

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАТЬИ

УДК 581.8+574.24+633.877.3

МОРФОЛОГО-АНАТОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПИГМЕНТНЫЙ СОСТАВ ХВОИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЯХ г. КРАСНОЯРСКА

В. В. Стасова, Л. Н. Скрипальщикова, Н. В. Астраханцева, А. П. Барченков

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Красноярск, 660036, Академгородок 50/28

E-mail: vistasova@mail.ru, lara@ksc.krasn.ru, astr_nat@mail.ru, alexbarchenkov@mail.ru

Поступила в редакцию 07.10.2021 г.

Исследование зависимости структуры и пигментного состава хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) от уровня техногенной нагрузки проводили в зеленых насаждениях четырех районов г. Красноярска. Установлено, что длина, ширина, толщина, а также площади поперечного сечения хвои и центрального цилиндра уменьшаются при повышении степени загрязнения воздуха. Выявлено, что площади поперечного сечения проводящих пучков в центральном цилиндре одной и той же хвоинки, как правило, неодинаковы, различия составляют 9–12 % и характеризуются высокой индивидуальной изменчивостью. Достоверной связи размеров проводящих пучков и уровня техногенной нагрузки не найдено. Число смоляных ходов в хвое уменьшается при усилении техногенного воздействия, что указывает на ослабление защиты ассимиляционного аппарата от вредителей и болезней. Различий по содержанию фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов) в хвое сосен в двух районах города, резко различающихся по уровню загрязнения, не выявлено, что, возможно, обусловлено погодными условиями: обильные летние осадки препятствовали аккумуляции поллютантов на поверхности и внутри хвои. Изменения размеров, анатомической структуры и пигментного состава хвои сосны можно считать результатом адаптации к условиям произрастания и погодным факторам.

Ключевые слова: городские зеленые насаждения, *Pinus sylvestris* L., фотосинтетические пигменты, техногенное загрязнение, анатомия хвои.

DOI: 10.15372/SJFS20220201

ВВЕДЕНИЕ

Приспособление растений к условиям существования подразумевает изменение их метаболизма, их физиологических процессов, приводящее к структурным изменениям, по степени выраженности которых можно судить о состоянии окружающей среды (Скупченко, Соколова, 2008).

Исследования, проведенные в разных городах, показали, что существуют различия в структурных признаках растений в посадках вдоль улиц, в парках и в пригородных зонах. В магистральных посадках растения более угнетенные, подвержены болезням и вредителям, их жизненное состояние хуже (Сперанская, 2007; Шергина, Михайлова, 2007, Татаринцев, 2010;

Неверова и др., 2012; Петункина, 2015; Макарова, Макаров, 2018). В городских условиях они приобретают ксероморфные признаки – более мелкие листья и короткая хвоя, толстая кутикула, более мелкие клетки, увеличенный объем механических тканей, меньшая степень открытия устьиц и большее их количество на единицу площади листа (Илькун, 1978; Горышина, 1991; Неверова, 2002; Зотикова и др., 2007). Длина хвои сильно варьирует по сравнению с шириной и толщиной, которые изменяются в более узких пределах (Евстюгин, 2006; Собчак, Куровская, 2009; Григоренко, 2015), увеличена асимметрия ее развития (Соболева и др., 2009). В покровных тканях хвои сосны утолщаются кутикула и эпидерма, но уменьшается толщина гиподермы (Папина и др., 2013). Под влиянием техногенно-

го стресса также изменяются число и размеры смоляных каналов в хвое (Илькун, 1978; Евстюгин, 2006; Зотикова и др., 2007; Собчак, 2009), снижается содержание фотосинтетических пигментов (Собчак и др., 2001).

В г. Красноярске, крупном промышленном центре Сибири, состояние городских зеленых насаждений и пригородных лесов является предметом пристального изучения и мониторинга (Павлов, 2006; Экологическое состояние..., 2009). Были исследованы жизненное состояние древесных растений (Романова, 2003; Кладько, Скрипальщикова, 2019), продолжительность жизни, длина, масса хвои и содержание в ней фотосинтетических пигментов (Пахарькова и др. 2010; Григоренко, 2015; Донцов и др., 2016; и др.), однако анатомические характеристики хвои, определяющие в конечном счете продуктивность и устойчивость деревьев к техногенным загрязнениям, не рассматривались.

