

УДК 581.5

МОРФОЛОГО-АНАТОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ХВОИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ ГОРОДА КРАСНОЯРСКА

Л. Н. Скрипальщикова¹, И. А. Днепровский¹, В. В. Стасова¹,
М. А. Пляшечник¹, Н. В. Грешилова², О. В. Калугина³

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

² Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

³ Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 132

E-mail: lara@ksc.krasn.ru, ilucha1991@mail.ru, vistasova@mail.ru, lilwood@ksc.krasn.ru,
natales2002@mail.ru, olignat32@inbox.ru

Поступила в редакцию 09.12.2015 г.

Изучены изменения морфолого-анатомических характеристик, а также флуктуирующей асимметрии (ФА) хвои сосновых древостоев, произрастающих под влиянием промышленных выбросов г. Красноярск. Исследовали наветренные опушки сосновых насаждений в лесостепной зоне, продуцирующих в условиях многолетнего антропогенного воздействия. Фоновым объектом выбран сосняк в 100 км на север от городской черты, вне основного переноса выбросов промышленности города. Наблюдения проводили в 2013–2014 гг. в чистых по составу сосновых насаждениях разнотравного типа леса, V–VI классов возраста. На модельных деревьях измеряли длину хвои по парам, а также площади поперечного сечения среза каждой хвоинки, центрального цилиндра, проводящих пучков, определяли количество смоляных ходов. Показатели ФА хвои рассчитывали по методике (Palmer, Strobeck, 1986). В хвое определяли содержание меди, никеля, цинка, кобальта, алюминия, кадмия, свинца, фтора и серы. Выявлено, что под влиянием промышленных выбросов города проявляются тенденции к уменьшению внешних размеров хвои и размеров ее внутренних структур по сравнению с фоновыми значениями. С другой стороны, через компенсаторный механизм идет адаптация морфологической и анатомической структур физиологически активной хвои к изменяющейся среде. Индексы ФА показателей анатомических структур хвои варьируют и в техногенной среде, и в условиях фона. Вариации обусловлены особенностями абиотических факторов мест произрастания насаждений и техногенными нагрузками. Корреляционный анализ показал наличие значимых связей между содержанием в хвое тяжелых металлов, алюминия и фтора и морфолого-анатомическими показателями и индексами ФА хвои. Наиболее неблагоприятное влияние оказывают высокие концентрации свинца и фтора.

Ключевые слова: сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L., морфолого-анатомические характеристики хвои, флуктуирующая асимметрия, техногенное загрязнение, Красноярск.

DOI: 10.15372/SJFS20160305

ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленных экологических вопросов современности проблема определения уровней техногенных нагрузок на лесные экосистемы урбанизированных территорий и оценка их гомеостатического равновесия приобретают

особую актуальность. Наиболее распространенный и информативный метод оценки состояния окружающей среды – биоиндикация (Биоиндикация..., 1988). Стабильность развития как способность организма к развитию без нарушений и ошибок является чувствительным индикатором состояния природных популяций. Наиболее

© Скрипальщикова Л. Н., Днепровский И. А., Стасова В. В., Пляшечник М. А., Грешилова Н. В., Калугина О. В., 2016

простым и доступным для широкого использования способом оценки стабильности развития является определение величины флуктуирующей асимметрии (ФА) билатеральных морфологических признаков, позволяющее получить интегральную оценку состояния организма при всем комплексе возможных воздействий (включая антропогенные факторы). Под флуктуирующей асимметрией понимается случайное небольшое отклонение от симметрии по любому признаку двусторонне симметричного организма (органа). Для оценки стабильности развития предпочтительно использование объектов с удобной для анализа системой морфологических признаков (Захаров, 1987). Для растений таким объектом является лист, испытывающий максимальное воздействие внешних факторов. Степень выраженности ФА напрямую зависит от силы воздействия фактора: чем она больше, тем выше значение показателя ФА (Методические рекомендации..., 2003).

Среди потока загрязняющих веществ, попадающих в атмосферу, почву и накапливающихся в компонентах лесных экосистем, тяжелые металлы (ТМ) и их соли, фтористые и сернистые соединения в определенных концентрациях наиболее токсичны. Эффект токсичности тяжелых металлов обусловлен их физическими, химическими и физико-химическими свойствами, а также возможным переходом одного токсического эффекта в другой (Прохорова, Матвеев, 1996). Известно, что под действием ТМ ингибируются многие фотосинтетические реакции, изменяется интенсивность дыхания, нарушаются водный обмен и минеральное питание (Гетко, 1989; Рожков, Михайлова, 1989 и др.).

В основе токсического действия ТМ на растения лежит их сродство к сульфгидрильным группам клеточных белков. Встраиваясь в молекулу белка или фермента, ТМ вызывают замедление клеточного деления, изменяют структуру и проницаемость мембран, снижают активность ферментов. Токсические действия ТМ изучаются, главным образом, на сельскохозяйственных растениях в контролируемых условиях (Титов и др., 2014). Древесные растения, произрастающие в естественных условиях, изучены гораздо слабее. Лесные экосистемы, продуцирующие в зонах влияния крупных промышленных городов, в зависимости от уровней антропогенного пресса могут деградировать (Ярмишко, 1997; Черненко, 2002; Михайлова и др., 2011 и др.) либо проявлять признаки адаптации к новым

условиям произрастания (Цветков В. Ф., Цветков И. В., 2003).

Морфологические, физиолого-биохимические и анатомические характеристики ассимиляционного аппарата в условиях техногенного загрязнения изучали многие исследователи (Николаевский, 1979; Лесные экосистемы..., 1990; Собчак и др., 2001; Черненко, 2002; Василевская, Гумарова, 2005; Зотикова и др., 2007; Соболева и др., 2009; Ярмишко, Лянгузова, 2013 и др.). В настоящее время актуально расширение исследований на мезоструктурном уровне реакций деревьев и их органов на промышленное загрязнение в регионах при разных уровнях техногенных нагрузок и в разных климатических условиях.

