУ}_{4,7} - \text{F}_{4,4} - \text{S}_{1,7} - \text{Si}_{3,1} - \text{Al}_{3,8} - \text{Fe}_{3,2} - \text{Zn}_{1,7} - \text{Cu}_{3,2} - \text{Cr}_{2,1} - \text{Pb}_{3,2} - \text{Ni}_{1,8} - \text{Co}_{1,5} - \text{Cd}_{4,8}$	39.2
Сильный	$\Sigma \text{ПАУ}_{21,5} - \text{F}_{18,6} - \text{S}_{1,9} - \text{Si}_{3,2} - \text{Al}_{5,2} - \text{Fe}_{3,3} - \text{Zn}_{1,9} - \text{Cu}_{7,3} - \text{Cr}_{2,6} - \text{Pb}_{3,5} - \text{Ni}_{2,2} - \text{Co}_{1,9} - \text{Cd}_{5,7}$	78.8
Критический	$\Sigma \text{ПАУ}_{42,9} - \text{F}_{54,7} - \text{S}_{4,8} - \text{Si}_{3,6} - \text{Al}_{16,4} - \text{Fe}_{3,5} - \text{Zn}_{2,1} - \text{Cu}_{7,6} - \text{Cr}_{2,9} - \text{Pb}_{4,1} - \text{Ni}_{2,5} - \text{Co}_{2,2} - \text{Cd}_{9,6}$	156.9

стые или смешанные насаждения, в которых высока доля лиственницы сибирской и березы белой (*Betula alba* L.). В примеси встречаются сосна сибирская кедровая – сибирский кедр (*Pinus sibirica* Du Tour), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.), рябина (*Sorbus sibirica* Hedl.), осина обыкновенная (*Populus tremula* L.). Древостои, как правило, разновозрастные, одно-, двухъярусные, средние по высоте, полнота варьирует в пределах 0.7–0.8, сомкнутость крон – 0.7–0.8, уровень дефолиации крон спелых деревьев сосны не превышает 25 %. Хорошо развит подрост сосны и осины, подрост кедра, лиственницы, пихты и ели встречается преимущественно средних возрастов и элиминируется среди подраста старших возрастов. Кустарниковый ярус хорошо развит и представлен можжевельником сибирским (*Juniperus sibirica* Burgsd.), багульником болотным (*Ledum palustre* L.), жимолостью Палласа (*Lonicera pallasii* Ledeb.), спиреей средней (*Spiraea media* Franz Schmidt), шиповником иглистым (*Rosa acicularis* Lindley). Проективное покрытие кустарничков не превышает 1 %, преобладает брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea* L.) Травянистый покров маловидовой, невысокий, проективное покрытие 30–40 %, представлен таежными видами светлохвойной группы, такими как купырь лесной (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.), княжик сибирский (*Atragene sibirica* L.), ветреник косматый (*Anemonastrum crinitum* (Juz.) Holub), ирис русский (*Iris ruthenica* Ker-Gawler), ортилия однобокая (*Orthilia secunda* (L.) House), седмичник европейский (*Trientalis europaea* L.), осока (*Carex* sp.), костяника каменистая (*Rubus saxatilis* L.), хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum* L.), чина приземистая (*Lathyrus humilis* (Ser.) Sprengel), линнея северная (*Linnaea borealis* L.), майник двулистный (*Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt), купальница азиатская (*Trollius asiaticus* L.), грушанка мясо-красная (*Pyrola asarifolia* Michaux), фиалка двухцветковая (*Viola biflora* L.), горошек байкальский (*Vicia baicalensis* (Turcz.) V. Fedtsch.), мерингия бокоцветковая (*Moehringia lateriflora* (L.) Fenzl) и др. Мхи и лишайники встречаются мозаично, проективное покрытие не превышает 5 %. Из мхов в напочвенном покрове преобладают гилокомиум блестящий (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.), плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.), ритидиум морщинистый (*Rhytidium rugosum* (Hedw.) Kindb.), политрихум сжатый (*Polytrichum strictum* Brid.), аулаком-