Цель данной работы – изучение морфологических и анатомических характеристик и пигментного состава хвои сосны обыкновенной, произрастающей в районах с разными уровнями техногенной нагрузки г. Красноярска.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Красноярск является одним из крупнейших городов Сибири, расположен на обоих берегах р. Енисей в среднем его течении на стыке трех геоморфологических районов: долины Енисея, прилегающих к ней плато и предгорий Восточного Саяна. Преобладающую часть города занимает долина Енисея (Климат..., 1982). В период становления Красноярск размещался в особо

комфортных микроклиматических условиях горной котловины, защищенной от северных ветров, а компактный характер планировки острога и посадка не противоречил специфическим климатическим условиям и природному окружению. В настоящее время неблагоприятными для города являются сочетания таких факторов, как котловинность горного рельефа, образование приземных инверсий и штилевых погодных условий с размещением промышленных предприятий выше по рельефу относительно селитебных районов города (Авдеева и др., 2015).

К основным источникам загрязнения атмосферы города относятся предприятия металлургии, теплоэнергетики, автотранспорт. Объем валовых выбросов в г. Красноярске в 2020 г. составил 109.7 тыс. т (Государственный доклад..., 2021). В 2020 г. уровень атмосферного загрязнения здесь характеризовался как «высокий». Комплексный индекс загрязнения атмосферы ИЗА5 < 13. Основной вклад в уровень загрязнения вносят взвешенные вещества, диоксид азота, аммиак, формальдегид, бенз(а)пирен. В отдельных районах города загрязнение воздуха зависит от рельефа местности, ветрового режима, особенностей хозяйственного использования территории и застройки (Хлебопрос и др., 2012; Onuchin et al., 2020; Государственный доклад..., 2021).

На территории г. Красноярска в 2020 г. были заложены четыре пробные площадки (пп) (Кладько, Скрипальщикова, 2021) (табл. 1).

На каждой пп отбирали по 5 модельных деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) возрастом 25–30 лет в соответствии с инженерно-топографическими планами территорий, таким образом, чтобы вблизи них не проходили

Таблица 1. Характеристика пробных площадей

Номер пп	Расположение пп	Условия произрастания
1	Дендрарий ИЛ СО РАН, Академгородок, юго-западная окраина города	Источники загрязнения практически отсутствуют, можно считать условно чистой
2	Ул. Елены Стасовой, мкр. «Ветлужанка», западная часть города	Низкий уровень загрязнения автотранспортом (CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , бенз(а)пирен и др.).
3	Парк «Гвардейский, мкр. «Зеленая роща», восточная часть города	Высокий уровень загрязнения за счет выбросов промышленных предприятий цветной металлургии и теплоэнергетического комплекса (CO, NO, NO ₂ , SO ₂ , сажа, фтористые соединения, бенз(а)пирен, сероводород и др.). Особенность пп – близость не замерзающей в зимнее время р. Енисей, что способствует образованию в воздухе тумана и изморози на деревьях, абсорбирующих атмосферные токсиканты
4	Ул. 9 Мая, мкр. «Северный», северная часть города	Высокий уровень загрязнения суммарными выбросами автотранспорта и промышленных предприятий цветной металлургии и теплоэнергетического комплекса

подземные коммуникации. На пп 1 и 3 деревья были высажены группами; на пп 2 и 4 – в рядные посадки. Для исключения ценотического эффекта конкуренции выбирались деревья, располагающиеся на расстоянии не менее 3 м друг от друга. В пределах одной пп, по визуальной оценке, модельные деревья имели приблизительно одинаковые морфометрические показатели.

Для анализа в первой декаде августа 2020 г. собирали хвою второго года жизни из нижней части кроны по её окружности. В каждом насаждении для каждого из пяти модельных деревьев из собранной хвои были случайным образом взяты по 20 пар хвоинок, у которых измеряли длину, после чего фиксировали их в 70%-м этаноле. Поперечные срезы из средней части хвоинок фотографировали с использованием светового микроскопа с цифровым окуляром DCM-900. Изображения анализировали с помощью программы PhotoMaster 1.21 – определяли ширину, толщину и площадь поперечного сечения хвоинки, а также площади поперечного сечения центрального цилиндра и проводящих пучков, подсчитывали количество смоляных ходов.