Сосна обыкновенная – одна из основных лесобразующих пород в лесостепной зоне Сибири. В Красноярской лесостепи это в основном насаждения, произрастающие на песках речных террас (Экологическое состояние..., 2009). Уровень загрязнения воздушной среды г. Красноярска последние десятилетия характеризуется как высокий и очень высокий. В потоке загрязняющих веществ, воздействующих на сосняки, преобладают тяжелые металлы, алюминий, фтористые и сернистые соединения (Государственный доклад..., 2015).

Цель данного исследования – изучение изменений морфолого-анатомических характеристик, а также флуктуирующей асимметрии хвои сосновых древостоев, произрастающих под многолетним влиянием промышленных выбросов г. Красноярска. В связи с поставленной целью выполняли следующие задачи:

- измерение морфологических и анатомических показателей хвои;
- определение содержания тяжелых металлов, фтора, алюминия и серы в хвое сосны обыкновенной;
- выявление связей между морфолого-анатомическими характеристиками, интегральными показателями ФА хвои сосны обыкновенной и уровнями загрязнения мест произрастания исследуемых сосновых насаждений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в 2013–2014 гг. в чистых по составу сосновых насаждениях разного типа леса, V–VI классов возраста, продуцирующих в окрестностях Красноярска в зоне основного ветрового переноса токсичных аэрозолей и техногенной пыли, а также интенсивно

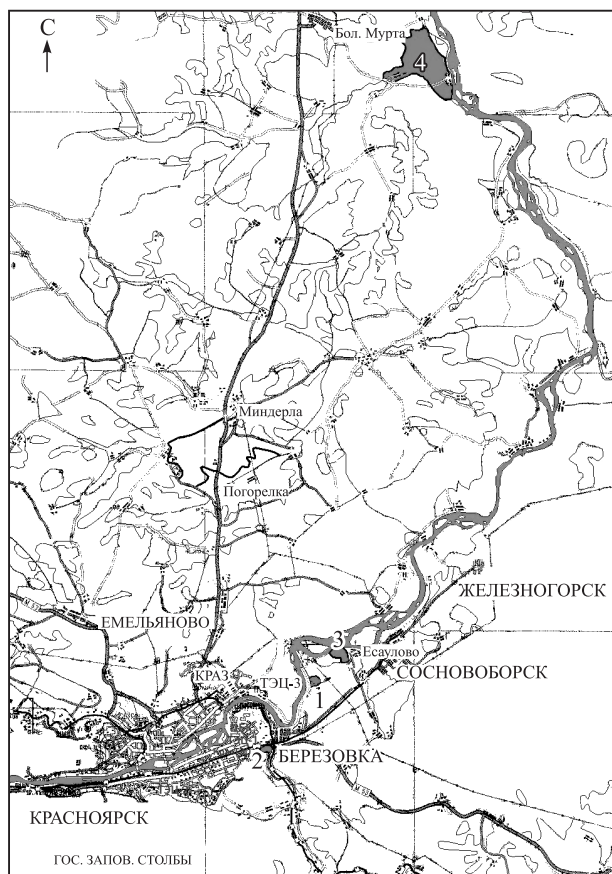


Рис. 1. Схема размещения пробных площадей в сосновых насаждениях Красноярской лесостепи. 1 – сосновое насаждение (ППП 1) (СНТ «Строитель»), 2 – Березовский бор (ППП 2), 3 – Есаульский бор (ППП 3 и 4), 4 – Юкеевский бор – фон (ППП 5–7).

использующихся в целях рекреации. Наблюдения вели на наветренных опушках загрязненных сосновых массивов на четырех мониторинговых пробных площадях (ППП) (Экологическое состояние..., 2009). Фоновым объектом выбран сосняк разнотравный в 100 км от города, вне основного переноса выбросов промышленности города, в котором обследовали 3 мониторинговые ППП. Всего обследовано 7 ППП в четырех сосновых массивах (рис. 1):

Сосновое насаждение (ППП 1) в районе садоводческого некоммерческого товарищества (СНТ) «Строитель» в 10 км на восток от Красноярского алюминиевого завода (КраАЗ). Сосняк разнотравный. Испытывает прямое влияние алюминиевого завода и ТЭЦ-3, а также высокую рекреационную нагрузку.

Березовский бор (ППП 2) в 10 км на юго-восток от КраАЗа в направлении основного воздействия пылевых и газообразных выбросов Енисейского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК), КраАЗа и других промышленных пред-

приятий города. Сосняк осочково-разнотравный с высокой рекреационной и пасквальной нагрузками.

Есаульский бор (ППП 3 и 4) в 30 км к северо-востоку от КраАЗа по основному переносу воздушных масс. Сосняк разнотравно-осочково-зеленомошный. Характеризуется высокой степенью загрязнения выбросами промышленных предприятий города (КраАЗ и ТЭЦ-3) и интенсивной рекреационной нагрузкой.

Юкеевский бор (ППП 5–7) в 100 км на север от Красноярска, вне направления господствующих переносов воздушных масс. Фоновый объект. Сосняк разнотравный.

Образцы хвои отбирали в конце вегетационного периода (август). На каждой ППП с пяти модельных деревьев отобрали ветки из нижней части кроны. Для анатомических и химических исследований использовали хвою второго года. Для изучения морфолого-анатомических характеристик с каждого модельного дерева отбирали по 20 пар хвоинок второго года и фиксировали их в 60%-м этаноле. Измеряли длину хвои по парам, а также площадь поперечного сечения среза каждой хвоинки, ее центрального цилиндра и проводящих пучков, используя световой микроскоп, цифровую камеру-окуляр DCM-900 и программу PhotoMaster.

Согласно теории стабильности развития («морфогенетического гомеостаза») (Захаров, 1987), стрессирующие воздействия различного типа вызывают в живых организмах изменения гомеостаза (стабильности) развития, которые могут быть оценены по нарушению морфогенетических процессов. Количественным показателем нарушения стабильности развития является индекс флуктуирующей асимметрии (ИФА), который для длины хвои вычислялся по формуле (Palmer, Strobeck, 1986; Kozlov et al., 2002):

$$\text{ИФА} = 2(WL - WR) / (WL + WR),$$

где: WL – длина одной иглы в паре, WR – длина другой иглы в паре. Каждый морфологический показатель измеряли трижды и вычисляли среднее для каждой хвоинки. Эти средние значения использовали для расчета ФА для каждой пары хвоинок. ИФА для морфолого-анатомических показателей вычисляли аналогично расчету длины хвои. Рассчитывали средние значения показателей для каждого модельного дерева и далее для каждой ППП.