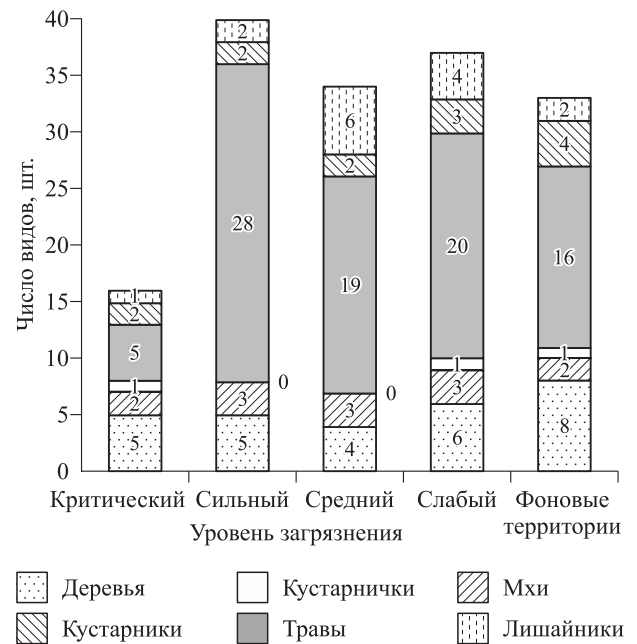


Рис. 2. Соотношение биоморф растений на пп, характеризующихся разным уровнем техногенного загрязнения выбросами БрАЗа.

Цифрами отмечены достоверные различия при $p \leq 0.05$.

ниум болотный (*Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwägr.). В травянистых лесах из лишайников встречаются пельтигера пупырчатая (*Peltigera aphthosa* (L.) Willd.), п. собачья (*P. canina* (L.) Willd.), п. двупалая (*P. didactyla* (With.) J. R. Laundon) и п. рыжеватая (*P. rufescens* (Weiss) Humb.), кладония темно-мясная (*Cladonia amaurocraea* (Flörke) Schaer.), к. крыночковидная (*C. pyxidata* (L.) Fr.), к. оленья (*C. rangiferina* (L.) Weber ex F. H. Wigg.) и к. звездчатая (*C. stellaris* (Opiz) Pouzar et Vězda), причем часто на внеярусных элементах, таких как валежник, пни и замшелые камни.

Видовой состав и лесотаксационные характеристики на пп слабого уровня загрязнения достоверно не отличаются от фоновых территорий (рис. 2).

При среднем уровне загрязнения наблюдается увеличение уровня дефолиации крон спелых деревьев сосны до 35–45 %, полнота древостоев варьирует в пределах 0.6–0.7, сомкнутость крон не превышает 0.6.

Соотношение биоморф близко к фоновым, но при этом в формировании фитоценозов активное участие принимают лесостепные и горно-степные виды – дендрантема Завадского (*Dendranthema zawadskii* (Herbich) Tzvel.), троммсдорфия крапчатая (*Trommsdorffia maculata* (L.) Bernh.), сосюрея мелкоцветковая (*Saussurea parviflora* (Poir.) DC.), прострел жел-

товатый (*Pulsatilla flavescens* (Zucc.) Juz.), большеголовник сафлоровидный (*Stemmacantha carthamoides* (Willd.) Dittrich), борщевик расщепленный (*Heracleum dissectum* Ledeb.), бубенчик коронопусолистный (*Adenophora coronopifolia* Fisch.), чина приземистая, ожика волосистая (*Luzula pilosa* (L.) Willd.), кошачья лапка двудомная (*Antennaria dioica* (L.) Gaertn.), скерда Бунге (*Crepis bungei* Ledeb.), зопник клубненосный (*Phlomis tuberosa* (L.) Moench), смолевка поникающая (*Silene nutans* L.). На освещенность и нарушенность почвенного покрова указывает наличие таких фотофильных видов, как кровохлебка лекарственная (*Sanguisorba officinalis* L.), вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin.) и в. пурпурный (*C. purpurea* (Trin.) Trin.), иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.). Среди разнотравья с высокой степенью постоянства встречаются костяника каменистая, подмаренник северный (*Galium boreale* L.), герань луговая (*Geranium pratense* L.), овсяница ленская (*Festuca lenensis* Drobov), грушанка мясо-красная и чина приземистая. Проективное покрытие напочвенного покрова может достигать 50–60 %.

