

**И. С. Коротченко****А. Н. Алексеева****Флуктуирующая асимметрия хвои *Pinus sylvestris* L. как биоиндикационный показатель загрязнения природных сред города Красноярска**

В статье дана оценка изменчивости индекса флуктуирующей асимметрии (ФА) хвои деревьев сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), произрастающей в крупном промышленном городе Сибири — Красноярске. Проведен корреляционный, регрессионный и факторный анализы. Установлено, что на пробных площадях города Красноярска индекс ФА хвои *P. sylvestris* был статистически значимо выше, чем в лесном массиве того же региона. Индекс ФА хвои имеет значимую корреляционную связь с индексом суммарного загрязнения почвы, биогеохимической активностью *P. sylvestris*, уровнем автотранспортной и промышленной нагрузки пробной площади. Таким образом, индекс ФА хвои *P. sylvestris* можно использовать в качестве дополнительного критерия в биоиндикационной оценке качества среды промышленного города.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, загрязнение, промышленный город Красноярск, почвенный покров, флуктуирующая асимметрия, тяжелые металлы.

**Введение**

В условиях урбанизированных территорий происходит воздействие комплекса экологических факторов, определяющих протекание всех процессов жизнедеятельности растительных и животных организмов. При преобладающем действии антропогенных факторов — техногенной (промышленность, энергетика, транспорт) и хозяйственной (планирование, реализация застройки, коммунальное обеспечение, рекреационная деятельность) деятельности — возникает и развивается ряд экологических проблем. Абиотические факторы имеют определенные особенности проявления в экосистемах урбанизированных территорий, так как градоэкологические условия влияют на перемещение воздушных масс, распределение и накопление осадков, изменение ландшафта. Среди антропогенных факторов, влияющих на функционирование городских экосистем, важную роль играет химическое загрязнение [12].

Для оценки экологических последствий антропогенного воздействия необходим мониторинг содержания загрязнителей в компонентах городской среды. Зеленые насаждения городов в данном контексте выполняют главную роль в качестве основы биологического мониторинга. Актуальность проблемы обусловлена поиском биоиндикатора в условиях крупных промышленных городов Сибири.

Для оценки химической нагрузки на биоиндикатор используют разные его характеристики. Самым широко используемым и наиболее простым в исполнении является морфологический подход [8; 10]. В ряду многочисленных оцениваемых параметров применяется анализ морфометрической асимметрии билатеральных признаков как у покрытосеменных древесных растений [7; 19; 25], так и у голосеменных растений [18; 20].

Для оценки состояния окружающей среды крупного промышленного города Красноярска в качестве биоиндикатора применяется сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) ввиду ее широкой распространенности и специфичности реакций на наличие загрязняющих веществ в воздухе и почве [9; 18]. Большой интерес экологов к *Pinus sylvestris* L. в качестве биоиндикатора вызывает и ряд ее особенностей: большая продолжительность жизни, площадь контакта с окружающей средой, высокая чувствительность к элементам-токсикантам [14]. При этом исследуют различные показатели сосны обыкновенной:

© Коротченко И. С., Алексеева А. Н., 2021

содержание микроэлементов [11], накопление тяжелых металлов (ТМ) [18], жизненное состояние и продуктивность насаждений, состояние фотосинтезирующего аппарата, флуктуирующую асимметрию хвои [9; 13; 24].

Цель исследования — оценка изменчивости индекса флуктуирующей асимметрии хвои деревьев *Pinus sylvestris* L., произрастающих в районах города Красноярска, различающихся по уровню и характеру техногенной нагрузки.

#### Материал и методы исследования

В сентябре 2019 г. проведен отбор растительного материала деревьев *P. sylvestris* на пробных площадях в различных районах Красноярска, крупного промышленного города с населением более 1 миллиона человек, отличающихся уровнем антропогенного воздействия:

ПП1 — в парке Гвардейский (Советский район), рекреационная зона со средней автотранспортной нагрузкой; на расстоянии 3,5 км к северо-востоку находится Красноярский алюминиевый завод (КрАЗ);

ПП2 — в микрорайоне Академгородок (Октябрьский район), селитебная территория со средней автотранспортной нагрузкой;

ПП3 — в садоводческом потребительском кооперативе «Сады турбазы» (Свердловский район), в 500 м железная дорога, средняя автотранспортная нагрузка;

ПП4 — в ДК 1 Мая (Ленинский район). Селитебная зона, на расстоянии 3 км к юго-востоку находится шинный завод, высокая автотранспортная нагрузка;

ПП5 (контроль) — в 50 км от г. Красноярска, природный лесной массив, автотранспортная нагрузка отсутствует (Сухобузимский район Красноярского края) (рис. 1).



Рис. 1. Схема размещения пробных площадей насаждений *Pinus sylvestris* L. в условиях урбосреды г. Красноярска

В исследуемых районах каждая выборка включала 100 парных хвоинок первого года жизни (по 10 пар с 10 деревьев). С деревьев 16—20-летнего возраста секатором срезались ветви с нижней части кроны на одной высоте от земли, ориентированные по разным сторонам света. Подготовленные растительные образцы сканировали с разрешением 400 dpi. Полученные рисунки представляли собой сканированные изображения 10 пар хвоинок для отдельного дерева. Измерения проводились пятью участниками с помощью программы Image J, информация о месте сбора хвоинок была зашифрована. Метод оценки качества окружающей среды по индексу флуктуирующей асимметрии хвои *Pinus sylvestris* L. был предложен и применен М. В. Козловым [20]. Для расчета индекса флуктуирующей асимметрии (ИФА) использовали формулу, предложенную Palmer, Strobeck [23]:

$$\text{ИФА} = 2 \cdot |(W_L - W_R)| / (W_L + W_R),$$

где  $W_L$  — длина первой хвоинки в паре,  $W_R$  — длина второй хвоинки в паре.

