

DOI: 10.31509/2658-607x-202473-152
УДК 574.24

ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ АСИММЕТРИИ ЛИСТЬЕВ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВЬЕВ В УСЛОВИЯХ АВТОТРАНСПОРТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© 2024

Н. Ю. Кулакова^{1*}, И. Н. Курганова²

¹Институт лесоведения РАН, Россия, 143030 Московская обл.,
с. Успенское, ул. Советская 21

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ФИЦ ПНЦБИ РАН, Россия, 142290, Пущино, ул. Институтская, д.2, к.2

*E-mail: nkulakova@mail.ru

Поступила в редакцию: 14.08.2024 г.

После рецензирования: 14.09.2024

Принята к печати: 22.09.2024

Исследовались взаимосвязи между показателями флуктуирующей асимметрии (ПФА) листьев дуба черешчатого и санитарным состоянием деревьев, концентрацией Mg, P, K, Ca, Fe, Zn в листьях; Mg, P, K, Ca, Fe, Cu, Zn, Pb – в ветвях и Na, Mg, P, K, Ca, Fe, Cu, Zn, Pb – в почве под кронами деревьев. Обследовано 28 деревьев, произрастающих в условиях с разным уровнем загрязнения (10–30 м от МКАД и лесопарк Узкое, г. Москва). В полной выборке деревьев обнаружены значимые положительные корреляции между ПФА листьев и концентрацией в них Ca, Zn, S, Fe, а также между ПФА листьев и концентрацией Ca, Cu, Na, Fe, Zn в почвах. Отрицательные зависимости выявлены между ПФА листьев, концентрацией P в ветвях и жизненным состоянием деревьев. В случае небольших выборок (n = 10) наличие корреляционных связей между ПФА листьев и жизненным состоянием деревьев отмечено только в группе деревьев ослабленного жизненного состояния.

Ключевые слова: автотранспортные загрязнители, биодиагностика, жизненное состояние деревьев, мучнистая роса, дубовые насаждения

Ухудшение состояния городских насаждений, наблюдаемое в последнее де-

сятилетие, в первую очередь, связано с усилением автотранспортного загряз-

нения, основного источника поллютантов в крупных городах. Так в Москве вблизи автотрасс зафиксированы максимальные концентрации основных загрязняющих веществ (Доклад ..., 2023). Поллютанты аккумулируются в почве у автомагистралей и в тканях произрастающих здесь растений. В современной литературе обсуждается возможность оценки стрессового состояния растений из-за воздействия на них поллютантов с помощью показателей флуктуирующей асимметрии (ФА) организмов – направленных отклонений от их симметричного развития (Захаров и др., 2000, Gavrikov et al., 2023). Есть мнение, что использование неспецифичных показателей ФА (ПФА) в биодиагностике загрязнения экосистем недостаточно обосновано, и это связано, в первую очередь, с многофакторным влиянием окружающей среды. Установлено, что уровень ФА повышается в ответ на воздействие большинства абиотических и биотических факторов (Лайус и др., 2009), в частности, не только по причине загрязнения и засоления почв, но из-за засух, переувлажнения, конкурентных взаимоотношений, повреждения филлофагами (Кравец и др., 2007; Cornelissen, Stiling, 2011; Alves-Silva, Del-Claro, 2016). К некорректным выводам при использова-

нии ФА может привести несовершенство применяемых методов измерения, влияние на ФА генетической структуры популяции (Козлов, 2017). Этот же исследователь с соавторами считает невозможным использование какого-либо параметра ФА, т.к. «до сих пор не существует теоретической модели, позволяющей предсказать, изменится ли ФА в определенном признаке данного вида в ответ на определенный экологический стрессор» (Gavrikov et al., 2023). Вместе с тем, для обследования городских и индустриальных ландшафтов в нашей стране широко применяется анализ ФА листьев растений (Константинов, 2001; Федорова, 2013; Полонский, Полякова, 2016; Назарова, 2019), при этом используется комплексный (интегральный) показатель ФА (Захаров и др., 2000).

Одним из важных факторов, влияющих на стабильность развития деревьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), широко использующегося в городском озеленении, может оказаться инфицирование деревьев мучнистой росой (*Microsphaera alphitoides* Griff. et Maubl.). В листьях, пораженных грибом, разрушается хлорофилл, снижаются энергия фотосинтеза, содержание воды и т.д., что приводит к преждевременному

их засыханию (Федоров, 2004). Вполне возможно, что заселение листьев мучнистой росой и ПФА взаимосвязаны между собой. Так, в асимметричных листьях *Q. myrtifolia* и *Q. Geminata* обнаружены более высокое содержание азота (N) и более низкий уровень танинов, что способствует развитию этого грибкового заболевания (Cornelissen et al., 2004). Обильное поражение мучнистой росой может являться косвенным признаком деревьев, менее устойчивых к различным стрессовым ситуациям, и в значительной степени определяться индивидуальной и возрастной восприимчивостью деревьев дуба черешчатого к этим микроорганизмам (Полякова, Литвиненко, 2019; Полякова и др., 2019). Известно, что инфицирование дуба черешчатого мучнистой росой зависит также от климатических параметров и от доступности некоторых питательных элементов растениям (Man et al., 2012).