При сильном уровне загрязнения уровень дефолиации крон деревьев сосны достигает 50–55 %, сомкнутость их крон снижается до 0.4–0.5 при полноте 0.5–0.7. Древостои разновозрастные, двухъярусные, с развитым подлеском и кустарниковым ярусом. Первый древесный ярус представлен отдельными приспевающими деревьями сосны и лиственницы, второй ярус формируют разновозрастные деревья сосны, березы, осины. Подрост хвойных деревьев единичен, сильно угнетен, лиственных (береза, осина) – многочислен и благонадежен. В подлеске присутствуют ольха кустарниковая (*Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouz) и ива тарайкинская (*Salix taraikensis* Kimura). Кустарниковый ярус с проективным покрытием 10 % представлен жимолостью Палласа, кизильником одноцветковым (*Cotoneaster uniflorus* Bunge), шиповником иглистым, багульником болотным, спиреей средней, малиной обыкновенной (*Rubus idaeus* L.), смородиной колосистой (*Ribes spicatum* Robson).

В биоморфологическом спектре возрастает доля травянистых растений. Доминируют виды светлехвойной группы, однако по сравнению с фоновыми и слабо загрязненными территориями, увеличивается доля представителей семейства бобовых, появляются чина Гмелина (*Lathyrus gmelinii* Fritsch), горошек однопарный (*Vicia unijuga* A. Br.) и г. жилковый (*V. venosa*

(Willd. ex Link) Maxim.). Число видов сосудистых растений в описаниях варьирует от 18 до 42, проективное покрытие 50–65 %. Вдоль дорог и крупных тропинок часто встречаются рудеральные виды – полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris* L.), липучка (*Lappula* sp.), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), иван-чай узколистный, клевер ползучий (*Amoria repens* (L.) C. Presl.).

В промышленной зоне БрАЗа, где выявлены максимальные концентрации элементов-полютантов в хвое сосны и наибольшие показатели индекса биогеохимической трансформации ее элементного состава, превышающие фоновые значения более чем в 12 раз, соответствующие критическому уровню загрязнения деревьев сосны, зафиксировано самое низкое число видов сосудистых растений (13), 2 вида эпигейных мхов и 1 вид лишайника. Древесный ярус сильно угнетен, представлен отдельно стоящими деревьями сосны и лиственницы. Преобладает загущенный молодняк, пневая и корнеотпрысковая поросль лиственных пород – березы, осины, ивы Бебба (*Salix bebbiana* Sarg.). Дефолиации крон деревьев сосны достигает 75–80 %, отмечена суховершинность. Дехромация, проявляющаяся в виде некрозов хвои, охватывает 50–70 % длины хвоинок. Подрост хвойных (ель, лиственница) единичен, в сильно угнетенном состоянии, на хвое площадь некрозов составляет 50–70 %. Кустарники и кустарнички также единичны, угнетенные, с малочисленными пораженными некрозами листьями. Травяно-кустарничковый покров сильно трансформирован, о чем свидетельствуют элиминация травянистого яруса и зарастание почвы мхом. Мощный эпигейный моховой покров (проективное покрытие 100 %) представлен бриумом серебристым с вкраплениями кукушкиного льна (*Polytrichum commune* Hedw.). Изредка встречаются первичные слоевища лишайника кладонии (*Cladonia* sp.), поверх мхов разрастаются маты цианобактерий (Cyanobacteria). Внеярусные элементы, такие как валежник, поросли теми же видами мха. В моховой подушке встречаются лишайники: кладонии (первичные слоевища), гипогимния вздутая (*Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.), имшаугия бледнеющая (*Imshaugia aleurites* (Ach.) S. L. F. Meyer), флавопунктелия соредиозная (*Flavopunctelia soledica* (Nyl.) Hale), с деформированными талломами и без вегетативных органов размножения. Подобные эффекты для ряда видов мохообразных отмечались в импактной зоне медеплавильного производства (Трубина, Дьяченко, 2020). Причиной этого авто-