Образцы хвои для химического анализа высушивали до абсолютно сухого состояния при температуре 105–108 °С. Содержание меди, ни-

кея, цинка, кобальта, алюминия, кадмия, свинца в хвое определяли на атомно-абсорбционном спектрометре МГА-915МД по аттестованным методикам М 04-64-2010 и М 03-07-2009. Валовой фтор в хвое определяли фотометрическим методом с ксиленоловым оранжевым индикатором после сухого озоления и дистилляции с водяным паром в хлорной кислоте (Руководство..., 1979). Количество серы определяли после мокрого озоления в смеси концентрированных хлорной и азотной кислот турбидиметрическим методом в присутствии детергента Твин-80 (Маслов, 1978). Химические анализы проводили в трехкратной повторности для каждого модельного дерева, результаты усредняли для каждой ПП. Погрешность определения элементов в пробах составляла 6–8 %.

Для математической обработки данных использовали пакеты компьютерных статистических программ (Excel, Statistica 10).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что максимальные значения длины хвои характерны для сосны, произрастающей в условиях фона (8.3 см). Минимальная величина отмечена на ПП 3 – 4.1 см. Уменьшение длины хвои при техногенном воздействии отмечено многими исследователями (Василевская, Тумарова, 2005; Придача и др., 2011; Терехова, Евдокимова, 2011). В Березовском бору (ПП 2) для сосен характерно достоверное увеличение длины хвои в сравнении с другими загрязненными насаждениями, среднее значение составляло 6.2 см (рис. 2). Увеличение длины хвои в этом бору наблюдалось и ранее (Экологическое состояние..., 2009). В техногенных условиях обычно отмечается уменьшение этого

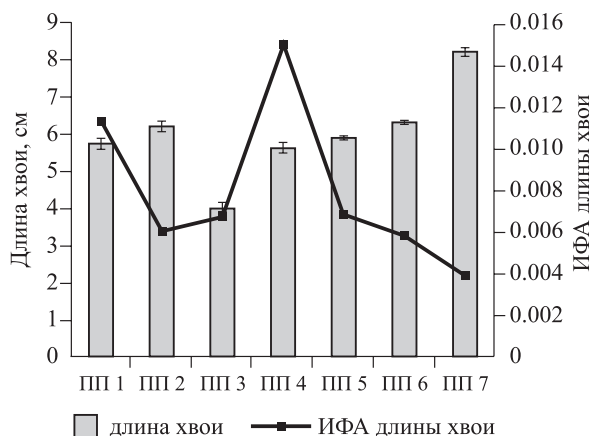


Рис. 2. Значения и ИФА длины хвои сосны из различных мест произрастания.

биометрического показателя (Рожков, Михайлова, 1989; Лесные экосистемы..., 1990; Черненко, 2002; Кизеев, 2011 и др.). Увеличение длины хвои в Березовском бору, возможно, связано с высоким содержанием в хвое сосен серы (874 мг/кг абс. сух. массы), превышающим фоновый уровень (476–526 мг/кг абс. сух. массы).

Как известно, сера входит в состав аминокислоты цистеина, которая содержится в не-протеиновых тиолах – глутатионе и фитохелатинах, играющих важную роль в детоксикации ксенобиотиков (Титов и др., 2014). Возможно, повышенное содержание в хвое серосодержащих аминокислот способствует нейтрализации поллютантов и приводит к увеличению длины хвои сосен этого местопроизрастания. Увеличение длины хвои разного возраста и их биомассы найдено при изучении роста сосны обыкновенной в районе воздействия Костомукшского горно-обогатительного комбината (Терехова и др., 2008) и связывалось со стимуляцией активности ферментов азотного и фосфорного обмена и накоплением азота и фосфора при увеличении содержания серы в хвое. Такой механизм наблюдается, как отмечают авторы, для средних концентраций серы в хвое. Исследуемый нами Березовский бор (ПП 2) произрастает в зоне среднего уровня загрязнения (Скрипальщикова и др., 2002), что позволяет сравнивать эти результаты.

Индекс ФА характеризует морфологические изменения в ответ на стрессирующие факторы (Захаров и др., 2000). В наших исследованиях наибольшие значения ИФА длины хвои выявлены на ПП 1 (0.011) и ПП 4 (0.015), расположенных в зоне основного загрязнения от КраЗа и ТЭЦ-3 (см. рис. 2). Повышение ФА длины хвои сосны по мере приближения к промышленным комбинатам показано в работах Н. В. Василевской и Ю. М. Тумаровой (2005), Е. Н. Тереховой и Е. В. Евдокимовой (2011). У сосен Березовского бора (ПП 2) значения ИФА низкие (0.006). Такие значения могут быть обусловлены теми же факторами, которые влияют на длину хвои в этом насаждении: высокое содержание серы способствует детоксикации тяжелых металлов в хвое (Титов и др., 2014). Изменчивость индексов ФА на ПП в Есаульском бору (ПП 3 и 4) может быть связана с большим разнообразием действующих на древостой экологических факторов, а также обусловлена особенностями биофизической конструкции насаждения (Скрипальщикова, 1997). В условиях фона показатель ФА варьирует. Его вариации между ПП, вероят-

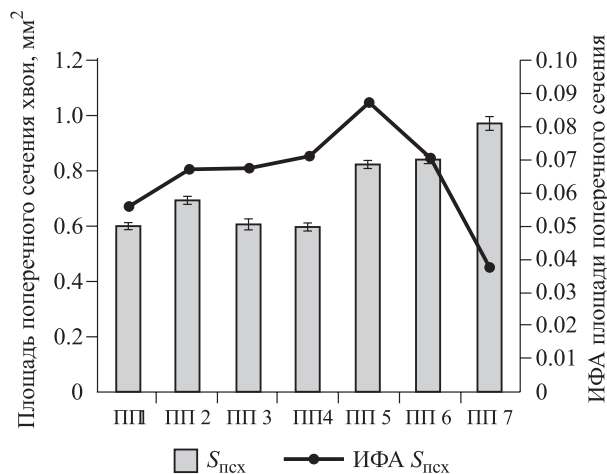


Рис. 3. Значения ($S_{псх}$) и ИФА площади поперечного сечения хвой сосны из различных мест произрастания.