Основная цель работы состояла в анализе зависимостей между ПФА листьев дуба черешчатого и концентрацией поллютантов, К и Р в ветвях и листьях, в почве под кронами деревьев, жизненным состоянием деревьев, площадью поражения листьев дуба *Microsphaera alphitoides*. Зависимости

между жизненным состоянием деревьев и концентрациями поллютантов, К и Р в ветвях и листьях дуба черешчатого были рассмотрены в предыдущей работе (Кулакова и др., 2021).

Часто в работах, использующих ПФА, проводится сравнение участков по средним значениям ПФА и усредненным показателям загрязнения, что не дает возможности точно указать на влияние загрязнения, как на причину увеличения ФА. Поэтому нами определялись зависимости между ПФА, измеренными для листьев каждого дерева дуба черешчатого и концентрацией поллютантов, К и Р в ветвях и листьях этого дерева, в почвах под кронами деревьев, жизненным состоянием дерева. Использовали два показателя – интегральный и основанный только на одном измерении.

ОБЪЕКТЫ

Для исследования были выбраны деревья дуба черешчатого, растущие в пределах от 10 до 30 м от МКАД (Московская кольцевая автодорога, 55.59°, 37.53°) и в лесопарке Узкое (юго-западная часть г. Москвы, 55.62°, 37.52°). Площадка в лесопарке находилась на расстоянии более 100 м от крупной автомагистрали и около 4 км от первого участка. Деревья на участке у МКАД

принадлежали к двум возрастным группам: старовозрастные (более 100 лет) и молодые (самосев 15–20-ти летнего возраста); было выбрано 10 молодых и 10 старовозрастных деревьев. На территории лесопарка исследовали 8 деревьев 15–20 летнего возраста. Наличие 100-и более летних деревьев на двух участках указывало на то, что дубравы в прошлом составляли одно целое.

МЕТОДЫ

Отбор проб почвы проводили почвенным буром диаметром 8 см с глубин 0–10, 10–20, 20–40, 40–60, 60–80 и 80–100 см из 15 скважин на расстоянии не более 1.5 метров от исследуемого дерева. В загущенных лесах одна скважина могла характеризовать почвенные условия под двумя или тремя деревьями. Отбор листьев и ветвей для химического анализа осуществляли в начале июня. К этому периоду листья полностью сформировались. Свежие образцы листьев, отобранные для химического анализа, тщательно вытирали ватным тампоном, смоченным в дистиллированной воде, ветви обрабатывали влажной ватой и щетками. С каждого дерева отбиралось по 5 тонких ветвей (до 1.5 см в диаметре) с высоты 5–7 м по всей окружности кроны. Леса с молодыми деревьями в обоих случаях

были загущены, и их кроны находились в неблагоприятных условиях освещения по сравнению со старовозрастными деревьями. И у молодых, и у старовозрастных деревьев отобранные листья формировались в условиях затенения; у молодых – из-за загущенности насаждения, у старовозрастных – из-за положения в нижней части кроны. Листья для измерений ПФА и площади, занятой мучнистой росой, отбирали в начале августа. Перед проведением химических анализов почвенные образцы, листья и ветви измельчали до состояния пудры.

ФА листьев оценивали двумя способами. Первый заключался в вычислении интегрального показателя стабильности (ИПС) развития (Захаров и др., 2000), наиболее часто применяемом в отечественных исследованиях. С этой целью у каждого дерева дуба черешчатого отбирали десять листьев среднего размера. Свежесобранные листья сканировали (сканер Samsung Xpress M2070) и затем проводили линейные измерения с использованием программы PhotoM1.21 А. Черниговского. Образцы измерялись в случайном порядке. Измерения углов между жилками осуществляли с помощью транспортира. Для определения ФА оценивали следу-

ющие признаки: максимальная ширина левой (a_l) и правой (a_r) половины листа; длина второй от основания листа жилки второго порядка (b_l и b_r); расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка (c_l и c_r); расстояние между концами этих жилок (d_l и d_r); угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка (e_l и e_r). Для каждого признака вычисляли среднюю относительную величину асимметрии, для чего абсолютные значения разности идентичных показателей с левой и с правой сторон делили на их сумму. Затем вычисляли величину асимметрии для листа путем сложения полученных показателей для каждого признака и деления их на количество признаков. Для характеристики ФА листьев всего дерева вычисляли ИПС развития как среднее арифметическое из показателей ФА десяти листьев. Таким образом, чем более выражена была асимметричность листовых пластин, тем выше были значения показателей стабильности. Для второго способа оценки ФА использовали только показатель длины жилок (ПДЖ) второго порядка: $|b_l - b_r| / (b_l + b_r)$, так как он также часто применяется.

Поверхность листа, занятую мучнистой росой, измеряли с применением

сканирования (сканер Samsung Xpress M2070) и программы PhotoM1.21 А. Черниговского. Для дерева доля поверхности листьев, покрытой мучнистой росой (S_{mp}), вычислялась в процентах как среднее из измерений 10 листьев.