ры считают сильное подкисление почв компонентами техногенных выбросов, приводящее к угнетению травянистого яруса. В нашем случае резкого изменения кислотности почв в промзоне БрАЗа не отмечалось, тогда как концентрация растворимых фторидов в почвенном растворе возрастала в 8.5 раз по сравнению с фоновыми концентрациями, что, вероятно, и стало причиной угнетения травяного покрова. Увеличение покрытия напочвенных мхов в промзоне БрАЗа может быть связано с существенным снижением числа и обилия видов травяно-кустарничкового яруса, поскольку между мхами и сосудистыми растениями существует конкуренция за ресурсы (Turetsky et al., 2012; Soliveres et al., 2018).

На фоновых пп, расположенных в зоне воздействия выбросов ТАЗа, часто встречаются лесные сообщества, измененные в результате несанкционированных рубок и пожаров (Леса..., 1997). В составе древесного яруса доминируют сосна и береза, лиственница встречается редко. Древостои средневозрастные и приспевающие, двухъярусные, среднеполнотные (0.6–0.7), сомкнутость крон 0.6–0.8, уровень дефолиации крон деревьев сосны не превышает 25 %. Подрост благонадежный: преобладает сосна, хорошо возобновляются лиственница, ель, рябина, часто присутствуют береза, осина и пихта. Число видов сосудистых растений на пп варьирует от 24 до 34. Кустарники встречаются отдельными особями, проективное покрытие не превышает 5 %. Травянистый ярус хорошо развит, проективное покрытие достигает 50–65 %, преобладают виды светлохвойного таежного комплекса, доминантами являются хвощ лесной, костяника каменистая, грушанка мясо-красная, ортилия однобокая, вороний глаз мутовчатый (*Paris verticillata* Bieb. emend Ledeb.) и папоротник орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.). Моховый покров представлен тремя видами – ритидиум морщинистый, гилокомиум блестящий, дикранум многоножковый (*Dicranum polysetum* Sw.), проективное покрытие – до 10 %. Следует отметить, что большая часть обследованных пп в Тайшетском районе по результатам кластерного анализа объединилась в фоновый кластер. Вероятно, это обусловлено непродолжительным периодом работы завода и высокотехнологичным процессом производства алюминия, при котором в атмосферу поступают незначительные количества токсичных выбросов.

При слабом уровне загрязнения лесотаксационные характеристики древостоев и видовой

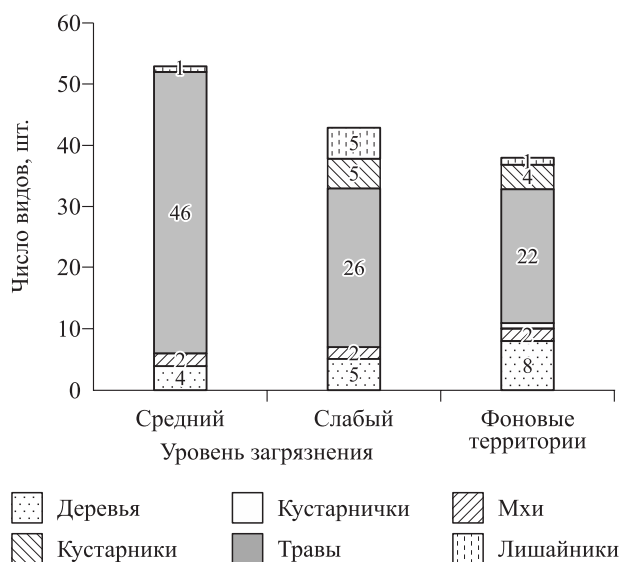


Рис. 3. Соотношение биоморф растений на пп, характеризующихся разным уровнем техногенного загрязнения выбросами ТАЗа.

Цифрами отмечены достоверные различия при $p \leq 0.05$.

состав растительности сопоставимы с фоновыми (рис. 3).