но, обусловлены климатическими инверсиями и экологическими условиями произрастания этого насаждения на северной оконечности Красноярской лесостепи (Сергеев, 1971).

Площади поперечных сечений хвой (рис. 3) в загрязненных насаждениях достоверно ($p < 0.05$) ниже, чем в фоновом районе (Юкеевский бор – ПП 5–7). Так, в загрязненных условиях этот показатель составляет в среднем 0.63 мм^2 , за исключением Березовского бора (ПП 2), где он равен 0.69 . В условиях фона площадь поперечного сечения изменяется в диапазоне $0.82\text{--}0.98 \text{ мм}^2$. Снижение этого показателя в условиях загрязнения выявлено для сосны в г. Новокузнецке (Соболева и др., 2009), а также для других хвойных, например ели в промзоне г. Кемерово (Легощина и др., 2013).

Расчеты показали, что наибольшие значения ИФА площади поперечного сечения отмечены для хвой сосен ПП 3 и 4 Есаульского бора и ПП 5 и 6 Юкеевского бора. В условиях фона повышенный индекс ФА площади поперечного сечения можно объяснить неоднородностью мест произрастания сосен трех ПП Юкеевского бора, в частности эдафических условий, и наличием геохимических аномалий. К неблагоприятным моментам природной характеристики Юкеевского бора относятся поздние весенние и ранние осенние заморозки, малое количество осадков, небольшая влажность воздуха в конце весны или начале лета, неблагоприятный температурный режим почвы, позднее ее оттаивание и медленное прогревание, которые пагубно действуют на развитие растений (Сергеев, 1971).

Центральный цилиндр (ЦЦ) хвой представляет собой систему проводящих тканей, отде-

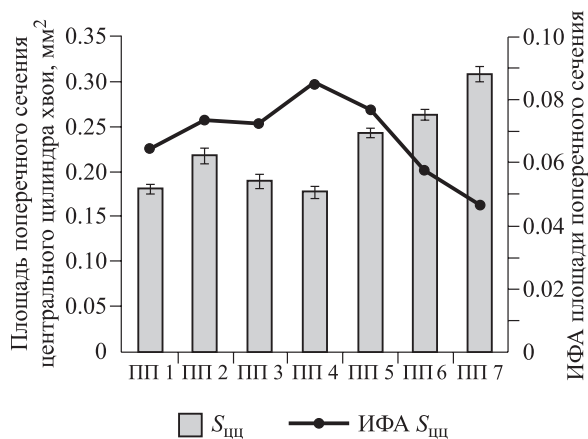


Рис. 4. Значения ($S_{цц}$) и ИФА площади поперечного сечения центрального цилиндра хвой сосны из различных мест произрастания.

ленную от ассимилирующей ткани эндодермой. Площадь поперечного сечения центрального цилиндра (рис. 4) минимальна в хвое сосен насаждений ПП 1 и 4, продуцирующих под длительным влиянием алюминиевого завода. Максимальные значения площади ЦЦ зафиксированы в чистом местообитании, в хвое сосен Юкеевского бора (ПП 7). Изменения анатомических структур хвой в условиях воздушного загрязнения имеют разную направленность у разных видов хвойных (Зотикова и др., 2007). Так, у ели сибирской площадь центрального цилиндра увеличивается, у сосны обыкновенной не изменяется, а у кедра сибирского уменьшается.

Индексы флуктуирующей асимметрии площадей центрального цилиндра в паре хвоинок составляют $0.05\text{--}0.08$ и достоверно не различаются. Показатели, характеризующие наибольшие отклонения в симметрии площадей центрального цилиндра, обнаружены у хвой Есаульского (ПП 4) и Юкеевского (ПП 5) боров. Минимальные ИФА зафиксированы на ПП 6 и 7 фонового местообитания – Юкеевского бора.

Центральный цилиндр содержит два проводящих пучка, окруженных трансфузионной тканью. Наибольшие величины площадей поперечных сечений проводящих пучков (рис. 5) выявляются в чистом местообитании ($1.65\text{--}2.14 \cdot 10^4 \text{ мкм}^2$), в антропогенно нарушенных сосняках размеры проводящих пучков уменьшаются в $1.5\text{--}2$ раза по сравнению с фоном и составляют $1.06\text{--}1.32 \cdot 10^4 \text{ мкм}^2$ ($p < 0.05$).

Определенных тенденций в изменении ИФА площадей поперечных сечений проводящих пучков выявить не удалось. Данный показатель

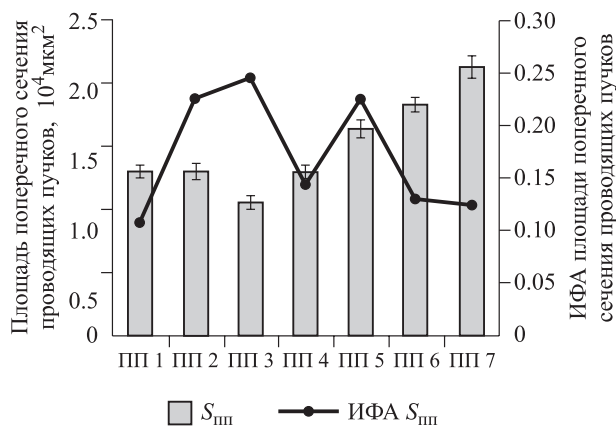


Рис. 5. Значения (S_{III}) и ИФА площади поперечного сечения проводящих пучков хвои сосны из различных мест произрастания.