Оценка показателей жизненности дерева основывалась на признаках, включенных в лесохозяйственную шкалу категорий санитарного состояния (наличие усохших побегов, дефолиации листьев) и на классификации роста и развития крон дуба черешчатого (Каплина, Селочник, 2015). По состоянию жизненности деревья обследованных участков были разделены на три группы: 1 – критического, 2 – среднего и 3 – хорошего жизненного состояния. В первую группу попали деревья с узкой или зонтиковидной кроной, наличием сухих ветвей и побегов, составляющих от $1/3$ до $1/2$ части кроны, низкой облиствленностью крон. В эту группу вошли три молодых узкокронных и два старовозрастных дерева с зонтиковидной кроной на участке у МКАД. Во второй группе оказались деревья с небольшим количеством сухих ветвей (менее $1/3$ кроны) и лучшей облиствленностью кроны. Это были молодые деревья: одно узкокронное – из парка, пять деревьев с узкой кроной и три – с зонтиковидной, располо-

женные на участке вблизи МКАД. В третью группу с хорошим состоянием (отсутствие сухих ветвей, густые кроны) попали семь деревьев с зонтиковидной формой кроны из парка, шесть старовозрастных деревьев с раскидистой кроной и одно молодое дерево с зонтиковидной кроной – с участка у МКАД.

Химический анализ почвенных и растительных образцов. Выбор исследуемых элементов диктовался следующими причинами: концентрации тяжелых металлов и S служат показателями автотранспортного загрязнения; Na и Ca попадают в почву у автострад в результате применения антигололедных средств; антагонизм при поступлении в растения между элементами перечисленных групп и K, P и Mg способствует формированию дефицита последних в органах растений. Определение содержания Na, Mg, P, K, Ca, Fe, Cu, Zn, Pb в почвенных образцах и Mg, P, K, Ca, Fe, Zn, S в растительных образцах проводили рентгенфлуоресцентным методом (РФА) на Спектроскане МАКС-GV («НПО «СПЕКТРОН», Россия) в ЦКП ИФХиБПП РАН. Свинец и медь в растительных образцах определяли атомно-абсорбционным спектрометрическим методом на спектрометре МГА-915МД (ООО «Атомприбор», Россия). Значения pH почвен-

ных образцов измеряли в водной суспензии (соотношение почва : вода = 1 : 5) потенциометрически с электродами ЭСК-10601/7 (pH-метр-иономер «Эксперт-001», Россия).

Статистическая обработка данных. Нормальность распределения показателей (a_1 - a_r ; b_1 - b_r и т.д.) оценивали с помощью критерия Шапиро-Уилка. Критерием оценки направленной асимметрии в выборке являлось превышение коэффициентом асимметрии более чем в три раза стандартной ошибки асимметрии. В двух выборках, представляющих разность между замерами слева и справа ширины листа и длин жилок второго порядка, была обнаружена направленная асимметрия. При использовании данных таких выборок для расчета флуктуирующей асимметрии из значений промеров с левой (большей в нашем случае) стороны вычитали среднюю разность между промерами слева и справа (Зорина, Коросов, 2007). Тесноту связи между изучаемыми параметрами оценивали с помощью коэффициентов корреляции Кендалла (r_k), если одним из факторов был показатель жизненного состояния, и Спирмана (r_s) – во всех остальных случаях. В тексте рукописи и таблицах приведены средние значения выборок и их доверительные

интервалы (среднее \pm ДИ). Все статистические процедуры выполняли при уровне значимости $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Показатели флуктуирующей асимметрии листьев. Значения ИПС для всей

совокупности деревьев изменялись от 0.054 до 0.125. Среди трех групп деревьев (15-20 лет у МКАД, более 100 лет у МКАД и 15-20 лет в парке), наиболее высокие значения ИПС имели молодые деревья у МКАД (табл. 1), что должно свидетельствовать об их критическом состоянии.

Таблица 1. Средние значения ПФА и показатели жизненности в разных по возрасту и местоположению группах деревьев дуба черешчатого*

Показатель		МКАД, 100 лет	МКАД, 15-20 лет	лесопарк Узкое, 15-20 лет
ПФА	ИПС	0.082 \pm 0.007	0.088 \pm 0.011	0.068 \pm 0.006
	$ a_l - a_r / (a_l + a_r)$	0.060 \pm 0.015	0.078 \pm 0.014	0.058 \pm 0.010
	$b_l - b_r / (b_l + b_r)$	0.066 \pm 0.014	0.092 \pm 0.026	0.073 \pm 0.014
	$ c_l - c_r / (c_l + c_r)$	0.092 \pm 0.008	0.086 \pm 0.014	0.065 \pm 0.011
	$ d_l - d_r / (d_l + d_r)$	0.128 \pm 0.022	0.114 \pm 0.017	0.097 \pm 0.012
	$ e_l - e_r / (e_l + e_r)$	0.063 \pm 0.010	0.071 \pm 0.013	0.048 \pm 0.004
Баллы жизненности		2.4 \pm 0.6	1.8 \pm 0.4	2.9 \pm 0.2

*Показаны доверительные интервалы при $p \leq 0.05$

В группе деревьев в парке с высокими показателями жизненности зафиксированы самые низкие значения ИПС, которые близки к величинам ИПС, полученным для деревьев дуба черешчатого в зоне регулируемой рекреации национального парка «Орловское Полесье», составляющим 0.071–0.075 (Гераськина, 2009).

ПФА листьев, рассчитанные по измерениям одного признака (ширине листа, длине жилок и т.д.), в большинстве случаев демонстрировали те же закономерности, что и значения ИПС: в четырех случаях из пяти высокие показатели бы-

ли у деревьев в лесопарке, а наиболее низкие отмечались в трёх случаях из пяти – в группе молодых деревьев у МКАД.