При этом на некоторых пп отмечается увеличение доли злаков в травянистом ярусе, особенно вейника Лангсдорфа и в. короткого (*Calamagrostis korotkyi* Litv.). Мохово-лишайниковый покров составляет 10 %. Похожие тенденции по увеличению участия злаков в травостое после осветления в лесных фитоценозах отмечались на Урале (Воробейчик и др., 2014; Беляева, 2000).

На пп, расположенной в промышленной зоне ТАЗа (в радиусе 0.5 км от завода), где выявлен средний уровень загрязнения, древостои среднеполнотные, одно-двухъярусные, сосна содоминирует с березой, в подросте преобладает береза. Уровень дефолиации крон деревьев сосны увеличивается до 35–40 %. Вследствие вырубок в напочвенном покрове присутствуют как таежные, так и луговые и лесостепные виды. Здесь встречаются редкие виды – борец вьющийся (*Aconitum volubile* Pall. ex Koelle), венерин башмачок настоящий, в. б. капельный (*Cypripedium guttatum* Sw.), и виды, имеющие широкое распространение, таежные – борец бородатый (*Aconitum barbatum* Pers.) и северный (*A. septentrionale* Koelle), водосбор сибирский (*Aquilegia sibirica* Lam.), лилия саранка (*Lilium pilosiusculum* (Freyn) Misch.), купена душистая (*Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce), горошек однопарный, фиалка двухцветковая; лесостепные и опушечные – зопник клубненосный,

подмаренник северный, прострел желтоватый, костяника каменистая, кровохлебка лекарственная, красоднев малый (*Hemerocallis minor* Miller.). В результате изреживания крон во флористическом комплексе напочвенного покрова отмечено появление синантропных и луговых видов – чина приземистая, нивяник обыкновенный (*Leucanthemum vulgare* Lam.), подорожник большой (*Plantago major* L.), горошек мышиный (*Vicia cracca* L.), клевер средний (*Trifolium medium* L.), к. луговой (*T. pratense* L.) и к. ползучий, репешок волосистый (*Agrimonia pilosa* Ledeb.) и др. Вдоль дорог, ведущих к заводу, плотной стеной разрослись тысячелистник заостренный (*Achillea acuminata* Ledeb.), череда трехраздельная (*Bidens tripartita* L.), василек скабиозовый (*Centaurea scabiosa* L.), полынь обыкновенная. Проективное покрытие может достигать 70–85 %.

На территории воздействия выбросов ИркаЗа на фоновых в древесном ярусе доминирует сосна при незначительном участии березы и осины, поскольку лесные фитоценозы относятся к южной подтайге. Лиственница встречается редко. Древостои разновозрастные, двухъярусные, среднеполнотные, сомкнутость крон 0.7–0.8. Уровень дефолиации крон может достигать 30 %. Во флористическом комплексе насчитывают 20–25 видов сосудистых растений. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса 40–45 %. Травянистый покров маловидовой, представлен таежными видами светлохвойной группы, такими как линнея северная, майник двулистный, купена душистая, ортилия однобокая, седмичник европейский, хвощ лесной, купальница азиатская, грушанка мясо-красная, фиалка двухцветковая, горошек байкальский и др. В окрестностях с. Моты, расположенного в 60 км от завода, произрастают редкие виды орхидных: дремлик чемерицевидный (*Epipactis helleborine* (L.) Crantz) и мякотница однолистная (*Malaxis monophyllos* (L.) Sw.).

При слабом уровне загрязнения флористический комплекс не претерпевает существенных изменений по сравнению с фоновыми территориями. Можно отметить увеличение количества подраста мелколиственных видов – осины и березы высотой от 1 до 3.5 м, а также подраста сосны высотой от 1.5 до 3 м. Число сосудистых растений варьирует от 18 до 24 видов (рис. 4).