Почвенные образцы на каждом участке отбирали в соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.4.02-84 [4] в пятикратной повторности. Хвою *P. sylvestris* промывали проточной водой от осевших взвешенных веществ и высушивали при температуре 105°C. Сухую пробу для получения однородной консистенции измельчали в лабораторной мельнице с последующей обработкой в агатовой ступке. С целью доведения проб до постоянной массы их повторно высушивали, затем проводили сухое озоление растительных образцов и экстракцию ТМ из раствора золы с помощью 1М HNO<sub>3</sub>. Содержание тяжелых металлов (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, Mn, Fe) в почвенных, растительных образцах определяли атомно-абсорбционным методом на анализаторе PinAAcle 900T в Научно-исследовательском испытательном центре ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет». Из анализируемых почвенных образцов экстрагировали подвижные формы ТМ ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8. Экологическую оценку степени химического загрязнения почвенного покрова проводили по показателю суммарного загрязнения согласно ГН 2.1.72041-06 [2]. Для оценки воздействия ТМ на растения вычисляли биогеохимическую активность вида (БХА) как сумму коэффициентов биологического поглощения отдельных ТМ ( $K_b$ ) по рекомендациям В. В. Добровольского [6]:

$$\text{БХА} = \sum K_b,$$

$$K_b = C_{\text{хв}} / C_{\text{поч}},$$

где  $C_{\text{хв}}$  — содержание ТМ в золе хвои,  $C_{\text{поч}}$  — содержание этого ТМ в почвенном образце.

Все материалы обработаны статистически с использованием программы Statistica 6. При сравнении выборок применяли дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим попарным сравнением с использованием Дункан-теста (Duncan's multiple range test). Данный тест широко используется в аналогичных исследованиях [22].

### Результаты и их обсуждение

Средняя длина хвои *P. sylvestris* на исследуемых площадках составила: на ПП1 — 4,0 см, на ПП2 — 6,2 см, на ПП3 — 3,9 см, на ПП4 — 4,7 см, на контрольной площадке — 7,2 см. Длина хвои сосны обыкновенной на исследуемых площадках меньше на 5—40% по сравнению с контрольной (рис. 2). Наблюдаемое уменьшение длины хвои *P. sylvestris* в условиях города выявлено и другими исследователями [15; 16].

Дункан-тест показал, что все пробные площади при уровне значимости 0,001 отличаются друг от друга, кроме ПП1 и ПП3. Между изучаемыми районами города обнаружены статистически значимые ( $p < 0,001$ ) различия по средней длине хвои *P. sylvestris*, показатель силы влияния фактора — района произрастания *P. sylvestris* — составил 95%.

Значение ИФА хвои в исследуемых площадках варьировало от 0,0028 до 0,0221 (рис. 3). При этом самые низкие показатели ИФА отмечены в Октябрьском районе города

(ПП2). Более высокие показатели зафиксированы для сосен, растущих в парке Гвардейский, в местах по отношению к другим пробным площадям, ближе расположенных к алюминиевому заводу (ПП1). На пробных площадях правобережья города ПП3 и ПП4 ИФА хвои *P. sylvestris* составил 0,0201 и 0,0128 соответственно.

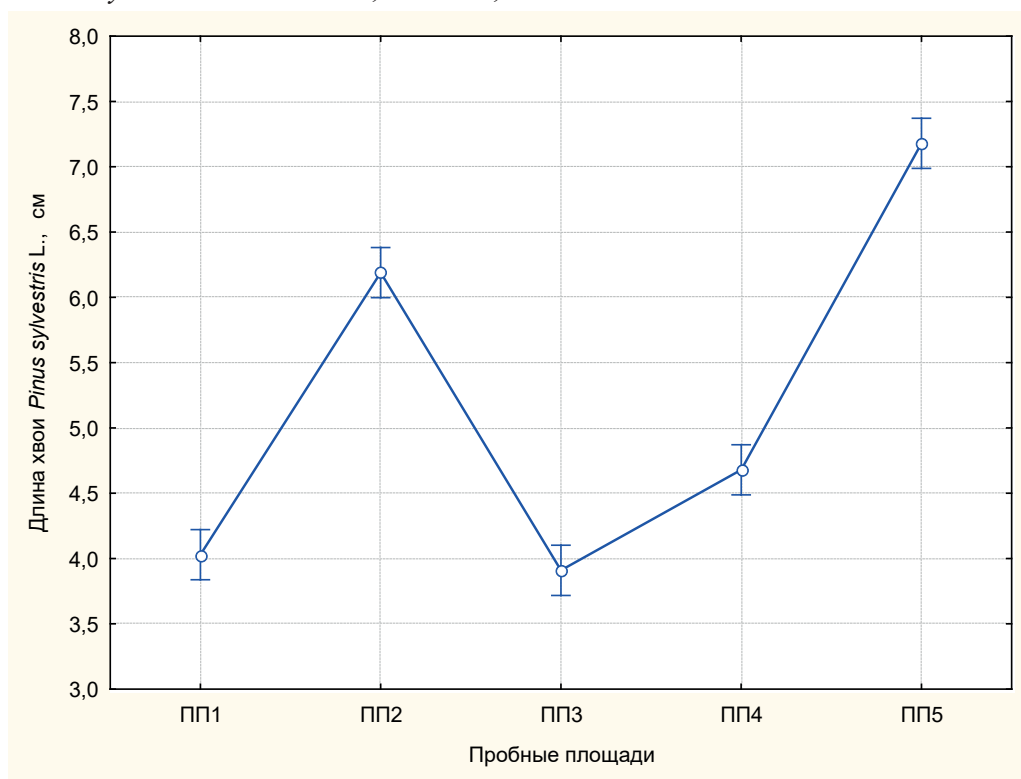


Рис. 2. Значения длины хвои *Pinus sylvestris* L. из различных мест произрастания г. Красноярска