Фотосинтетические пигменты исследовали в свежесобранной хвое. Параллельно брали навески для определения пигментов и влажности. Навеску свежей хвои (0.5 г) обрабатывали этанолом (95%-м) до полного извлечения пигментов. Растворы объединяли и доводили до определенного объема. Содержание пигментов определяли спектрофотометрическим методом. Оптическую плотность растворов измеряли при длине волны 470, 649 и 664 нм на спектрофотометре СФ-2000 (СКБ «Спектр», Россия). Количество пигментов рассчитывали (в мг/мл экстракта) по формулам для 95%-го этанола (Lichtenthaler, 1987):

хлорофилл *a*:

$$Ca = 13.36 \times A_{664.1} - 5.19 \times A_{648.6},$$

хлорофилл *b*:

$$Cb = 27.43 \times A_{648.6} - 8.12 \times A_{664.1},$$

каротиноиды:

$$Car = (1000 \times A_{470} - 2.13 \times Ca - 97.64 \times Cb)/209.$$

Количество пигментов пересчитывали на единицу абсолютно сухой массы хвои.

Для статистической обработки результатов измерений использовали программы MS Excel и Statistica 10. Значимость различий характе-

ристик хвои сосен из городских районов с разным уровнем техногенной нагрузки оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и критерия Дункана, который рекомендуется использовать для попарного сравнения средних, если их число больше двух (Дёрффель, 1994). Расчеты осуществляли при заданном уровне значимости $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологические и анатомические характеристики хвои. Длина хвои – наиболее часто измеряемый биоиндикационный параметр, чутко реагирующий на изменение условий окружающей среды. Из четырех исследованных районов наиболее длинной она была у сосен пп 1, при минимальной техногенной нагрузке. Согласно расчетам, различия по этому показателю у сосен пп 1 и остальных пп достоверны ($p \leq 0.05$). Сосны на пп 2–4 по длине хвои различались между собой незначительно (рис. 1). Уменьшение длины хвои часто происходит при воздействии повышенных техногенных нагрузок. При этом может также уменьшаться продолжительность ее жизни и густота охвоения побегов (Хан, 2000; Овечкина, Шаяхметова, 2013; Григоренко, 2015; и др.). Кроме того, у деревьев в городских посадках снижается апикальная доминантность (Собчак, Куровская, 2009) и усиливается линейный рост боковых побегов (Хан, 2000), что трактуется как проявление компенсаторных реакций.

Такие показатели, как ширина и толщина хвои сосен в посадках на пп 4 были достоверно ($p \leq 0.05$) меньше по сравнению с хвоей сосен на пп 1–3 с более низкими уровнями загрязнения (рис. 2, А).

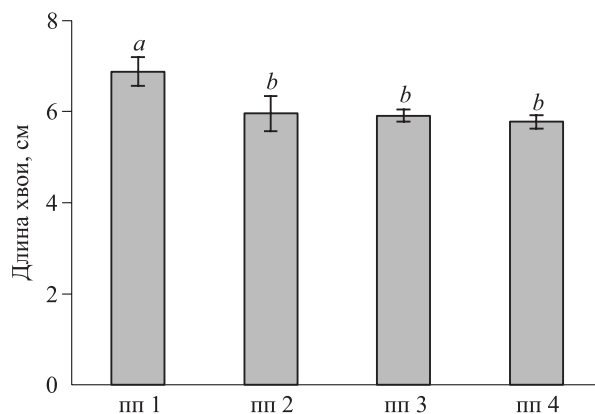


Рис. 1. Длина хвои сосны обыкновенной в городских зеленых насаждениях (средние и ошибки средних). Одинаковыми латинскими буквами обозначены величины, различия между которыми недостоверны при $p \leq 0.05$.