При среднем уровне загрязнения дефолиация крон деревьев сосны достигает 40–50 %. Полнота древостоев и сомкнутость крон снижается до 0.6. В кустарниковом ярусе присутствуют родо-

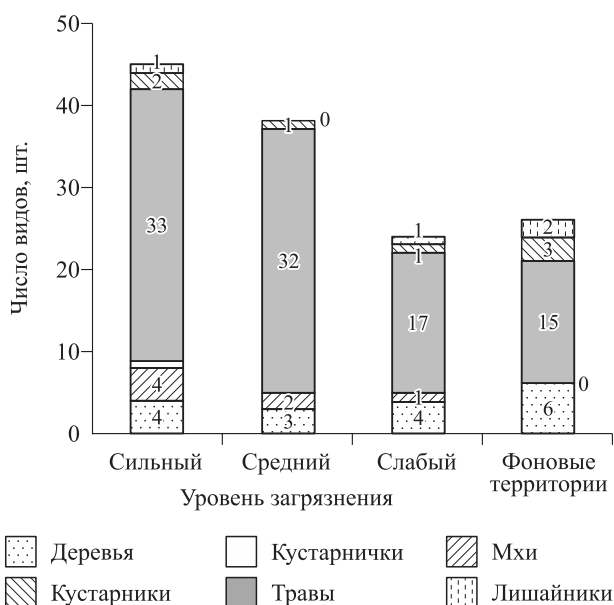


Рис. 4. Соотношение биоморф растений на пп с разным уровнем техногенного загрязнения выбросами ИркаЗа. Цифрами отмечены достоверные различия при $p \leq 0.05$.

дендрон даурский (*Rhododendron dauricum* L.), спирея средняя, шиповник иглистый. В биоморфологическом спектре в 1.5–1.7 раза возрастает количество травянистых растений, в том числе лесолуговых и рудеральных, таких как клевер ползучий, репешок волосистый, аистник цикутый (*Erodium cicutarium* (L.) L'Nég.), липучка, подорожник большой, одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* F. H. Wigg.), полынь обыкновенная, иван-чай узколистный, марь белая (*Chenopodium album* L.) и др. (рис. 4).

В промышленной зоне ИркаЗа и в радиусе 3 км от завода, где выявлен сильный уровень загрязнения древостоя, в составе древесного яруса преобладает сосна, в примеси часто встречаются береза и осина. Древостои разновозрастные, двухъярусные, средние по высоте, среднеполнотные. Уровень дефолиации крон деревьев сосны достигает 45–60 %. В кустарниковом ярусе присутствуют спирея средняя, шиповник иглистый. Число видов сосудистых растений возрастает до 38–46 в описании, а проективное покрытие увеличивается до 70–75 %. Их преобладание обусловлено тем, что территория, прилегающая к промышленной зоне ИркаЗа, расположена в пойме р. Олха, где преимущественное распространение имеют сосняки папоротниковые и разнотравные, в напочвенном покрове которых наряду с таежными видами много луговых.

По имеющимся в литературе данным, в 1997 г. на этой территории произрастал 56–71 вид травянистых растений (Вайцеховская,

1997). Однако спустя 23 года видовой состав упростился в среднем до 29 видов в описании. На наш взгляд, в результате снижения объемов выбросов Иркутского алюминиевого завода, наблюдаемого в последние десятилетия, произошли стабилизация видового состава и выпадение из травянистого яруса малолетних и рудеральных видов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований дана общая характеристика флоры светлохвойных лесов на территориях Иркутской области, подверженных воздействию техногенных выбросов трех алюминиевых заводов – Тайшетского, Братского и Иркутского. Проанализированы ее таксономические, эколого-географические и эколого-биоморфологические спектры. Обнаружено, что наиболее существенную трансформацию видового состава претерпели лесные сообщества, расположенные в окрестностях БрАЗа – наиболее мощного предприятия, работающего по экологически затратной технологии Содерберга. В результате угнетения основных лесобразующих пород сосны и лиственницы произошла замена хвойных пород на лиственные – березу и осину, а деградация травяно-кустарничкового яруса способствовала формированию напочвенной моховой подушки из бриума серебристого.