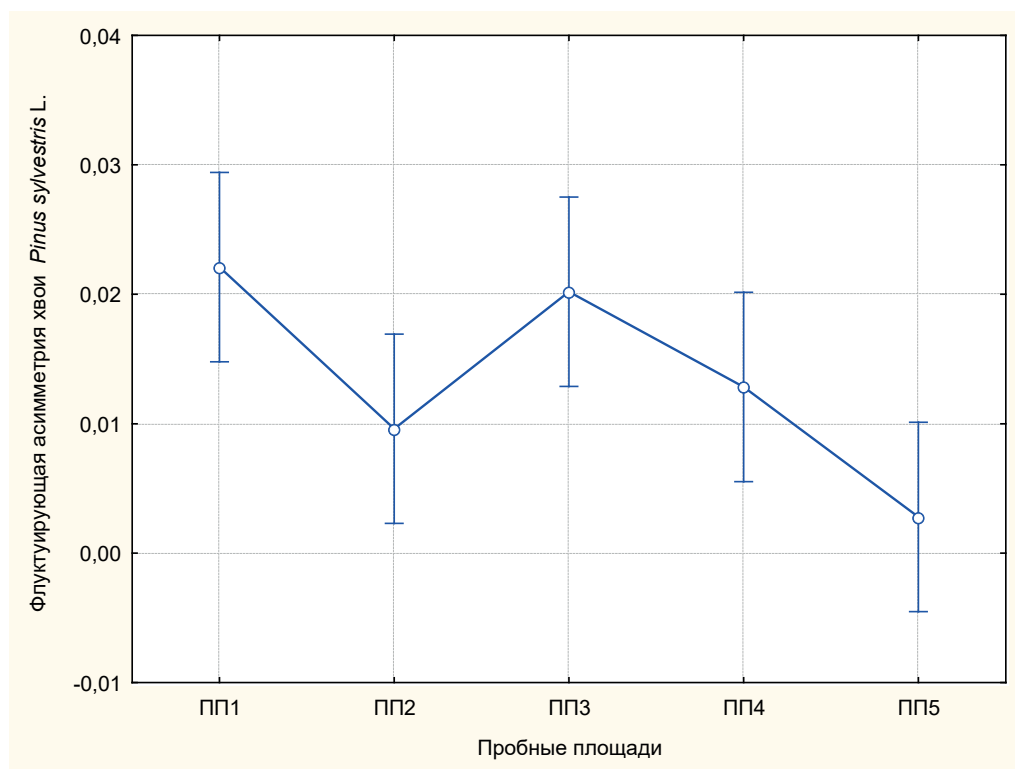


Рис. 3. Показатель ИФА длины хвои *Pinus sylvestris* L. из различных мест произрастания г. Красноярска

На контрольном участке (ПП5), который относится к природным лесным массивам Красноярского края, ИФА составил 0,0028, это существенно ниже, чем на пробных площадках г. Красноярска.

Воздействие неблагоприятных условий города отразилось ( $p < 0,001$ ) на морфологической структуре хвои *P. sylvestris* L. в виде повышения ИФА и снижения показателя длины хвои.

Дункан-тест выявил значимые различия ИФА между группами *Pinus sylvestris* L. участков ПП1, ПП3 и ПП5, ПП2 ( $p < 0,001$ ). ИФА *Pinus sylvestris* L. в разных районах Красноярска согласуются с данными химического анализа атмосферного воздуха на стационарных постах наблюдения, с химическим загрязнением почвенного покрова [5] и другими биоиндикационными показателями сосны обыкновенной [18; 19].

Загрязнение тяжелыми металлами почвенного покрова оказывает влияние на состояние древесной растительности, в том числе и хвойных растений. В популяциях *Pinus sylvestris* L., произрастающих в искусственных посадках Красноярска с высокой автотранспортной нагрузкой, негативное воздействие оказывается на морфометрические параметры хвои. Факторный анализ показывает, что изменение стабильности развития *Pinus sylvestris* L. связано с выбросами автотранспорта [18]. С этими выбросами в атмосферный воздух города поступают элементы-токсиканты: Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb в виде твердых частиц [3; 17; 21].

Расчет интегральных показателей концентрации ТМ в изученных пробах указывает на процессы их аккумуляции в почвенном покрове и в хвое сосны обыкновенной (рис. 4, 5). По всем изученным районам города интегральные показатели превышают контрольные значения. Так, суммарный показатель загрязнения почвенного покрова ( $Z_c$ ) для исследуемых площадок города в 3,7—7,2 раза превышает контрольные показатели. Наибольшее значение  $Z_c$  наблюдалось на ПП1.