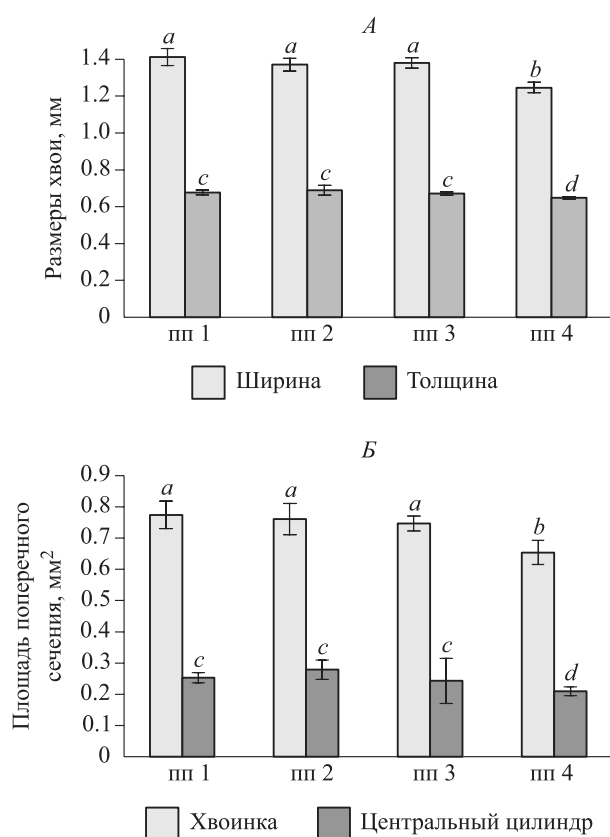


Рис. 2. Ширина, толщина (А), и площадь поперечного сечения (Б) хвои сосны обыкновенной в городских зеленых насаждениях (средние и ошибки средних). Одинаковыми латинскими буквами обозначены величины, различия между которыми недостоверны при $p \leq 0.05$.

Ширина хвои сосны в городских условиях может как уменьшаться (Овечкина, Шаяхметова, 2013), так и увеличиваться (Хан, 2000). Возможно, такая реакция зависит от интенсивности техногенного воздействия: первоначальная адаптивная реакция – усиление роста – в дальнейшем сменяется его подавлением.

Площадь поперечного сечения хвои сосен из разных мест произрастания (рис. 2, Б), учитывающая не только линейные размеры, но и форму сечения, что более точно отражает объем слагающих хвоинку тканей, демонстрирует ту же тенденцию, как описана выше.

Центральный цилиндр хвои, ограниченный от ассимилирующей ткани эндодермой, содержит два проводящих пучка, трансфузионную ткань для передачи ассимилятов в транспортное русло и механическую ткань, поддерживающую жесткость структуры. Площади поперечного сечения центрального цилиндра хвои сосен на пп 1–3 достоверно не различаются, но на пп 4 достоверно меньше (рис. 2, Б).

Измерение площади поперечного сечения проводящих пучков показало, что размер пучков

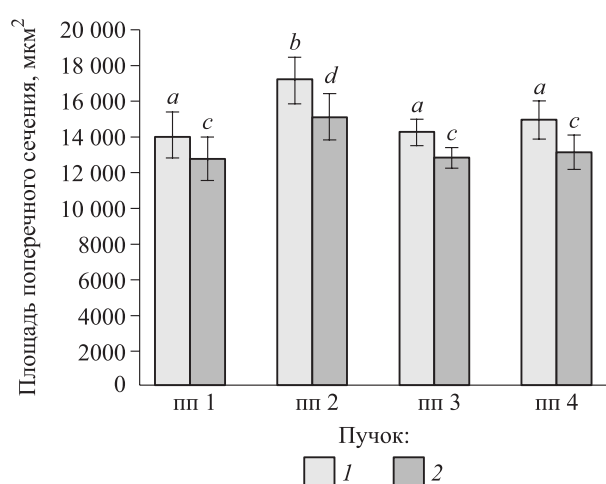


Рис. 3. Площади поперечного сечения проводящих пучков в хвое сосен в городских посадках (средние и ошибки средних).

Одинаковыми латинскими буквами обозначены величины, различия между которыми недостоверны при $p \leq 0.05$.

в одной и той же хвоинке обычно неодинаков. При расчетах больший по площади пучок обозначали как первый, меньший – второй.

Площадь поперечного сечения проводящих пучков в хвое модельных деревьев колебалась от 0.01 до 0.02 мм² (10000–18000 мкм²) (рис. 3).

Различия размеров большего и меньшего пучков в среднем составляли 9–12 % и характеризовались высокой индивидуальной изменчивостью. Наибольшие размеры проводящих пучков отмечены в хвое сосен на пп 2, различия по этому показателю с пп 1, 3 и 4 достоверны при $p \leq 0.05$.