Изменение видового состава травяно-кустарничкового яруса в районе ТАЗа и ИркАЗа происходит преимущественно в промышленной зоне, где в результате ухудшения состояния древесного полога открывается возможность для замещения типичных лесных видов лесолуговыми, лесостепными, рудеральными видами, либо усиливается ценогическая роль некоторых злаков (например, вейника Лангсдорфа) или папоротников.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-44-380009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бардаш А. В., Богданов В. Н., Богоявленский Б. А., Анисимова З. Н., Кусакин В. К., Хренов П. М., Буфал Б. В., Линевиц Н. Л., Сорокина Л. П., Дурнев Ю. А., Комаров Л. В., Устинов С. К., Заборцева Т. И., Маторова Н. И., Рязченко С. В., Аргучинцев В. К., Афанасьева Л. М., Батуев А. Р. Атлас. Иркутская область (экологические условия развития). М.; Иркутск, 2004. 90 с.
- Беляева Н. В. Катастрофический ветровал и изменения травяно-кустарничкового и мохового ярусов в лесах Висимского заповедника // Последствия катастрофического ветровала для лесных экосистем. Екатеринбург, 2000. С. 46–62.
- Вайцеховская Е. Р. Биоразнообразие травяного яруса лесных экосистем при воздействии промышленных эмиссий // Проблемы сохранения биологического разнообразия Южной Сибири: 1-я Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 19–22 мая, 1997 г. Кемерово, 1997. С. 113–114.
- Воробейчик Е. Л., Трубина М. Р., Хантемирова Е. В., Бергман И. Е. Многолетняя динамика лесной растительности в период сокращения выбросов медеплавильного завода // Экология. 2014. № 6. С. 448–458.
- Воробьева Г. А. Классификация и систематика почв южной (освоенной) части Иркутской области: метод. указ. Ч. 1. Иркутск: Облмашинпром, 1999. 47 с.
- Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Иркутской области в 2020 году». Иркутск: Мегатрип, 2021. 330 с.
- Зверев А. А. Информационные технологии в исследованиях растительного покрова: учебное пособие. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 304 с.
- Зверев А. А. Методические аспекты применения фитоиндикационного анализа в изучении биоразнообразия // Сиб. экол. журн. 2020. Т. 27. № 4. С. 401–415.
- Калугина О. В., Афанасьева Л. В. Особенности морфо-структурных параметров *Pinus sylvestris* L. в условиях воздействия эмиссий алюминиевого производства // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. Вып. 3. Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2020. С. 99–103.
- Красная книга Иркутской области / Отв. ред. В. В. Попов. Улан-Удэ: Респ. типогр., 2020. 552 с.
- Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М., 2008. 855 с.
- Леса и лесное хозяйство Иркутской области / под ред. Л. Н. Ващука. Иркутск: Иркут. упр. лесами, 1997. 288 с.
- Мальшиев Л. И., Пеикова Г. А. Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. 265 с.
- Методы изучения лесных сообществ / Е. Н. Андреева, И. Ю. Баккал, В. В. Горшков, И. В. Лянгузова, Е. А. Мазная, В. Ю. Нешагаев, В. Ю. Нешагаева, Н. И. Ставрова, В. Т. Ярмишко, М. А. Ярмишко. СПб: НИИхимии СПбГУ, 2002. 240 с.
- Михайлова Т. А., Калугина О. В., Шергина О. В. Динамика состояния сосновых лесов Предбайкалья в условиях воздействия антропогенных факторов // Сиб. лесн. журн. 2017. № 1. С. 44–55.
- Михайлова Т. А., Калугина О. В., Шергина О. В. Мониторинг техногенного загрязнения и состояния сосновых лесов на примере Иркутской области // Лесоведение. 2020. № 3. С. 265–273.
- Пармузин Ю. П. Средняя Сибирь. Очерк природы. М.: Мысль, 1964. 312 с.
- Серебряков И. Г. Экологическая морфология растений. Жизненные формы покрытосеменных и хвойных. М.: Высш. школа, 1962. 378 с.
- Трубина М. Р., Дьяченко А. П. Современное состояние мохового покрова лесов после сокращения выбросов среднеуральского медеплавильного завода // Поволж. экол. журн. 2020. № 4. С. 477–491.