Связи между ПФА и жизненным состоянием деревьев. Жизненное состояние деревьев наиболее заметно различалось в группах 15–20-летних деревьев: у МКАД средний балл жизненности был самым низким (1.8 балла), в парке, где загрязнение поллютантами минимальное, – самым высоким (2.9 балла). У старовозрастных деревьев рядом с МКАД жизненный балл составил 2.4 (табл. 1).

Значения ИПС для всей совокупности деревьев демонстрировали отрицательную значимую корреляцию ($r_k = -0.33$; $n = 28$) с показателями жизненного состояния. Другими словами, высоким показателям жизненного состояния дерева соответствовало наименьшее отклонение листьев от симметрии. В группе 15–20-летних деревьев у МКАД, характеризующихся критическими показателями жизненности, корреляция между баллами жизненности и ИПС была значимой ($r_k = -0.50$; $n = 10$), а в группах деревьев с более высокими жизненными показателями корреляция между этими параметрами отсутствовала. Зависи-

мости между показателями жизненности и ПДЖ также не обнаружены. Таким образом, корреляция между ИПС и показателями жизненности в небольших выборках проявилась только в группе деревьев с критически низким жизненным состоянием.

Связи между ПФА листьев и концентрацией в них поллютантов, К и Р. Концентрация тяжелых металлов в листьях деревьев разных групп значительно варьировала (рис. 1). Существенные различия наблюдались между деревьями в парке и двумя другими группами деревьев по содержанию Zn, Fe и Са.

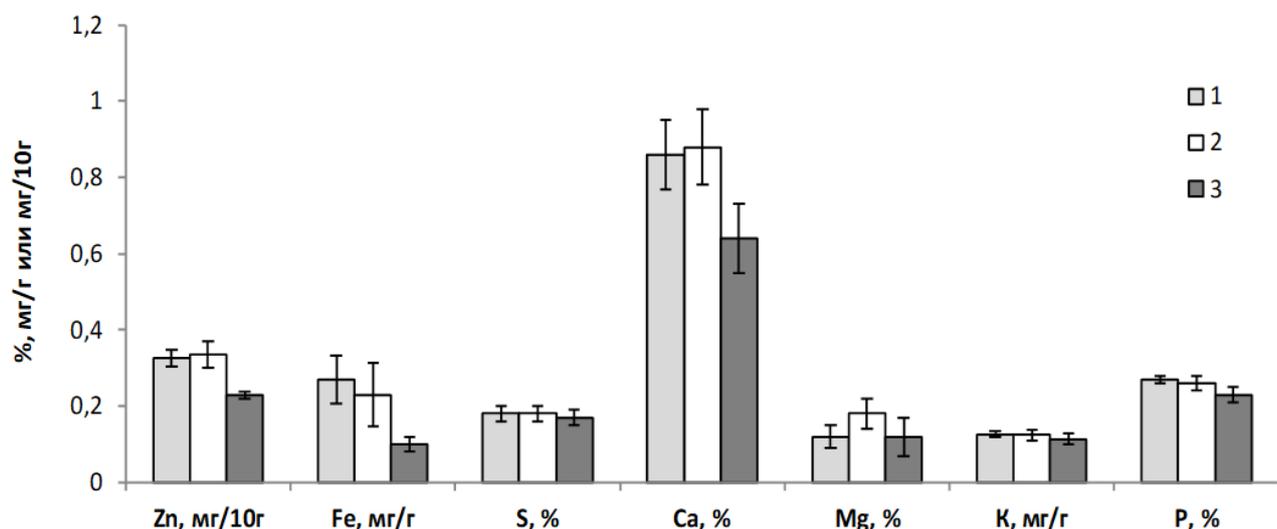


Рисунок 1. Концентрация элементов в листьях трех групп деревьев: 1 – МКАД, 100 лет; 2 – МКАД, 15–20 лет; 3 – лесопарк, 10–15 лет*

* – здесь и на других рисунках показаны доверительные интервалы при $p \leq 0.05$

В листьях всей совокупности деревьев отмечена значимая положи-

тельная корреляция ($r_c = 0.51$; 0.39 и 0.38 , $n = 28$) между ИПС и концентрацией

кальция, железа и серы. Увеличение концентраций этих элементов способствует развитию стресса у растений. Ведущий механизм воздействия ТМ на растения – инактивация белков и других макромолекул, выполняющих каталитические и регуляторные функции. Тяжелые металлы оказывают токсическое действие на такие процессы, как рост, развитие, фотосинтез, митоз, дыхание, поглощение воды, перенос электронов через мембраны и т.д. (Титов и др., 2014). Кальций, проявляющий антагонизм к калию при поступлении в растения (Павлов, 1999), отрицательно влияет на жизненное состояние растений в условиях дефицита калия. Оксиды серы, поступающие с выхлопными газами, способны вызывать ожоги листьев, некрозы тканей, воздействовать на фотосинтетические пигменты (Алыков, 2006). Однако внутри каждой из трех исследуемых групп деревьев аналогичные взаимосвязи наблюдались только в группе 15–20-летних деревьев у МКАД и только для серы ($r_c = 0.85$, $n = 10$), хотя её концентрация в листьях деревьев разных групп была близкой (рис. 1). Возможно, это связано с тем, что кроны молодых деревьев, растущих рядом с МКАД, расположены значительно ниже, чем кроны старовозрастных деревьев, и

фолиарное поглощение серы сопровождается более интенсивным, чем в других случаях, воздействием сопутствующих факторов, например, осаждением на листьях сажи.