Важную роль в защитной системе дерева играет образование и накопление смолы в смоляных ходах. Смола защищает хвою от вредителей и болезней, являясь репеллентом, антисептиком, а также закрывает раны в случае повреждения тканей. Число смоляных ходов в хвое в норме – видоспецифичный признак, который может колебаться в генетически определенных пределах (Правдин, 1964). Внешние условия могут существенно влиять на количество, размер смоляных ходов и интенсивность смолообразования (Петренко, 1967; Онучин, Козлова, 1993; и др.). Отрицательное воздействие воздушных загрязнителей на содержание смоляных ходов в хвое отмечалось неоднократно (Зотикова и др., 2007; Соболева и др., 2009; Легощина и др., 2013; Legoshchina et al., 2013; Скрипальщикова и др., 2013, 2016). На изученных участках наибольшее число смоляных ходов отмечено в хвое сосен пп 1, наименьшее – на пп 4 (одинаковыми латинскими буквами обозначены вели-

чины, различия между которыми недостоверны при $p \leq 0.05$):

- пп 1 – 8.80 ± 1.23 (a),
- пп 2 – 7.72 ± 0.24 (b),
- пп 3 – 7.78 ± 0.56 (b),
- пп 4 – 6.85 ± 0.59 (c).

Однако в целом на всех изученных пп она содержала достаточно большое число смоляных ходов. Для окрестностей Красноярска, по данным Л. Ф. Правдина (1964), его средние значения в хвое нижней части кроны сосны достигали 10.3 (9.1–11.1).

Данные морфолого-анатомического анализа хвои сосен из разных районов города можно суммировать следующим образом:

- на пп 1 в наиболее чистом районе города значения изученных морфолого-анатомических параметров (за исключением площади поперечного сечения проводящих пучков) были наибольшими;
- на пп 4 в наиболее загрязненном районе значения морфолого-анатомических показателей хвои были наименьшими;
- на пп 2 и 3 хвоя занимала промежуточное положение по всем характеристикам, за исключением увеличенного размера проводящих пучков в хвое сосен пп 2.

Фотосинтетические пигменты. Для определения фотосинтетических пигментов, характеризующих функциональное состояние ассимиляционного аппарата растений, были выбраны два насаждения, различающиеся по уровню

антропогенной нагрузки, – пп 1 (минимальная нагрузка) и пп 3 (высокий уровень загрязнения) (табл. 2).

Несмотря на существенные различия в уровнях антропогенной нагрузки в этих районах города, достоверных различий в содержании пигментов не выявлено. Возможно, это связано с погодными условиями периода вегетации 2020 г. – обилием осадков, очищающих поверхность хвои от загрязнений, а также препятствующих накоплению поллютантов в воздухе. По данным источника «Погода и климат» (2022), за вторую и третью декады июля 2020 г. выпало 114 мм осадков при месячной норме 70, за первую декаду августа – 41.6 мм при норме за месяц 76 мм.

Соотношение пигментов рассматривают как реакцию растения на внешние факторы. Так, отношение содержания хлорофилла *a* к содержанию хлорофилла *b* в хвое характеризует газоустойчивость растений – чем ниже данный показатель, тем менее растение устойчиво к действию поллютантов (Соболева и др., 2009). Считается, что в норме это отношение составляет 2.0–2.3 (Титова, 2013). На исследованных нами территориях этот показатель имел близкие к нормальным значения независимо от уровня загрязнения. Отношение суммы зеленых пигментов к сумме желтых является показателем состояния растения. Для хвои сосен на пп 1 и пп 3 оно равно 7.06 и 7.42 соответственно. Для районов г. Уссурийска с разным уровнем загрязнения выбросами автотранспорта соотношение

Таблица 2. Содержание фотосинтетических пигментов и масса 100 хвоинок сосны обыкновенной в районах г. Красноярска с разным уровнем загрязнения (средние значения и ошибки средних)