сильно варьирует в зависимости от местопроизрастания сосен. Ранее размеры проводящих пучков и ИФА для хвои сосны в литературе не рассматривались. Однако при изучении хвои ели выявлено увеличение асимметрии центрального проводящего пучка в условиях промвыбросов г. Кемерово (Легощина и др., 2013).

В складчатом мезофилле хвои присутствуют смоляные ходы, выполняющие защитные функции. Минимальное их количество зафиксировано в хвое сосен антропогенно нарушенного насаждения ПП 1, где оно не превышает 5 шт., в хвое фоновых объектов (ПП 5–7) их количество варьирует от 7 до 11 шт. (рис. 6). Достоверных различий количества смоляных ходов в нарушенных и чистых местах произрастания не выявлено, но можно отметить тенденцию к уменьшению этого показателя при загрязнении.

Изменения смолоносной системы хвои под действием поллютантов изучались многими исследователями, которые установили различный отклик смоловыделяющей системы сосны на воздействие химических реагентов. Вариации количества смоляных ходов в хвое сосны подробно рассматривал Е. С. Петренко (1967). А. А. Онучин и Л. Н. Козлова (1993) обнаружили увеличение числа смоляных ходов в хвое сосен под влиянием техногенных аэрозолей Назаровской ГРЭС. По данным ряда авторов, количество и расположение смоляных ходов в хвое сосны изменчивы и в условиях города у хвойных видов наблюдается достоверное увеличение количества смоляных каналов на поперечных срезах хвои (Илькун, 1978; Николаевский, 1979; Собчак и др., 2001). Однако в некоторых исследованиях (Зотикова и др., 2007; Соболева и др.,

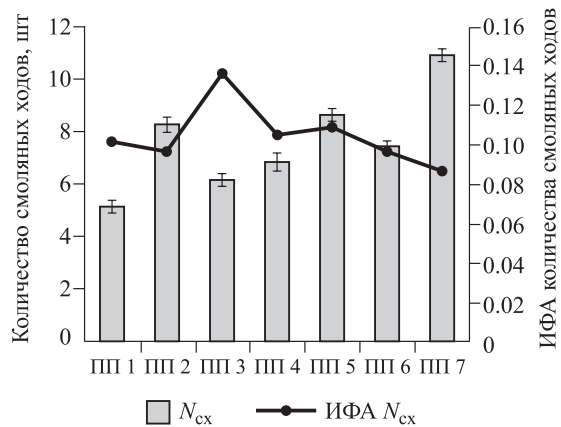


Рис. 6. Количество ($N_{сх}$) и ИФА количества смоляных ходов хвои сосны из различных мест произрастания.

2009) отмечено уменьшение числа смоляных ходов под влиянием загрязнения атмосферы.

Индекс ФА количества смоляных ходов значительно колеблется для хвои сосен в нарушенных насаждениях и составляет 0.096–0.136. Для хвои сосен в фоновых условиях этот показатель варьирует от 0.086 до 0.109.

Отношение площади центрального цилиндра к площади поперечного сечения хвои характеризует пропорциональность развития внутренних тканей хвои и ее возможные адаптации к внешним условиям (Соболева и др., 2009).

В процессе анализа данных выявлено, что для сосен в чистых и нарушенных местообитаниях данный показатель практически не различается и составляет 0.30. Это свидетельствует о том, что в техногенно нарушенных местообитаниях проходят процессы адаптации к изменяющимся условиям среды. Показатель отношения площади центрального цилиндра к площади хвои для разных местопроизрастаний колеблется незначительно. Географические условия (рельеф и наличие многоводной реки) (Климат..., 1982; Экологическое состояние..., 2009) способствуют рассеиванию мощных потоков загрязнителей, тем самым позволяя адаптироваться этим сообществам к антропогенно измененной среде.

Для дерева как целостного организма свойственна пропорциональность развития отдельных его частей. Соотношение ассимилирующей ткани и транспортной системы хвои должно поддерживаться на генетически заданном уровне (Сазонова и др., 2011). Слабое варьирование соотношения площадей поперечного сечения хвои и центрального цилиндра хвои сосен из разных мест произрастания Красноярской ле-

состеги свидетельствует о проявлении пока небольшого нарушения гомеостаза. По данным О. М. Соболевой с соавторами (2009), в чистых местопроизрастаниях это соотношение составило 0.30. В условиях высоких техногенных нагрузок в насаждениях с низкой биологической продуктивностью данный показатель меньше – 0.27 (Соболева и др., 2009).

В исследуемых сосняках, произрастающих в зоне воздействия промышленных выбросов города, как на поверхности хвои, так и в биомассе ранее установлены уровни накопления токсичных ингредиентов, превышающие фоновые значения в среднем в 5–7 раз (Экологическое состояние..., 2009). Исследованиями 2013–2014 гг. в тканях хвои обнаружены высокие концентрации фтора, серы, алюминия и тяжелых металлов (табл. 1).

В литературе нет унифицированных показателей токсичности элементов для растительных сообществ, при которых наступают необратимые нарушения роста и развития. В основном определены ПДК токсикантов в воздушной среде, при которых наблюдаются процессы деградации лесных сообществ (Ярмишко, 1997; Павлов, 2006 и др.). Рядом авторов определены примерные нормальные концентрации различных элементов в растениях, при которых не происходит нарушение гомеостаза (Melsted, 1973; Николаевский, 1979; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Содержание кадмия в исследуемой хвое колеблется около минимума нормальных значений. Концентрация кобальта также находится в диапазоне допустимых значений.

Нормальное содержание свинца в растениях по данным разных авторов различно. В хвое исследованных сосен чистых местопроизрастаний концентрации свинца близки к минимуму, тогда как в хвое загрязненных мест произрастания они выше в 5–10 раз по сравнению с фоном и иногда превышают верхний предел нормального содержания.

Содержание никеля в хвое сосен исследуемых насаждений весьма велико – близко к верхнему пределу нормального содержания по Мелстеду (Melsted, 1973) и в ряде случаев превышает его почти в 2 раза.

В хвое исследуемых насаждений содержание меди колеблется в диапазоне 3.08–3.82 мг/кг абс. сух. массы. При сравнении экспериментальных данных с данными из литературы выявлено, что этот диапазон близок к нижнему пределу нормального содержания меди в растениях.