В группе молодых деревьев в лесопарке и 100-летних деревьев у МКАД выявлена отрицательная зависимость между ИПС и концентрацией Zn в листьях ($r_c = -0,76$ и $-0,71$; $n = 10$). В листьях деревьев лесопарка концентрация Zn и значения ПДЖ демонстрировали тесную отрицательную зависимость ($r_c = -0,88$; $n = 8$). Содержание Zn в листьях деревьев этой группы было в 1.4 раза ниже, чем у деревьев у МКАД (22.9 ± 1.08 мг/кг), но приблизительно таким же, как в листьях деревьев в экологически чистых лесах Мещеры (20.1 ± 1 мг/кг) (Железнова и др., 2017). Вопрос, почему деревья лесопарка так реагировали на концентрацию цинка, содержание которого в листьях было достаточно высоким, остается пока не ясным.

В группе из 23 деревьев с хорошим и средним баллами жизненного состояния, произрастающих на разных участках, значимая корреляция отмечена между ИПС и концентрацией Fe ($r_c = 0.46$).

Таким образом, во всей совокупности деревьев имеют место значимые корреляции между ИПС и концентрацией

некоторых загрязнителей в листьях. Среди небольших выборок деревьев, объединенных в группы по таким признакам, как возраст, жизненное состояние, удаленность от МКАД, также отмечается зависимость ПФА от накопления или дефицита в листьях разных элементов. Не обнаружено значимых корреляций между концентрацией К и Р в листьях и величинами ИПС и ПДЖ исследуемых групп деревьев.

Связи между ПФА листьев и концентрацией загрязнителей, К и Р в ветвях. В связи с тем, что концентрация загрязнителей, К и Р в ветвях деревьев сильно варьировала, существенные различия наблюдались только по содержанию железа и серы между деревьями у МКАД и в лесопарке, а по содержанию кальция, калия и фосфора – между группами 15–20-летних деревьев у МКАД и в лесопарке (рис. 2).

Для всей совокупности деревьев, для деревьев в лесопарке и 100-летних деревьев у МКАД отсутствовали корреляции между ИПС и ПДЖ и концентрацией тяжелых металлов, Са, К и Р в ветвях. Положительная корреляция между ИПС и концентрацией свинца наблюдалась в группе 15–20-летних деревьев у МКАД ($r_c = 0.67$; $n = 10$). Токсичность Рb связана с нарушением процессов фотосинтеза, роста растений (Гиниятуллин, Кулагин, 1918). При этом концентрация свинца у молодых деревьев у МКАД была не выше, чем в других группах деревьев (рис. 2).

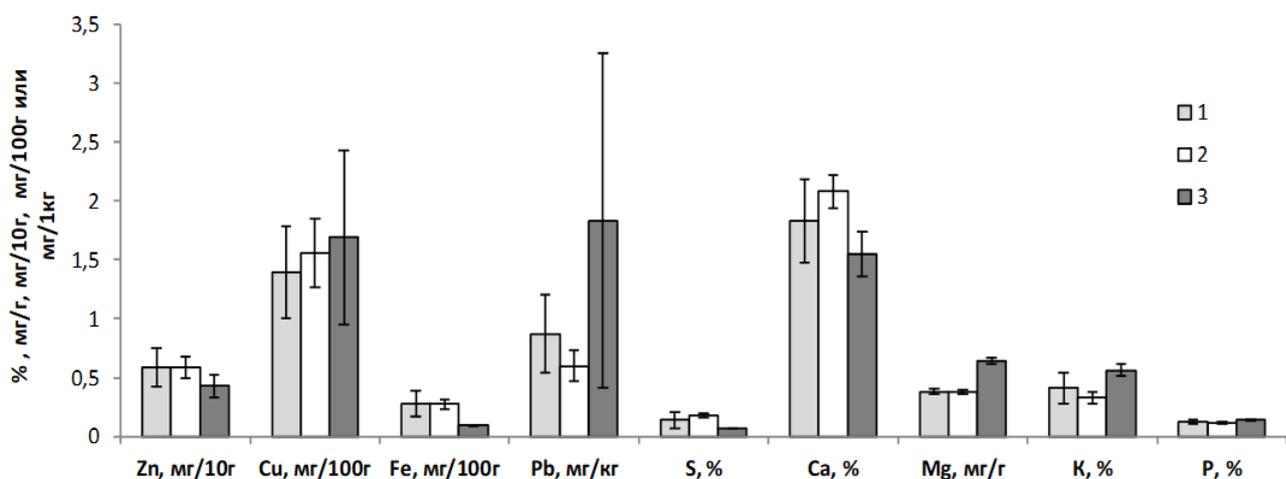


Рисунок 2. Концентрация элементов в ветвях трех групп деревьев: 1 – МКАД, более 100 лет; 2 – МКАД, 15-20 лет; 3 – лесопарк, 15-20 лет

Проявление зависимости ИПС от концентрации свинца в ветвях 15-20 летних деревьев у МКАД связано, очевидно, с общей ослабленностью этой группы растений.