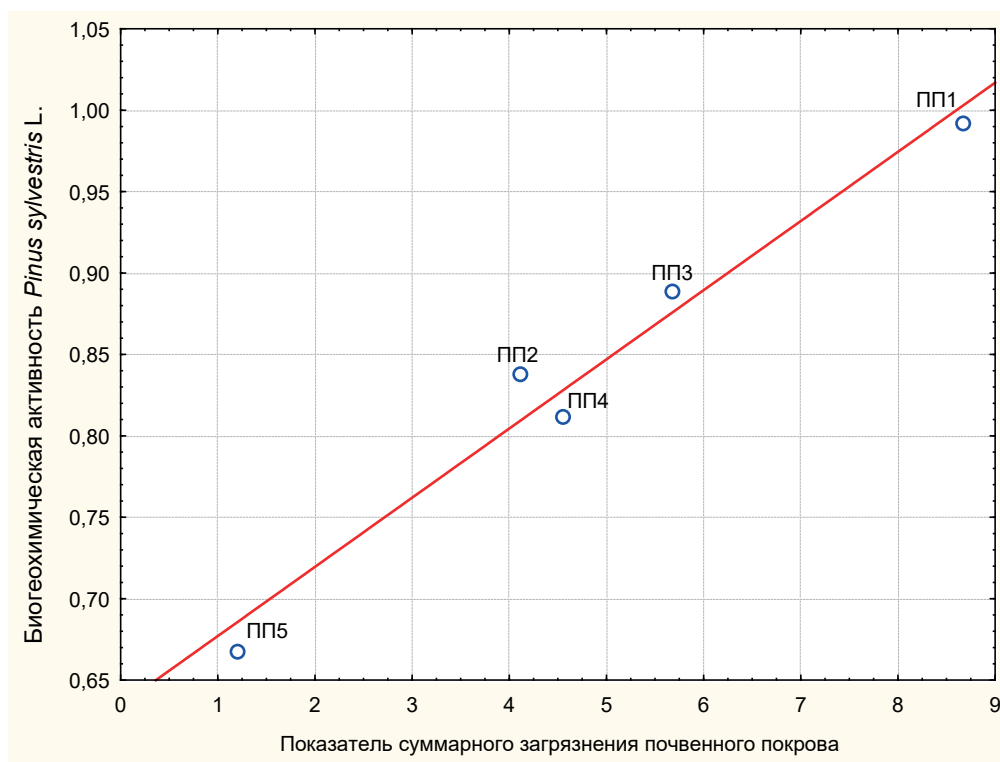
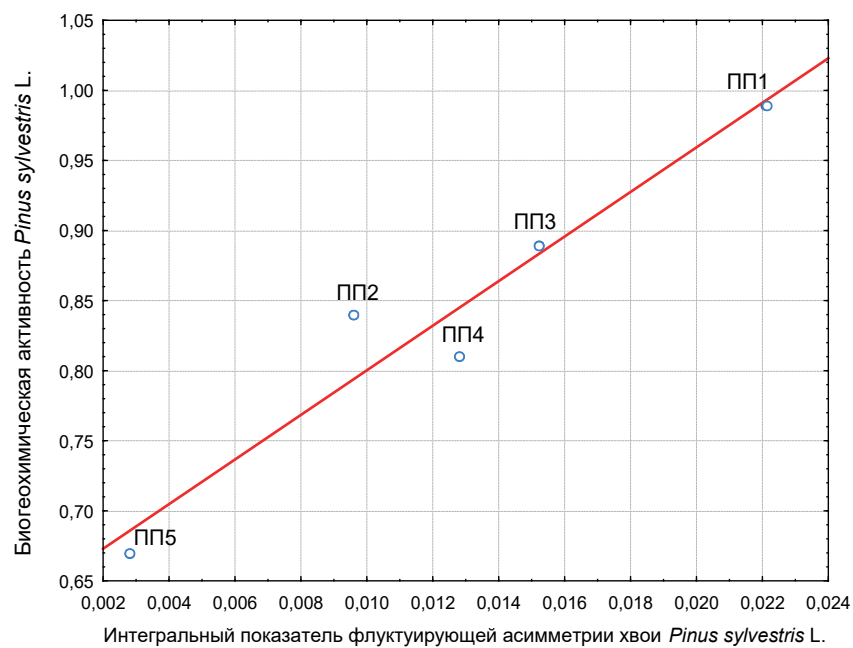
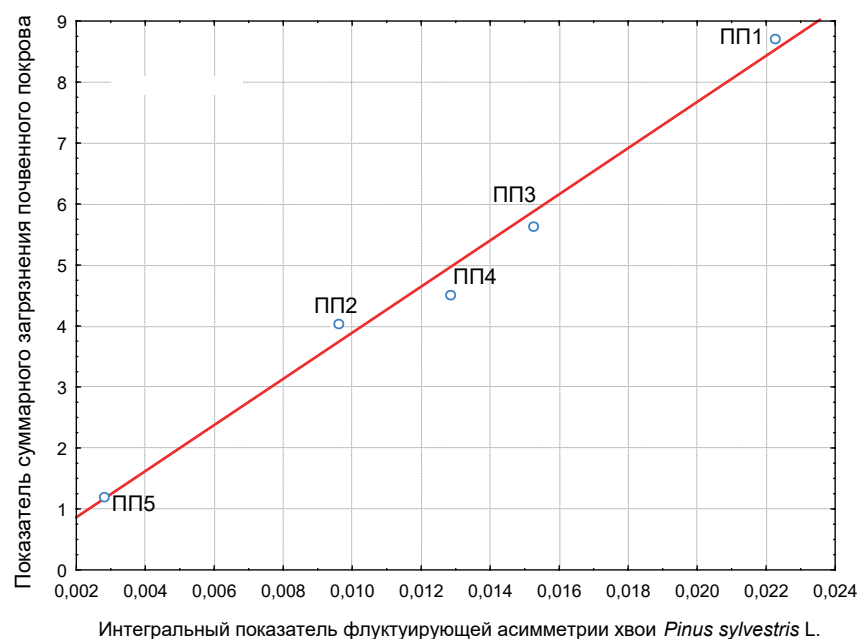


Рис. 4. Зависимость суммарного показателя загрязнения почвенного покрова ( $Z_c$ ) и биохимической активности (БХА) *P. sylvestris*



а



б

Рис. 5. Связь между БХА и ИФА хвои *Pinus sylvestris* L. ( $r = 0,97$ ) (а); между  $Z_c$  и ИФА хвои ( $r = 0,99$ ) (б)

Биогеохимическая активность *P. sylvestris* колебалась в пределах 0,67—0,99. На участках, находящихся под воздействием промышленности и автотранспорта (ПП1), наблюдались наибольшие значения БХА.