- Цыганов Д. Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука, 1983. 197 с.
- Чепинога В. В. Рабочее районирование территории Байкальской Сибири для характеристики распространения сосудистых растений // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. «Биология. Экология». 2009. Т. 2. № 2. С. 3–7.
- Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья-95, 1995. 992 с.
- Шенников А. П. Введение в геоботанику. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. 447 с.
- Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Bosshard W. Kronenbilder Eidgenössische anstalt für das forstliche versuchswesen. Birmensgeber, 1986. 98 p.
- 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*. 2021. V. 30. N. 10. P. 2083–2095.
- 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. N. 24 (11). P. 10279–10291.
- Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessments, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest.* UNECE, ICP Forest Program. Coordinating Centre. Hamburg, 2010. <http://www.icp-forest.org/Manual.htm/>
- Soliveres S., Lehmann A., Boch S., Altermatt F., Carrara F., Crowther T. W., Delgado-Baquerizo M., Kempel A., Maynard D. S., Rillig M. C., Singh B. K., Trvedi P., Allan E. Intransitive competition is common across five major taxonomic groups and is driven by productivity, competitive rank and functional traits // *J. Ecol.* 2018. V. 106. N. 3. P. 852–864.
- Turetsky M. R., Bond-Lamberty, Euskirchen E., Talbot J., Frolking S., McGuire A. D., Tuittila E-S. The resilience and functional role of moss in boreal and arctic ecosystems // *New Phytol.* 2012. V. 196. N. 1. P. 49–67.
- Zverev A. A. Methodological aspects of using indicator values in biodiversity analysis // *Contemp. Probl. Ecol.* 2020. V. 13. Iss. 4. P. 321–332 (Original Rus. text © A. A. Zverev, 2020, publ. in *Sib. Ecol. Zhurn.* 2020. V. 27. N. P. 401–415).

SPECIES COMPOSITION AND VEGETATION STRUCTURE OF LIGHT CONIFEROUS FORESTS UNDER POLLUTION OF ALUMINUM SMELTER EMISSIONS IN IRKUTSK OBLAST

T. M. Kharpukhaeva¹, L. V. Afanas'eva¹, O. V. Kalugina², M. V. Oskorbina²

¹ Institute of General and Experimental Biology Russian Academy of Sciences, Siberian Branch Sakhyanova str., 6, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047 Russian Federation

² Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch Lermontov str., 132, Irkutsk, 664033 Russian Federation

E-mail: takhar@mail.ru, afanl@mail.ru, olignat32@inbox.ru, omaria-84@ya.ru

The species diversity and state of the ground cover of light coniferous forests in the territories of Irkutsk Oblast, polluted by emissions from three aluminum smelters (Bratsk (BrAZ), Irkutsk (IrkAZ) and Tayshet (TAZ)), differing in production technology and duration of impact on forests, were studied. 188 species of vascular plants from 49 families, 102 species of lichens, including 26 species of epigeal and 13 species of ground mosses were identified. Most species belong to the forest floral complex, mainly to the light coniferous zone-zonal group. Perennial herbaceous plants dominate in the biomorphological spectrum: its basis consist of long-rooted (30 % of the total flora), short-(26 %), and rod-rooted (13 %) species. The mesophytic species dominate in ecological spectrum. The most significant transformation of the species composition was observed in forest communities located in the industrial zone (within a radius of 0.5 km) of BrAZ, where the critical level of contamination of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) trees was found, the drying of trees and the degradation of the grass-shrub layer contributed to the formation of solid moss cushion from silvergreen bryum moss (*Bryum argenteum* Hedw.) on the soil. In the industrial zone of TAZ and IrkAZ, where average and strong level of tree-stands contamination, respectively, was found we observed the increase of plant projective coverage to 70–85 % and the total number of vascular plant species due to the appearance of meadow, forest-steppe and ruderal, the composition of phytocenoses often changes towards the predominance of photophilic species. With a low level of contamination of tree-stands, changes in the floral complex are less pronounced and statistically insignificant compared to background territories.

Keywords: floristic composition, structure of light coniferous forests, technogenic emissions, aluminum production.

How to cite: Kharpukhaeva T. M., Afanas'eva L. V., Kalugina O. V., Oskorbina M. V. Species composition and vegetation structure of light coniferous forests under pollution of aluminum smelter emissions in Irkutsk Oblast // *Sibirskij Lesnoj Zurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 6. P. 45–57 (in Russian with English abstract and references).