Наблюдалась значимая отрицательная корреляционная зависимость между ИПС и ПДЖ и концентрацией Р в ветвях деревьев этой группы ($r_c = -0.85$ и -0.95 ; $n = 10$), ИПС и концентрацией Mg ($r_c = -0,70$; $n = 10$). Было высказано предположение

(Кулакова и др., 2021), что деревья дуба черешчатого в городских экосистемах, загрязненных тяжелыми металлами, Ca и Na, испытывают дефицит К и Р. Вероятно, это объясняется антагонистическим поглощением элементов растениями. Так, в ветвях исследованных деревьев наблюдалась отрицательная зависимость между содержанием в них К, Р и Mg и концентрацией железа, серы, кальция и цинка (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Спирмана между содержанием в ветвях дуба черешчатого К, Р и Mg и концентрацией поллютантов ($n = 28$)

	Zn	Fe	Ca	S	Pb	Cu
К	-0.50	-0.70	-0.61	-0.71	-0.39	-0.26
Mg	-0.03	-0.37	-0.40	-0.26	0.04	-0.17
Р	-0.31	-0.49	-0.54	-0.44	-0.28	-0.37

Примечание. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые при $p \leq 0.05$

Отношение содержания К и Р в ветвях деревьев к их содержанию в листьях положительно коррелировало с номером группы, характеризующим жизненное состояние деревьев ($r_k = 0.63$ и 0.70 соответственно; $n = 28$) Вероятно, этот факт связан с защитой ассимиляционного аппарата и поддержанием там определенных концентраций К и Р за счет уменьшения концентрации этих элементов в ветвях. Очевидно, дефицит Р, возникающий в условиях сильного

загрязнения, влияет на увеличение ФА листовых пластин молодых деревьев, находящихся в экстремальных условиях загрязнения.

Связи между ПФА и концентрацией поллютантов, К и Р в почве. В почве двух групп деревьев у МКАД различий в содержании исследуемых элементов не было (рис. 3). На участке у МКАД отмечено существенно более высокое содержание в почве Ca, Fe, Zn, Mg, Р, Cu, чем на участке в лесопарке.

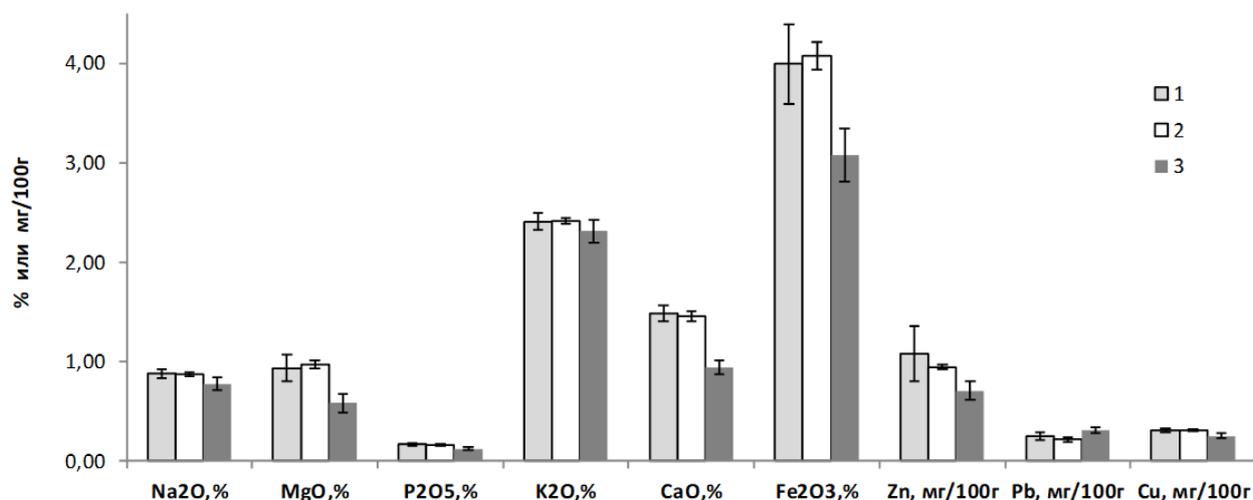


Рисунок 3. Концентрация поллютантов, К и Р в почве под разными группами деревьев: 1 – МКАД, 100 лет; 2– МКАД, 15-20 лет; 3– лесопарк, 15-20 лет

Выявлена положительная корреляция между ИПС и концентрацией общего фосфора в почве на глубине 10-20 см и магния на глубине 0–10 см (табл. 3). По-видимому, это обусловлено образованием малорастворимых и труднодоступных растениям фосфатов кальция и магния. Значения ИПС также

демонстрировали положительную корреляцию с концентрацией Ca, Zn, Cu, Na и Fe в слое почвы 0–10 см (табл. 3). Корреляционные связи между ИПС и содержанием поллютантов в более глубоких слоях почвы отсутствовали. Не обнаружено зависимостей между ПДЖ и концентрацией элементов в почве.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Спирмана между ИПС и содержанием элементов в почве

Слой, см	Na	Mg	P	K	Ca	Fe	Cu	Zn	Pb
0–10	0.42*	0.47	0.34	0.09	0.61	0.41	0.43	0.53	-0.16
10–20	0.04	0.16	0.49	-0.16	0.52	0.14	0.08	0.24	-0.06

Примечание. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые при $p \leq 0.05$

Накоплению поллютантов в верхних слоях почвы способствует щелочная реакция среды. Применение антигололедных реагентов, содержащих преимущественно хлориды Ca и Na (Кулакова,

Шабанова, 2019), привело к увеличению значений pH в почве у МКАД относительно почвы в лесопарке: в слое 0–10 см значения pH составляли соответственно 7.48 ± 0.23 и 6.25 ± 0.08 . Для всех обследо-

ванных деревьев выявлена положительная корреляция между ИПС и значениями рН верхних горизонтов почвы ($r_c = 0.62$ и 0.41 , на глубинах 0-10 и 10-20 см, соответственно), а в группе молодых деревьев у МКАД – между значениями ИПС и рН на глубине 0-10 см ($r_c = 0.62$, $n = 10$).