Повышенные показатели ИФА *P. sylvestris* города Красноярска можно объяснить высокой антропогенной нагрузкой. Для оценки антропогенного воздействия провели ранжирование транспортной, промышленной нагрузки, исходя из сведений о функциональной роли исследуемых участков города.

При ранжировании антропогенной нагрузки использовали следующие шкалы: автотранспортная — 1 балл, нагрузка отсутствует, природные лесные массивы; 2 — низкая

нагрузка, до 500 автомобилей/час; 3 — средняя нагрузка, до 1499 автомобилей/час; 4 — высокая нагрузка, свыше 1500 автомобилей/час; промышленная — 1 балл — в районе города мелкие предприятия пищевой промышленности; 2 — фармацевтические предприятия; 3 — котельные, ТЭЦ; 4 — металлургический завод.

Анализ корреляций показывает, что значение ИФА увеличивается по мере усиления антропогенной нагрузки, связанной с уровнем автотранспортной нагрузки ( $r = 0,63$ ), наличием промышленного объекта ( $r = 0,98$ ) (табл. 1). Величина ИФА имеет тесные положительные связи с интегральными показателями полиметаллического загрязнения системы «почва — растение» (БХА *P. sylvestris*,  $Z_c$  почвенного покрова), которое связано с высокой антропогенной нагрузкой (выбросами автотранспорта и промышленных объектов). Не выявлено статистически значимых корреляционных связей между ИФА и климатическими показателями — среднегодовой температурой, среднегодовыми осадками ( $p > 0,05$ ).

Похожие закономерности выявлены в работе [1] при статистической оценке взаимосвязи эколого-морфологических показателей *Betula pendula* Roth. Исследователи связывают состояние древостоя и асимметричность листьев, которые зависят от антропогенного воздействия, а также приходят к выводу, что климатические параметры не оказывают значимого влияния на ИФА [24].

Таблица 1

Матрица корреляций между исследуемыми показателями: ИФА, БХА,  $Z_c$ , антропогенной нагрузкой, климатическими данными

Показатель	БХА	$Z_c$	ИФА	Промышленная нагрузка	Автотранспортная нагрузка	Среднегодовая температура воздуха, °С	Сумма осадков за год, мм
БХА	1	0,98	0,97	0,92	0,60	0,15	0,23
$Z_c$	0,98	1	0,99	0,98	0,59	0,17	0,14
ИФА	0,97	0,99	1	0,98	0,63	0,11	0,29
Промышленная нагрузка	0,92	0,98	0,98	1	0,58	0,47	0,16
Автотранспортная нагрузка	0,60	0,59	0,63	0,58	1	0,22	0,09
Среднегодовая температура воздуха, °С	0,15	0,17	0,11	0,47	0,22	1	
Сумма осадков за год, мм	0,23	0,14	0,29	0,16	0,09		1

### Заключение

Уникальность Красноярской урбоэкосистемы определяется сочетанием комплекса факторов как природного, так и урбологического характера, который влияет на состояние насаждений *Pinus sylvestris* L.

В статье показано, что загрязнение почвенного покрова тяжелыми металлами непосредственно воздействует на биогеохимический состав, морфометрические показатели хвои, ФА хвои *Pinus sylvestris* городской среды. Близкое расположение пробной площади ПП1 к алюминиевому заводу обуславливает большее негативное влияние промышлен-

ного фактора в связи с преобладающим переносом выбросов. На исследуемых участках города на морфологические признаки хвои сосны обыкновенной оказывают влияние выхлопные газы от автотранспорта, выбросы предприятий, климатические факторы, что проявляется в снижении длины хвои и нарушении симметрии ее длины.

Положительная связь высокой силы между индексом ФА, индексом суммарного загрязнения почвы, биогеохимической активностью вида показывает, что увеличение уровня загрязнения урбосреды тяжелыми металлами приводит к увеличению индекса ФА хвои *P. sylvestris*.

Таким образом, индекс флуктуирующей асимметрии хвои *P. sylvestris* может быть использован для биоиндикации урбанизированной территории, для обнаружения полиметаллического загрязнения среды.

#### Список использованной литературы

1. Бугров С. В., Бугрова С. В. Статистическая оценка взаимосвязи эколого-морфологических показателей березы повислой (*Betula pendula* Roth) с условиями ее произрастания в городах Самарской области [Электронный ресурс] // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2020. № 3 (35). С. 17—29. URL: [http://vestospu.ru/archive/2020/articles/2\\_35\\_2020.pdf](http://vestospu.ru/archive/2020/articles/2_35_2020.pdf). DOI: 10.32516/2303-9922.2020.35.2.

2. Гигиенические нормативы 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Введ. 2006-01-04. М. : Изд-во стандартов, 2006. 11 с.

3. Голохваст К. С., Чернышев В. В., Угай С. М. Выбросы автотранспорта и экология человека (обзор литературы) // Экология человека. 2016. № 1. С. 9—14.

4. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М. : Стандартинформ, 2008. 8 с.

5. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2019 году». Красноярск, 2020. 310 с.