Таблица 1. Концентрация тяжелых металлов, алюминия, серы и фтора в растительном материале, мг/кг абс. сух. массы

Элемент	Содержание элементов в хвое сосен исследованных насаждений							Содержание элементов (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989)		Нормальное содержание элементов (Melsted, 1973)*
	ПП 1	ПП 2	ПП 3	ПП 4	ПП 5	ПП 6	ПП 7	достаточное	избыточное	
Cd	0.050±0.010	0.041±0.010	0.045±0.010	0.066±0.020	0.059±0.010	0.040±0.010	0.046±0.010	0.05–0.2	5–30	0.05–0.2
Co	0.096±0.020	0.088±0.020	0.075±0.020	0.101±0.020	0.038±0.010	0.046±0.010	0.085±0.020	0.02–1	15–30	0.01–0.3
Pb	6.95±1.81	4.43±0.91	10.15±2.11	4.20±1.09	0.88±0.27	0.88±0.18	1.10±0.36	5–10	30–300	0.1–5
Ni	1.82±0.38	0.71±0.15	0.96±0.20	2.18±0.46	0.80±0.17	1.60±0.34	1.37±0.29	–	–	0.1–1
Cu	3.20±0.67	3.82±0.67	3.08±0.61	3.25±0.78	3.52±0.58	3.54±0.58	3.12±0.62	–	–	3–40
F	91.2±6.8	82.6±6.2	57.0±4.3	56.1±4.2	15.4±1.2	21.4±1.6	19.5±1.5	5–30	50–500	–
Zn	64.4±13.5	52.4±8.4	49.4±8.7	59.7±12.5	57.9±11.1	82.9±15.9	37.7±8.1	27–150	100–400	15–150
Al	203±43	617±102	171±31	198±42	138±20	83.6±15.3	49.0±9.0	–	–	–
S	–	874±34	710±27	–	476±37	469±32	526±36	–	–	–

* Цит. по: Baker, Chesnin, 1975.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между концентрациями тяжелых металлов, алюминия и фтора и морфолого-анатомическими показателями хвои и ИФА

Элемент	Длина хвои	ИФА длины хвои	$S_{\text{псх}}$	ИФА $S_{\text{псх}}$	$S_{\text{щц}}$	ИФА $S_{\text{щц}}$	$S_{\text{пш}}$	ИФА $S_{\text{пш}}$	Кол-во смоляных ходов	ИФА кол-ва смоляных ходов
Cd	-0.20	0.78	-0.24	0.21	-0.32	0.62	-0.07	-0.20	-0.11	-0.03
Co	-0.17	0.72	-0.56	-0.17	-0.54	0.59	-0.43	-0.13	-0.21	-0.09
Pb	-0.58	0.41	-0.78	-0.06	-0.74	0.27	-0.85	0.37	-0.68	0.75
Ni	-0.04	0.73	-0.24	-0.27	-0.25	0.01	0.04	-0.79	-0.35	0.24
Cu	-0.23	0.03	-0.12	0.54	-0.14	0.49	-0.10	0.18	0.07	-0.26
F	-0.41	0.47	-0.80	-0.11	-0.76	0.34	-0.74	0.05	-0.65	0.15
Zn	-0.25	-0.04	0	0.30	0	-0.31	0.20	-0.40	-0.37	-0.13
Al	-0.30	-0.02	-0.48	0.11	-0.43	0.35	-0.55	0.43	-0.19	0.01

Норма содержания фтора в ассимилирующих органах хвойных по Р. Гудериану (1979) составляет 8–20 мг/кг абс. сух. массы. В исследуемых насаждениях концентрации фтора превышены: в 4 раза в насаждениях Березовского бора (82.6 мг/кг) и в 2.5 раза в хвое сосен на ПП 3 Есаульского бора (57.0 мг/кг). В сосняках, продуцирующих в зоне влияния алюминиевого завода (ПП 1–4), содержание валового фтора превышает нижний предел токсичности для растений по А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас (1989) (см. табл. 1).

Содержание цинка в исследуемой хвое колеблется от 37.7 до 82.9 мг/кг абс. сух. массы и не превышает пределов нормального.

Концентрации алюминия минимальны в хвое сосен фонового насаждения. Фолиарное содержание этого элемента в древостоях, находящихся под влиянием промышленных выбросов города, многократно увеличивается, достигая значения 617 мг/кг абс. сух. массы в Березовском бору.

Содержание серы в хвое сосны обыкновенной в загрязненных насаждениях примерно в 1.5 раза больше, чем в условиях фона.

При техногенном воздействии на лесные экосистемы трудно определить, какой из ингредиентов оказывает наиболее токсичное воздействие на рост и развитие растений (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Для выявления наиболее значимых загрязнителей и наиболее чувствительных морфологических параметров проведен корреляционный анализ между значениями концентраций загрязняющих элементов в хвое и морфолого-анатомическими показателями, а также ИФА хвои. Статистически значимые коэффициенты ($p < 0.05$) выделены жирным шрифтом (табл. 2).

Кадмий не является необходимым элементом метаболизма и весьма токсичен для растений (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). В хвое сосен в техногенных местообитаниях содержание кадмия (см. табл. 1) незначительно превышает нижние пороговые значения его нормального содержания в растениях по Мэлстеду. Тем не менее коэффициенты корреляции показывают отрицательную связь между накоплением этого элемента и морфологическими признаками хвои и положительную – с асимметрией длины хвои в паре ($r = 0.78$) и ИФА площади поперечного сечения центрального цилиндра ($r = 0.62$).

Корреляционный анализ показал, что повышение содержания Co в хвое оказывает отрицательное влияние на площадь поперечного сечения хвои и центрального цилиндра, при этом увеличивает асимметрию длины хвои ($r = 0.72$) и площади поперечного сечения центрального цилиндра ($r = 0.59$).