Связь ПФА листьев и Smr. В условиях загрязнения воздуха окислами азота, входящими в состав автотранспортных выбросов, расстояние дерева от магистрали оказывало заметное влияние на увеличение инфицирования *Microspora alphitoides* Griff. et Maubl. Величина Smr у деревьев в лесопарке ($14.4 \pm 7.4\%$), существенно отличалась от этого показателя у 100-летних и 15-20-летних деревьев рядом с МКАД (47.3 ± 14.3 и $64.6 \pm 15.3\%$, соответственно). Выявлена положительная корреляция значений Smr с расстоянием деревьев от дороги на участке у МКАД ($r = 0.48$, $n = 20$). При этом баллы жизненного состояния деревьев у МКАД не зависели от расстояния от магистрали.

Значимая положительная корреляция выявлена между ИПС и Smr ($r_c = 0.49$) для совокупной выборки из 28 деревьев и для группы 15-20-летних деревьев парка ($r_c = 0.78$). В других группах такая связь отсутствовала.

Очевидно, в группах деревьев у МКАД автотранспортные поллютанты оказывали более сильное влияние на ПФА, чем инфицирование листьев мучнистой росой.

Связь между Smr и концентрацией поллютантов, К и Р в листьях и ветвях дуба черешчатого. Анализ зависимости Smr от концентрации поллютантов, К и Р в листьях показал значимое положительное влияние высоких концентраций Zn, Fe и Ca ($r_c = 0.60$, 0.50 и 0.39 ; $n = 28$) на инфицирование грибом для всей совокупности деревьев и низкой концентрации К в листьях – в группе 15-20-летних деревьев у МКАД ($r_c = -0.71$; $n = 10$).

На активность заражения мучнистой росой оказывало влияние общее ослабление деревьев. Во всей совокупности деревьев отмечалась значимая отрицательная корреляция между Smr и баллами жизненности деревьев ($r_k = -0.48$; $n = 28$). Внутри отдельных групп деревьев значимых корреляций между этими показателями не обнаружено. Жизненное состояние деревьев было связано обратной зависимостью с концентрацией в ветвях Fe, S, Ca, Zn и прямой – с концентрацией К и Р (табл. 4). Видимо поэтому, значения Smr связаны с концентрацией этих элементов в ветвях (табл. 4).

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между жизненным состоянием деревьев (r_k), S_{mp} (r_c) и концентрацией элементов в ветвях деревьев

	Zn, ppm	Fe, ppm	Ca, %	K, %	S, %	Mg, %	P, %	Pb	Cu
r_k	-0.31 *	-0.54	-0.58	0.60	-0.58	0.29	0.58	-0.32	-0.34
r_c	0.58	0.73	0.53	-0.54	0.74	-0.06	-0.37	0.21	0.06

Примечание. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, значимые при $p \leq 0.05$

ВЫВОДЫ

1. При исследовании деревьев дуба черешчатого в условиях автотранспортного загрязнения обнаружены положительные корреляции значений ИПС с концентрацией Ca, S, Fe в листьях, с содержанием Ca, Cu, Na, Zn и Fe в почве, со значениями pH в слоях почвы 0–10 и 10–20 см, с величиной S_{mp} и отрицательные – с жизненным состоянием деревьев и концентрацией P в ветвях.

2. Показатели асимметрии, вычисленные по длине жилок второго порядка (ПДЖ), демонстрировали отрицательную корреляцию с концентрацией P в ветвях группы деревьев наихудшего жизненного состояния. Положительные корреляции между этим показателем и концентрацией поллютантов в листьях, ветвях и в почве отсутствовали.

3. В небольших выборках деревьев ($n = 8-10$) влияние концентрации поллютантов и P в листьях и ветвях на ПФА проявлялось только у групп деревьев с критическим жизненным состоянием, а влияние S_{mp} – у деревьев, произраста-

ющих в наиболее чистых условиях местообитания.

4. ПФА у 15–20-летних деревьев дуба черешчатого оказались более чувствительными к загрязнению окружающей среды, чем у старовозрастных деревьев.

5. Значения S_{mp} в большой степени определялись расстоянием от автострады ($r = 0.48$, $n = 20$), а также зависели от жизненного состояния деревьев.

6. Только кумулятивный эффект разных промеров позволяет выявить зависимости между ПФА и концентрацией поллютантов, K и P в листьях, ветвях и в почве. Расчеты, выполненные на основе одного показателя ФА мало эффективны.

7. Для оценки влияния автотранспортного загрязнения на состояние насаждений дуба черешчатого с помощью показателей ФА листьев необходимо выбирать группы деревьев одного возраста и близкого жизненного состояния, поскольку эти характеристики определяют зависимость ПФА от поллютантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алыков Н. Н., Сергеева Е.Ю., Савельева Е.С.

Влияние диоксидов серы и азота на содержание фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений // Южнороссийский вестник геологии, географии и глобальной энергии. 2006. № 5(18). С. 91–95.