6. Добровольский В. В. Основы биогеохимии : учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М. : Академия, 2003. 400 с.

7. Захаров В. М., Шадрин Е. Г., Турмухаметова Н. В., Иванцова Е. Н., Шикалова Е. А., Солдатова В. Ю., Шарова Н. А., Трофимов И. Е. Оценка состояния растений по стабильности развития в естественных и антропогенных условиях (флуктуирующая асимметрия признаков листа березы повислой *Betula pendula* Roth) // Известия Российской академии наук. Сер. биологическая. 2020. № 2. С. 191—196. DOI: 10.31857/S0002332920020113.

8. Ибрагимова Э. Э., Бандак И. В., Дрозд А. С. Флуктуирующая асимметрия листьев *Morus alba* L. как биоиндикатор аэротехногенного загрязнения урбозкосистем // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Сер. Биология, химия. 2011. Т. 24 (63), № 2. С. 129—135.

9. Ковылина О. П., Зарубина И. А., Ковылин А. Н. Оценка жизненного состояния сосны обыкновенной в зоне техногенного загрязнения // Хвойные бореальной зоны. 2008. № 3. С. 284—289.

10. Лебедев Н. А., Коротченко И. С., Первышина Г. Г., Кондратюк Т. А., Байкалов П. С. Стабильность развития древесных растений, произрастающих вблизи АО «Назаровская ГРЭС» // Уголь. 2020. № 4. С. 58—61. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-4-58-61.

11. Миронова А. С., Рихванов Л. П., Барановская Н. В., Судыко А. Ф. Годовые кольца сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) — индикатор геохимической обстановки и хронологического изменения химического элементного состава окружающей среды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 1. С. 106—116. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2452.

12. Мучкина Е. Я., Бадмаева С. Э., Коротченко И. С., Горлушкина К. С. Анализ распределения подвижных форм тяжелых металлов в почвенном покрове промышленно урбанизированной территории г. Красноярска // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 4. С. 66—71. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-4-66-71.

13. Овечкина Е. С., Шаяхметова Р. И. Влияние антропогенных факторов на содержание пигментов сосны обыкновенной в летне-зимний период на территории Нижнеартовского района // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, № 6. С. 236—241.



14. Осипенко Р. А., Осипенко А. Е. Флуктуирующая асимметрия хвои сосны обыкновенной как индикатор загрязнения окружающей среды горнодобывающим предприятием // Леса России и хозяйство в них. 2018. № 4. С. 30—37.
15. Придача В. Б., Сазонова Т. А., Таланова Т. Ю., Ольчев А. В. Морфофизиологическая реакция *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. при техногенном воздействии в условиях северо-запада России // Экология. 2011. № 1. С. 25—33.
16. 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 // Сибирский лесной журнал. 2016. № 3. С. 46—56. DOI: 10.15372/SJFS20160305.
17. Хлебопрос Р. Г., Тасейко О. В., Иванова Ю. Д., Михайлюта С. В. Красноярск. Экологические очерки. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2012. 130 с.
18. Korotchenko I. S., Alekseeva A. N., Pervyshina G. G., Medvedeva V. A., Baykalova T. V. Assessment of the state of the urboecosystem by integral indicators of pine and soil cover // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. Vol. 421, N 8. DOI: 10.1088/1755-1315/421/8/082006.
19. Korotchenko I. S., Pervyshina G. G., Romanova O. V., Alekseeva A. N., Medvedeva V. A. Features of the development stability of tree plantations of large city industrial zones // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 315, N 2. DOI: 10.1088/1755-1315/315/2/022012.
20. Kozlov M. V., Niemelä P. Difference in needle length — a new and objective indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) // Water, Air and Soil pollution. 1999. Vol. 116. P. 365—370.
21. Mills N. L., Miller M. R., Lucking A. J., Beveridge J., Flint L., Boere A. J. F., Fokkens P. H., Boon N. A., Sandstrom Th., Blomberg A., Duffin R., Donaldson K., Hadoke P. W. F., Cassee F. R., Newby D. E. Combustion-derived nanoparticulate induces the adverse vascular effects of diesel exhaust inhalation // European Heart Journal. 2011. Vol. 32, N 21. P. 2660—2671. DOI: 10.1093/eurheartj/ehr195.
22. Moller A. P., Swaddle J. P. Asymmetry, developmental stability, and evolution. Oxford : Oxford University Press, 1997. 291 p.
23. Palmer A. R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry: measurement, analysis, patterns // Annual Review of Ecology and Systematics. 1986. Vol. 17. P. 391—421. DOI: 10.1146/annurev.es.17.110186.002135.
24. Pukacki P. M. Effects of sulphur, fluoride and heavy metal pollution on the chlorophyll fluorescence of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles // Dendrobiology. 2000. Vol. 45. P. 83—88.
25. Shadrina E., Turmukhametova N., Soldatova V., Vol'pert, Y., Korotchenko I., Pervyshina G. Fluctuating asymmetry in morphological characteristics of *Betula pendula* Roth leaf under conditions of urban ecosystems: evaluation of the multi-factor negative impact // Symmetry. 2020. Vol. 12, N 8. DOI: 10.3390/sym12081317.