Показатель	пп 1	пп 3
Содержание фотосинтетических пигментов, мг/г абс. сухой массы хвои:		
хлорофилл <i>a</i>	1.81 ± 0.12	2.03 ± 0.16
хлорофилл <i>b</i>	0.91 ± 0.05	0.86 ± 0.04
сумма хлорофиллов	2.72 ± 0.14	2.89 ± 0.17
каротиноиды	0.39 ± 0.04	0.40 ± 0.04
Соотношение форм хлорофиллов, <i>a/b</i>	1.99 ± 0.17	2.34 ± 0.22
Отношение суммы зеленых пигментов к сумме желтых, $(a+b)/car$	7.06 ± 0.15	7.42 ± 0.18
Содержание фотосинтетических пигментов, мкг/хвоинку:		
хлорофилл <i>a</i>	36.20 ± 4.47	34.56 ± 5.00
хлорофилл <i>b</i>	18.26 ± 2.32	14.61 ± 1.78
каротиноиды	7.73 ± 0.94	6.80 ± 1.10
сумма пигментов	62.19 ± 5.12	55.98 ± 5.42
Масса 100 хвоинок, г	3.75 ± 0.20	3.23 ± 0.31

зеленых и желтых пигментов в хвое сосны составляло 3.91 при высокой интенсивности дорожного движения и 4.86 – в контроле (Титова, 2013). Поскольку считается, что снижение этого отношения свидетельствует об ухудшении состояния растения (Титова, 2013), мы полагаем, что функциональное состояние фотосинтетического аппарата сосен в зеленых насаждениях г. Красноярска в 2020 г. было удовлетворительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение морфологических и анатомических характеристик хвои в искусственных сосновых насаждениях в районах города с разным уровнем антропогенной нагрузки показало, что эти данные значительно варьируют в зависимости от уровня загрязнения. Наилучшие показатели роста и развития хвои сосны отмечены в пп 1 с относительно слабым техногенным воздействием. Значительное снижение размеров хвоинок и слагающих их структур выявлены у сосен на пп 4 как в наиболее загрязненном районе. Достоверных различий в содержании фотосинтетических пигментов и их соотношений в хвое сосен из районов города с разным уровнем загрязнения не установлено, что в данном случае, вероятно, обусловлено погодными условиями вегетационного периода. Все отмеченные изменения размеров, анатомической структуры и пигментного состава хвои сосны являются результатом адаптации к условиям произрастания и погодным факторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдеева Е. В., Полетайкин В. Ф., Вагнер Е. А. Исторические аспекты взаимосвязи природного окружения, композиционной структуры и системы озеленения г. Красноярска // Совр. пробл. науки и образов. 2015. № 2. Ч. 2. С. 7.
- Горышина Т. К. Растение в городе. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. 152 с.
- Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2020 году». Красноярск: Краевое гос. бюджетное учреждение «Центр реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края», 2021. 327 с.
- Григоренко А. В. Физиологические и морфологические показатели хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях аэротехногенного загрязнения // Вестн. КрасГАУ. 2015. № 4. С. 15–19.
- Дёрффель К. Статистика в аналитической химии. Пер. с нем. М.: Мир, 1994. 268 с.
- Донцов А. С., Сунцова Л. Н., Иниаков Е. М. Оценка состояния окружающей среды г. Красноярска по состоянию фотосинтетического аппарата ели сибирской // Хвойные бореал. зоны. 2016. Т. 37. № 5–6. С. 246–250.
- Евстюгин А. С. Особенности изменчивости анатомо-морфологических признаков хвои сосны обыкновенной в разных типах аэротехногенного загрязнения // Леса Урала и хозяйство в них. 2006. Вып. 28. С. 33–39.
- Зотикова А. П., Бендер О. Г., Собчак Р. О., Астафурова Т. П. Сравнительная оценка структурно-функциональной организации листового аппарата хвойных растений на территории г. Горно-Алтайска // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2007. № 299 (1). С. 197–200.
- Илькун Г. М. Загрязнение атмосферы и растения. Киев: Наук. думка, 1978. 249 с.
- Кладько Ю. В., Скрипальщикова Л. Н. Методика комплексной биоиндикационной оценки устойчивости древесных растений к техногенному воздействию на урбанизированных территориях // Сиб. лесн. журн. 2019. № 6. С. 27–38.
- Кладько Ю. В., Скрипальщикова Л. Н. Радиальный рост сосны обыкновенной в зеленых насаждениях Красноярска // Сиб. лесн. журн. 2021. № 3. С. 38–43.
- Климат Красноярска / ред. Ц. А. Швер, А. С. Герасимова. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 231 с.
- Легощина О. М., Неверова О. А., Быков А. А. Изменчивость анатомической структуры хвои *Picea obovata* Ledeb. в условиях влияния выбросов промзоны г. Кемерово // Сиб. экол. журн. 2013. № 5. С. 733–739.
- Макарова Т. А., Макаров П. Н. Фитосанитарное состояние хвойных растений в насаждениях города Сургута // Вестн. Сургут. гос. ун-та. 2018. Вып. 4 (22) С. 33–41.
- Неверова О. А. Морфометрическая и дендрохронологическая диагностика состояния древесных насаждений как способ индикации загрязнения урбанизированной среды // Усп. совр. естествозн. 2002. № 1. С. 57–64.
- Неверова О. А., Легощина О. М., Зокиров Р. С. Изменения анатомических показателей хвои *Pinus eldarica* Ten., произрастающей в примагистральных посадках г. Худжанта // Совр. пробл. науки и образов. 2012. № 4. 5 с.
- Овечкина Е. С., Шаяхметова Р. И. Морфологические изменения сосны обыкновенной на территории Нижневартовского района // Вестн. Нижневарт. гос. ун-та. 2013. № 3. С. 75–84.
- Онучин А. А., Козлова Л. Н. Структурно-функциональные изменения хвои сосны под влиянием поллютантов в лесостепной зоне Средней Сибири // Лесоведение. 1993. № 2. С. 39–45.
- Павлов И. Н. Биологический мониторинг техногенного загрязнения по морфометрическим показателям древесных растений // Фунд. иссл. 2006. № 8. С. 34–37.
- Папина О. Н., Собчак Р. О., Астафурова Т. П. Влияние урбанизированной среды на покровные ткани и содержание воды в хвое видов семейства Pinaceae Lindl. // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2013. № 3 (23). С. 152–161.
- Пахарькова Н. В., Калякина О. П., Шубин А. А., Григорьев Ю. С., Пахарьков С. В., Сорокина Г. А. Различия в акклимационных стратегиях сосны обыкновенной и ели сибирской на загрязнение воздушной среды // Хвойные бореал. зоны. 2010. Т. 27. № 3–4. С. 232–237.