Свинец относится к числу высокоопасных химических элементов (Серегин, Иванов, 2001). Нами обнаружено, что его содержание в хвое сосен загрязненных местообитаний (ПП 1–4) превышает нормальные концентрации по Мэлстеду почти в 1.5 раза, но по Кабата-Пендиас, Пендиас превышения не наблюдается (см. табл. 1). При этом выявлено общее угнетение роста и развития хвои, т. е. уменьшение длины, площади поперечного сечения среза хвои, центрального цилиндра, проводящих пучков, количества смоляных ходов с увеличением содержания Pb в хвое.

Влияние Cu, Ni, Zn на морфолого-анатомические характеристики хвои незначительное (см. табл. 2), однако повышение концентрации Ni коррелирует с увеличением вариативности длины хвои в паре ($r = 0.73$) и уменьшением

асимметрии анатомических параметров, таких как площади проводящих пучков ($r = -0.79$). Обнаружена корреляция между накоплением Си и увеличением ИФА площади поперечного сечения хвои ($r = 0.54$).

Фтор и его соединения считаются наиболее опасными и фитотоксичными среди других газообразных загрязняющих веществ. Фтор влияет на метаболизм и угнетает ростовые процессы растений (Рожков, Михайлова, 1989; Танделов, 2012). В хвое сосен, растущих в зоне влияния КраЗа, выявлена значимая отрицательная связь всех морфолого-анатомических показателей хвои с содержанием в ней фтора, однако связь содержания этого элемента с индексами флуктуирующей асимметрии показателей не выявлена.

Согласно полученным коэффициентам корреляции, накопление Al отрицательно влияет на анатомические показатели, в особенности на площади проводящих пучков, при этом влияние на показатели ФА незначительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены особенности морфолого-анатомических показателей хвои сосны обыкновенной, произрастающей в лесостепной зоне под многолетним (свыше 50 лет) воздействием промышленных выбросов Красноярска и в условиях фона.

В целом в сосновых насаждениях под влиянием промышленных выбросов города проявляются тенденции к уменьшению внешних размеров хвои и размеров ее внутренних структур по сравнению с фоном. Под влиянием техногенных факторов уменьшаются длина физиологически активной хвои, площадь ее поперечного сечения, площадь поперечного сечения центрального цилиндра и проводящих пучков. С другой стороны, соотношение ассимилирующей и проводящей тканей остается постоянным, что может свидетельствовать о наличии компенсаторных механизмов и адаптации к условиям произрастания со средними уровнями загрязнения.

Несмотря на то что выявленные концентрации токсичных элементов в хвое превышают нормальные только в отдельных случаях, прослеживается их влияние на рост и развитие хвои. Корреляционный анализ показал наличие связей между содержанием в хвое тяжелых металлов, алюминия и фтора и морфолого-анатомическими показателями и индексами ФА хвои. Выявлены сильные отрицательные связи всех

анато-морфологических показателей хвои с содержанием в ней свинца и фтора.

Планируется продолжение исследований морфолого-анатомических показателей хвои сосны обыкновенной в антропогенно нарушенных ландшафтах Красноярской лесостепи с целью оценки на этой основе стабильности развития сосновых насаждений и их средообразующего потенциала.

Авторы выражают благодарность А. С. Шишкину (Институт леса СО РАН) за помощь в проведении экспедиционных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биоиндикация загрязнения наземных экосистем. М.: Мир, 1988. 350 с.
- Василевская Н. В., Тумарова Ю. М. Оценка стабильности развития популяции *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения (Мурманская область) // Тр. Карельск. науч. центра РАН. Вып. 7. Биогеография Карелии. Петрозаводск, 2005. С. 19–23.
- Гетко Н. В. Растения в техногенной среде. Минск: Наука и техника, 1989. 208 с.
- Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2014 году. Красноярск, 2015. 294 с.
- Гудериан Р. Загрязнения воздушной среды. М.: Мир, 1979. 200 с.
- Захаров В. М. Асимметрия животных (популяционно-феногенетический подход). М.: Наука, 1987. 216 с.
- Захаров В. М., Баранов А. С., Борисов В. И., Валецкий А. В., Кряжева Н. Г., Чистякова Е. К., Чубинишвили А. Т. Здоровье среды: методика оценки. М.: Центр экол. политики России, 2000. 66 с.
- 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. Томск. гос. ун-та, 2007. № 299 (1). С. 197–200.
- Илькун Г. М. Загрязнение атмосферы и растения. Киев: Наук. думка, 1978. 249 с.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
- Кизеев А. Н. Изменения морфологических и физиолого-биохимических показателей хвои сосны обыкновенной в условиях аэротехногенного загрязнения // Молодой ученый. 2011. № 3. Т. 1. С. 120–128.
- Климат Красноярска. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 230 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.
- Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / Под ред. В. А. Алексеева. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. 200 с.
- М 04-64-2010. Определение массовой доли кадмия, мышьяка, олова, ртути, свинца, хрома в пробах пищевых продуктов и продовольственного сырья. СПб., 2010. 40 с.
- М 03-07-2009. Измерение массовой концентрации металлов (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, V, Zn) в пробах почв, грунтов и донных отложений. СПб., 2009. 30 с.
- Маслов Ю. И. Микроопределение серы в растительном материале // Методы биохимического анализа растений. Л.: ЛГУ, 1978. С. 146–155.
- Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). Утв. распоряжением МПР № 460-р от 16.10.2003. М., 2003.
- Михайлова Т. А., Калугина О. В., Шергина О. В. Фитомониторинг техногенных фторидов в байкальском регионе // Фторные заметки. 2011. № 3 (76). http://notes.fluorinel.ru/public/2011/3_2011/letters/rusletter2.html
- Николаевский В. С. Биологические основы газостойчивости растений. М.: Наука, 1979. 530 с.
- 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. Древесные растения в условиях техногенного загрязнения. Улан-Удэ: Изд-во Бурятск. науч. центра СО РАН, 2006. 359 с.
- Петренко Е. С. Изменчивость числа смоляных каналов в хвое сосны обыкновенной // Лесоведение. 1967. № 6. С. 76–83.
- Придача В. Б., Сазонова Т. А., Таланова Т. Ю., Ольчев А. В. Морфофизиологическая реакция *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. // Экология. 2011. № 1. С. 25–33.
- Прохорова Н. В., Матвеев Н. М. Тяжелые металлы в почвах и растениях в условиях техногенеза // Вестн. Самарск. гос. ун-та. 1996. Спец. вып. С. 125–147.
- Рожков А. С., Михайлова Т. А. Действие фторсодержащих эмиссий на хвойные деревья. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 159 с.
- Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 448 с.
- Сазонова Т. А., Болондинский В. К., Придача В. Б. Эколого-физиологическая характеристика сосны обыкновенной. Петрозаводск: Verso, 2011. 207 с.
- Сергеев Г. М. Островные лесостепи и подтайга Приенисейской Сибири. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1971. 264 с.
- Серегин И. В., Иванов В. Б. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиол. раст. 2001. Т. 48. № 4. С. 606–630.
- Скрипальщикова Л. Н. Пылеулавливающие свойства лесных экосистем в лесостепных районах Средней Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск. 1997. 19 с.
- Скрипальщикова Л. Н., Харук В. И., Яхимович А. П., Лопатин А. П., Грешилова Н. В., Страшиников А. В. Зонирование техногенных воздействий по ореолам загрязнения снегового покрова // Сиб. экол. журн. 2002. № 1. С. 95–101.
- Соболева О. М., Кондратенко Е. П., Пинчук Л. Г. Комплексная оценка состояния ассимиляционного аппарата сосны обыкновенной в г. Новокузнецке // Вестн. Алтайск. гос. агр. ун-та. 2009. № 7. С. 33–36.
- 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 // Kyzlovia – Сиб. бот. журн. 2001. Т. 3. № 2. С. 114–121.
- Танделов Ю. П. Фтор в системе почва–растение. Красноярск, 2012. 146 с.
- Теребова Е. Н., Евдокимова Е. В. Стабильность развития сосны обыкновенной: связь морфологических и физиологических показателей в условиях загрязнения // Структурные и функциональные отклонения от нормального роста и развития растений под воздействием факторов среды: мат-лы Междунар. конф. Петрозаводск: Карельск. науч. центр РАН, 2011. С. 351–355.
- Теребова Е. Н., Сазонова Т. А., Галибина Н. А. Состояние хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях промышленного загрязнения Костомукшского ГОК (Республика Карелия) // Раст. ресурсы. 2008. Т. 44. № 2. С. 56–68.
- Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельск. науч. центр РАН, 2014. 194 с.
- Цветков В. Ф., Цветков И. В. Лес в условиях промышленного загрязнения. Архангельск, 2003. 354 с.