Поступила в редакцию 01.03.2021

**Коротченко Ирина Сергеевна**, кандидат биологических наук, доцент  
Красноярский государственный аграрный университет  
Российская Федерация, 660049, Красноярск, пр-т Мира, 90  
E-mail: [kisaspi@mail.ru](mailto:kisaspi@mail.ru)  
ORCID: 0000-0002-9099-9537

**Алексеева Анастасия Николаевна**, аспирант  
Красноярский государственный аграрный университет  
Российская Федерация, 660049, Красноярск, пр-т Мира, 90  
E-mail: [shkolalesa@yandex.ru](mailto:shkolalesa@yandex.ru)  
ORCID: 0000-0002-9366-6084

UDC 574.21:57.022(571.51)

I. S. Korotchenko

A. N. Alekseeva

**Fluctuating asymmetry of needles of *Pinus sylvestris* L. as a bioindication mark of environmental pollution in the city of Krasnoyarsk**

This article provides an assessment of the index variability of fluctuating asymmetry (FA) of the needles of Scots pine trees (*P. sylvestris* L.) growing in a large industrial Siberian city of Krasnoyarsk. Correlation, regression and factor analyzes have been carried out. It was found that in the test plots of the city, the FA index of *P. sylvestris* needles was statistically significantly higher than in the natural biotope of the same region. The FA index of *P. sylvestris* needles has a significant correlation with the index of total soil pollution, the biogeochemical activity of *P. sylvestris*, and the level of motor transport and industrial load of the test plot. Thus, the FA index of *P. sylvestris* needles can be used as an additional criterion in bioindication assessment of the environmental quality of an industrial city.

**Key words:** Scots pine, pollution, industrial city of Krasnoyarsk, soil cover, fluctuating asymmetry, anthropogenic impact, heavy metals.

**Korotchenko Irina Sergeevna**, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor  
Krasnoyarsk State Agrarian University  
Russian Federation, 660049, Krasnoyarsk, Prospect Mira, 90  
E-mail: [kisaspi@mail.ru](mailto:kisaspi@mail.ru)  
ORCID: 0000-0002-9099-9537

**Alekseeva Anastasia Nikolaevna**, Postgraduate student  
Krasnoyarsk State Agrarian University  
Russian Federation, 660049, Krasnoyarsk, Prospect Mira, 90  
E-mail: [shkolalesa@yandex.ru](mailto:shkolalesa@yandex.ru)  
ORCID: 0000-0002-9366-6084

**References**

1. Bugrov S. V., Bugrova S. V. Statisticheskaya otsenka vzaimosvyazi ekologo-morfologicheskikh pokazatelei berezy povisloi (*Betula pendula* Roth) s usloviyami ee proizrastaniya v gorodakh Samarskoi oblasti [Statistical assessment of the correlation between growth conditions of *Betula pendula* Roth and its ecological and morphological parameters in the cities of the Samara region]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Elektronnyi nauchnyi zhurnal — Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal*, 2020, no. 3 (35), pp. 17—29. Available at: [http://vestospu.ru/archive/2020/articles/2\\_35\\_2020.pdf](http://vestospu.ru/archive/2020/articles/2_35_2020.pdf). DOI: 10.32516/2303-9922.2020.35.2. (In Russian)
2. *Gigienicheskie normativy 2.1.7.2041-06. Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve. Vved. 2006-01-04* [Hygienic standards 2.1.7.2041-06. Maximum permissible concentration (MPC) of chemicals in the soil. Enter. 2006-01-04]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2006. 11 p. (In Russian)
3. Golokhvast K. S., Chernyshev V. V., Ugai S. M. Vybrosy avtotransporta i ekologiya cheloveka (obzor literatury) [Car exhausts and human ecology (Literature review)]. *Ekologiya cheloveka — Human Ecology*, 2016, no. 1, pp. 9—14. (In Russian)
4. *GOST 17.4.4.02-84. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza* [GOST 17.4.4.02-84. Protection of Nature. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 8 p. (In Russian)
5. *Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i okhrane okruzhayushchei sredy v Krasnoyarskom krae v 2019 godu"* [State report "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk territory in 2019"]. Krasnoyarsk, 2020. 310 p. (In Russian)
6. Dobrovolskii V. V. *Osnovy biogeokhimii* [Basics of biogeochemistry]. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 400 p. (In Russian)