- Петренко Е. С. Изменчивость числа смоляных каналов в хвое сосны обыкновенной // Лесоведение. 1967. № 6. С. 76–83.
- Петункина Л. О. Разнообразие и состояние объектов озеленённых территорий общего пользования в г. Кемерово // Вестн. КемГУ. 2015. Т. 3. № 4 (64). С. 62–67.
- Правдин Л. Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 194 с.
- Погода и климат, 2022. www.pogodaiklimat.ru.
- Романова Л. И. Состояние вегетативных органов лиственницы сибирской в условиях промышленного загрязнения г. Красноярска // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития. III Междунар. науч.-техн. конф., Брянск, 1–30 ноября 2003 г. Брянск: БГИТА, 2003. 2 с.
- Скрипальщикова Л. Н., Днепровский И. А., Стасова В. В., Пляшечник М. А., Грешилова Н. В., Калугина О. В. Морфолого-анатомические особенности хвои сосны обыкновенной под влиянием промышленных выбросов города Красноярска // Сиб. лесн. журн. 2016. № 3. С. 46–56.
- Скрипальщикова Л. Н., Стасова В. В., Пляшечник М. А. Оценка экологического состояния сосны обыкновенной на урбанизированных территориях Красноярской лесостепи // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 11. С. 176–181.
- Скупченко В. Б., Соколова Л. О. Биоиндикация окружающей среды. СПб.: СПб гос. лесотех. акад. 2008. 95 с.
- Соболева О. М., Кондратенко Е. П., Пинчук Л. Г. Комплексная оценка состояния ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в г. Новокузнецке // Вестн. АГАУ. 2009. № 7. С. 33–36.
- Собчак Р. О. Диагностика состояния видов хвойных в зонах техногенного загрязнения Республики Алтай // Вестн. Том. гос. ун-та. 2009. № 325. С. 185–190.
- Собчак Р. О., Астафурова Т. П., Зайцева Т. А., Верхотурова Г. С., Зотикова А. П., Дегтярева О. Н. Оценка состояния хвойных пород в зоне действия атмосферных загрязнителей по структурно-функциональным показателям хвои // Krylovia. Сиб. бот. журн. 2001. № 3 (2). С. 114–121.
- Собчак Р. О., Куровская Л. В. Морфофункциональные особенности видов хвойных в условиях урбанизированной среды // Вестн. Том. гос. ун-та. 2009. № 327. С. 214–217.
- Сперанская Н. Ю. Состав и жизненное состояние древесных насаждений г. Барнаула: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.05. Барнаул: Алтайск. гос. ун-т, 2007. 16 с.
- Татаринцев А. И. Санитарное состояние насаждений лиственницы в г. Красноярске // Хвойные бореал. зоны. 2010. Т. 27. № 3-4. С. 289–293.
- Титова М. С. Реакция пигментной системы сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L на загрязнение окружающей среды // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 10. С. 122–126.
- Хан Л. В. Морфологические изменения хвои сосны обыкновенной в условиях городской среды // Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. информ. мат-лов междунар. науч.-тех. конф. «Лес-2000». Вып. 1. Брянск: РИО БГИТА, 2000. С. 91–92.
- Хлебопрос Р. Г., Тасейко О. В., Иванова Ю. Д., Михайлюта С. В. Красноярск. Экологические очерки. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2012. 130 с.
- Шергина О. В., Михайлова Т. А. Состояние древесных растений и почвенного покрова парковых и лесопарковых зон г. Иркутска. Иркутск: Ин-т геогр. СО РАН, 2007. 200 с.
- Экологическое состояние пригородных лесов Красноярска / Л. Н. Скрипальщикова, А. И. Татаринцев, О. Н. Зубарева и др. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2009. 179 с.
- Legoshchina O. M., Neverova O. A., Bykov A. A. Variability of the anatomical structure of *Picea obovata* Ledeb. needles under the influence of emissions from the industrial zone of Kemerovo // Contemp. Probl. Ecol. 2013. V. 6. N. 5. P. 555–560 (Original Rus. Text © O. M. Legoshchina, O. A. Neverova, A. A. Bykov, 2013, publ. in Sib. Ekol. Zhurn. 2013. N. 5. P. 733–740).
- Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in Enzymol. 1987. V. 148. P. 350–382.
- Onuchin A., Kofman G., Zubareva O., Danilova I. Using an urban snow cover composition-based cluster analysis to zone Krasnoyarsk town (Russia) by pollution level // Pol. J. Environ. Stud. 2020. V. 29. N. 6. P. 4257–4267.