- Черненко Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука, 2002. 190 с.
- Экологическое состояние пригородных лесов Красноярска. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2009. 179 с.
- Ярмишко В. Т. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 1997. 210 с.
- Ярмишко В. Т., Лянгузова И. В. Многолетняя динамика параметров и состояния хвои *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения на Европейском Севере // Изв. СПбЛТА. 2013. Вып. 203. С. 30–46.
- Baker D. E., Chesnin L. Chemical monitoring of soil for environmental quality animal and health // *Advances in Agronomy*. 1975. V. 27. P. 306–366.
- Kozlov M. V., Niemela P., Junttila J. Needle fluctuating asymmetry as a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // *Ecological indicators*. 2002. V. 1. P. 271–277.
- Palmer A. R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry: measurement, analysis, patterns // *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 1986. V. 17. P. 391–421.

MORPHOLOGICAL AND ANATOMICAL CHARACTERISTICS OF SCOTS PINE NEEDLES UNDER INDUSTRIAL POLLUTION IMPACT OF KRASNOYARSK CITY

L. N. Skripal'shchikova¹, I. A. Dneprovskii¹, V. V. Stasova¹, M. A. Plyashechnik¹, N. V. Greshilova², O. V. Kalugina³

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

² Siberian Federal University Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

³ Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Science, Siberian Branch Lermontov str., 132, Irkutsk, 664033 Russian Federation

E-mail: lara@ksc.krasn.ru, ilucha1991@mail.ru, vistasova@mail.ru, lilwood@ksc.krasn.ru, natales2002@mail.ru, olignat32@inbox.ru

The changes of morphological and anatomical characteristics of Scots pine needles as well as their fluctuating asymmetry (FA) were studied in pine stands under the influence of industrial emissions of Krasnoyarsk. Observations were made in forest-steppe zone on windward pine forest edges in the conditions of long-term anthropogenic effect. Background site was pine stand 100 km from the city outside the direction of wind pollution. The investigations were carried out in 2013–2014 in pure pine stands of grass type, V–VI class of age. For every model tree the needle lengths in pairs were measured, as well as the cross section area of needle, area of central cylinder and conducting bindles areas and the number of resin canals. Indices of fluctuating asymmetry were calculated by method of Palmer and Strobeck (1986). The content of copper, nickel, zinc, cobalt, aluminum, cadmium, lead, fluorine and sulfur were analyzed in needle samples in parallel. The dimensions of needles and its internal structure elements showed the tendency to decrease under the influence of urban industrial emissions in comparison with background sites. On the other hand, there were adaptations of morphological and anatomical parameters of physiologically active needles to the changing environment through a compensatory mechanism. Fluctuating asymmetry indices of needles parameters were found to vary both in technogenic conditions and background ones. The variations were caused by abiotic factors of habitats and levels of technogenic loadings in these stands. Correlation analysis revealed relations between concentrations of heavy metals, aluminum and fluorine and morphological and anatomical characteristics of needles and FA indices. The most unfavorable effects were produced by high concentrations of lead and fluorine.

Keywords: Scots pine, morphological and anatomical characteristics of needles, fluctuating asymmetry, technogenic pollution, Krasnoyarsk.

How to cite: Skripal'shchikova L. N., Dneprovskii I. A., Stasova V. V., Plyashechnik M. A., Greshilova N. V., Kalugina O. V. Morphological and anatomical characteristics of Scots pine needles under industrial pollution impact of Krasnoyarsk city // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Siberian Journal of Forest Science). 2016. N. 3: 46–56 (in Russian with English abstract).