7. Zakharov V. M., Shadrina E. G., Turmukhametova N. V., Ivantsova E. N., Shikalova E. A., Soldatova V. Yu., Sharova N. A., Trofimov I. E. Otsenka sostoyaniya rastenii po stabil'nosti razvitiya v estestvennykh i antropogennykh usloviyakh (fluktuiruyushchaya asimmetriya priznakov lista berezy povisloi Betula pendula Roth) [Assessment of plant status by stability of development in natural and anthropogenic conditions (fluctuating asymmetry of leaf characters of Silver birch, *Betula pendula* Roth)]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. biologicheskaya*, 2020, no. 2, pp. 191—196. DOI: 10.31857/S0002332920020113. (In Russian)
8. Ibragimova E. E., Bandak I. V., Drozd A. S. Fluktuiruyushchaya asimmetriya list'ev Morus alba L. kak bioindikator aerotekhnogenogo zagryazneniya urboekosistem [Fluctuating asymmetry of *Morus alba* L. leaves as a bioindicator of aerotechnogenic pollution of urban ecosystems]. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Ser. Biologiya, khimiya*, 2011, vol. 24 (63), no. 2, pp. 129—135. (In Russian)
9. Kovylyina O. P., Zarubina I. A., Kovylin A. N. Otsenka zhiznennogo sostoyaniya sosny obyknovnoy v zone tekhnogenogo zagryazneniya [Assessment of the vital state of Scots pine in the zone of technogenic pollution]. *Khvoynye boreal'noi zony*, 2008, no. 3, pp. 284—289. (In Russian)
10. Lebedev N. A., Korotchenko I. S., Pervyshina G. G., Kondratyuk T. A., Baikalov P. S. Stabil'nost' razvitiya drevesnykh rastenii, proizrastayushchikh vblizi AO "Nazarovskaya GRES" [Stability of development of woody plants growing near Nazarovsky GRES]. *Ugol' — Russian Coal Journal*, 2020, no. 4, pp. 58—61. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-4-58-61. (In Russian)
11. Mironova A. S., Rikhvanov L. P., Baranovskaya N. V., Sudyko A. F. Godovye kol'tsa sosny obyknovnoy (*Pinus sylvestris* L.) — indikator geokhimicheskoi obstanovki i khronologicheskogo izmeneniya khimicheskogo elementnogo sostava okruzhayushchei sredy [Annual rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is the indicator of geochemical conditions and chronological changes in chemical elemental composition of the environment]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 106—116. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2452. (In Russian)
12. Muchkina E. Ya., Badmaeva S. E., Korotchenko I. S., Gorlushkina K. S. Analiz raspredeleniya podvizhnykh form tyazhelykh metallov v pochvennom pokrove promyshlenno urbanizirovannoi territorii g. Krasnoyarska [Assessment of heavy metals distribution in soil cover of industry-urban area of Krasnoyarsk]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii — Ecology and Industry of Russia*, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 66—71. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-4-66-71. (In Russian)
13. Ovechkina E. S., Shayakhmetova R. I. Vliyanie antropogennykh faktorov na sodержanie pigmentov sosny obyknovnoy v letne-zimnii period na territorii Nizhnevartovskogo raiona [Influence of anthropogenic factors on the pigments content of Scots pine in summer-winter period on the territory of Nizhnevartovsk region]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 17, no. 6, pp. 236—241. (In Russian)
14. Osipenko R. A., Osipenko A. E. Fluktuiruyushchaya asimmetriya khvoi sosny obyknovnoy kak indikator zagryazneniya okruzhayushchei sredy gornodobyvayushchim predpriyatiem [Common pine needles fluctuating asymmetry as indicator of environment pollution by mining enterprises]. *Les Rossii i khozyaistvo v nikh*, 2018, no. 4, pp. 30—37. (In Russian)
15. Pridacha V. B., Sazonova T. A., Talanova T. Yu., Ol'chev A. V. Morfofiziologicheskaya reaktsiya *Pinus sylvestris* L. i *Picea obovata* Ledeb. pri tekhnogenom vozdeistvii v usloviyakh severo-zapada Rossii [Morphophysiological responses of *Pinus sylvestris* L. and *Picea obovata* Ledeb. to industrial pollution under conditions of north-western Russia]. *Ekologiya*, 2011, no. 1, pp. 25—33. (In Russian)
16. Skripal'shchikova L. N., Dneprovskii I. A., Stasova V. V., Plyashechnik M. A., Greshilova N. V., Kalugina O. V. Morfologo-anatomicheskie osobennosti khvoi sosny obyknovnoy pod vliyaniem promyshlennykh vybrosov goroda Krasnoyarska [Morphological and anatomical characteristics of Scots pine needles under industrial pollution impact of Krasnoyarsk City]. *Sibirskii lesnoi zhurnal — Siberian Journal of Forest Science*, 2016, no. 3, pp. 46—56. DOI: 10.15372/SJFS20160305. (In Russian)
17. Khlebopros R. G., Taseiko O. V., Ivanova Yu. D., Mikhailyuta S. V. *Krasnoyarsk. Ekologicheskie ocherki* [Krasnoyarsk. Environmental essays]. Krasnoyarsk, Sibirskii federal'nyi universitet Publ., 2012. 130 p. (In Russian)
18. Korotchenko I. S., Alekseeva A. N., Pervyshina G. G., Medvedeva V. A., Baykalova T. V. Assessment of the state of the urboecosystem by integral indicators of pine and soil cover. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 421, no. 8. DOI: 10.1088/1755-1315/421/8/082006.
19. Korotchenko I. S., Pervyshina G. G., Romanova O. V., Alekseeva A. N., Medvedeva V. A. Features of the development stability of tree plantations of large city industrial zones. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 315, no. 2. DOI: 10.1088/1755-1315/315/2/022012.
20. Kozlov M. V., Niemelä P. Difference in needle length — a new and objective indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Water, Air and Soil pollution*, 1999, vol. 116, pp. 365—370.

21. Mills N. L., Miller M. R., Lucking A. J., Beveridge J., Flint L., Boere A. J. F., Fokkens P. H., Boon N. A., Sandstrom Th., Blomberg A., Duffin R., Donaldson K., Hadoke P. W. F., Cassee F. R., Newby D. E. Combustion-derived nanoparticulate induces the adverse vascular effects of diesel exhaust inhalation. *European Heart Journal*, 2011, vol. 32, no. 21, pp. 2660—2671. DOI: 10.1093/eurheartj/ehr195.
22. Moller A. P., Swaddle J. P. *Asymmetry, developmental stability, and evolution*. Oxford, Oxford University Press, 1997. 291 p.
23. Palmer A. R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry: measurement, analysis, patterns. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1986, vol. 17, pp. 391—421. DOI: 10.1146/annurev.es.17.110186.002135.
24. Pukacki P. M. Effects of sulphur, fluoride and heavy metal pollution on the chlorophyll fluorescence of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles. *Dendrobiology*, 2000, vol. 45, pp. 83—88.
25. Shadrina E., Turmukhametova N., Soldatova V., Vol'pert, Y., Korotchenko I., Pervyshina G. Fluctuating asymmetry in morphological characteristics of *Betula pendula* Roth leaf under conditions of urban ecosystems: evaluation of the multi-factor negative impact. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 8. DOI: 10.3390/sym1208131.7.