MORPHOLOGICAL AND ANATOMICAL CHARACTERISTICS AND PIGMENT COMPOSITION OF SCOTCH PINE NEEDLES IN GREEN STANDS OF KRASNOYARSK CITY

V. V. Stasova, L. N. Skripal'shchikova, N. V. Astrakhantseva, A. P. Barchenkov

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: vistasova@mail.ru, lara@ksc.krasn.ru, astr_nat@mail.ru, alexbarchenkov@mail.ru

The studies of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) needles structure and chlorophylls and carotenoid contents were carried out in four districts of the city of Krasnoyarsk, differing in the level of technogenic load. It was shown, that the length of the needles decreases with an increase in technogenic impact. The width, thickness and cross-section area of the needles and the central cylinder also decrease with an increase in the degree of air pollution. It was found that the cross-section areas of the conducting bundles in the central cylinder, as a rule, are not equal, the differences are 9–12 % and are characterized by high individual variability. No significant correlation was found between the sizes of conducting bundles and the level of technogenic load. The number of resin ducts in needles decreases with an increase in technogenic impact that indicates a decrease in the protection of the assimilation apparatus from damage by pests and diseases. Determination of the content of photosynthetic pigments in pine needles in two districts of the city, differing in the level of pollution, did not show significant differences in the content of chlorophylls and carotenoids. Perhaps this is due to the peculiarities of the weather of this growing season – abundant summer rainfalls prevented the accumulation of pollutants on the surface and inside the needles. The noted changes in the size, anatomical structure and pigment composition of pine needles can be considered as a result of adaptation to growing conditions and weather factors.

Keywords: city green stands, *Pinus sylvestris* L., photosynthetic pigments, technogenic pollution, needle anatomy.

How to cite: Stasova V. V., Skripal'shchikova L. N., Astrakhantseva N. V., Barchenkov A. P. Morphological and anatomical characteristics and pigment composition of Scotch pine needles in green stands of Krasnoyarsk city // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 2. P. 3–10 (in Russian with English abstract).