Гераськина Н. П. Оценка стабильности

развития дуба черешчатого на территории национального парка «Орловское полесье» // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2009. Т. 18. №. 3. С. 240–244.

Гиниятуллин Р. Х., Кулагин А. Ю.

Особенности содержания свинца в органах у здоровых и ослабленных деревьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях промышленного загрязнения // Известия Уфимского научного центра РАН. 2018. №. 3. С. 39–44.

Доклад о состоянии окружающей среды в

городе Москве в 2023 году. Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы. 169 с. URL: clck.ru/3EQN3f (дата обращения 10.09.2024).

Железнова О. С., Черных Н. А., Тобратов С.

А. Цинк и кадмий в фитомассе

древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. №. 2. С. 253–270. DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-253-270.

Захаров В. М., Баранов А. С., Борисов В. И.,

Валецкий А. В., Кряжева Н. Г., Чистякова Е. К., Чубинишвили А. Б. Здоровье среды: методы оценки. Москва: Изд-во ООО УМК «Психология», 2000. 66 с.

Зорина А. А., Коросов А. В. Характеристика

флуктуирующей асимметрии листа двух видов берез в Карелии // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2007. №. 11. С. 28–36.

Каплина Н. Ф., Селочник Н. Н. Текущее и

долговременное состояние дуба черешчатого в трех контрастных типах леса южной лесостепи // Лесоведение. 2015. №. 3. С. 191–201.

Козлов М. В. Исследования флуктуирующей асимметрии растений в

России: мифология и методология // Экология. 2017. № 1. С. 3–12. DOI: 10.7868/S0367059717010103.

- Константинов Е. Л. Особенности флуктуирующей асимметрии листовой пластинки березы повислой (*Betula pendula* Roth.) как вида биоиндикатора: дис... канд. биол. наук (спец. 03.00.16). Калуга: Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского, 2001. 126 с.
- Кравец Е. А., Гродзинский Д. М., Шилина Ю. В., Овсянникова Л. Г. Механизмы индукции асимметрии органогенеза растений // Известия ТСХА. 2007. Вып. 5. С. 120–124.
- Кулакова Н. Ю., Колесников А. В., Курганова И. Н., Шуйская Е. В., Миронова А. В., Скоробогатова Д. М. Изменение биохимических и морфологических показателей состояния деревьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) под влиянием автотранспортного загрязнения // Лесоведение. 2021. № 4. С. 393–405.
- Кулакова Н. Ю., Шабанова Н. П. Засоление почв – одна из проблем городского озеленения // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. № 54. С. 127–131.
- Лайус Д. Л., Грэм Д. Х., Католикова М. В., Юрцева А. О. Флуктуирующая асимметрия и случайная фенотипическая изменчивость в популяционных исследованиях: история, достижения, проблемы, перспективы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. Биология. 2009. № 3. С. 98–110.
- Назарова Н. М. К вопросу о перспективности использования *S. Vulgaris* L. в качестве вида-биоиндикатора техногенного загрязнения урбосреды г. Оренбурга // Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России. Сборник научных статей. Пенза: ПГАУ, 2019. С. 129–133.
- Павлов И. И. Изучение сорбции фтора в листьях древесных растений // Химия растительного сырья. 1999. № 2. С. 37–43
- Полонский В. И., Полякова И. С. Флуктуирующая асимметрия листьев: механизм формирования и применение в фитоиндикации // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. Сборник научных статей. Барнаул: АлтГУ, 2016. С. 506–510.
- Полякова Л. В., Литвиненко В. И. Значение вторичных метаболитов в формировании устойчивости к мучнистой росе деревьев 16-летних культур дуба черешчатого // Лесоведение. 2019. № 2. С. 128–137.
- Полякова Л. В., Салтыков А. Н., Журова П. Т. Динамика показателей устойчи-

- ности к вредителям и болезням листьев дуба черешчатого на фоне изменчивости биохимических признаков // Биологическое разнообразие и устойчивость лесных и урбоэкосистем. Сборник научных статей. Первые международные чтения памяти ГФ Морозова. Симферополь: Ариал, 2019. С. 79–84.
- Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.
- Федоров Н. И. Лесная фитопатология: учебник для вузов. Минск: Изд-во БГТУ, 2004. 439 с.
- Федорова Т. А. Флуктуирующая асимметрия листа липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) как биоиндикационный параметр оценки качества среды // Вестник Курганского государственного университета. 2013. №. 3. С. 41–43.
- Alves-Silva E., Del-Claro K. Herbivory causes increases in leaf spinescence and fluctuating asymmetry as a mechanism of delayed induced resistance in a tropical savanna tree // *Plant Ecology and Evolution*. 2016. Vol. 149. No. 1. P. 73–80.
- Cornelissen T., Stiling P. Similar responses of insect herbivores to leaf fluctuating asymmetry // *Arthropod-Plant Interactions*. 2011. Vol. 5. No. 1. P. 59–69. DOI: 10.1007/s11829-010-9116-1.
- Cornelissen T., Stiling P., Drake B. Elevated CO₂ decreases leaf fluctuating asymmetry and herbivory by leaf miners on two oak species // *Global Change Biology*. 2004. Vol. 10. No. 1. P. 27–36. DOI: 10.1046/j.1529-8817.2003.00712.x.
- Gavrikov D. E., Zverev V., Rachenko M. A., Pristavka A. A., Kozlov M. V. Experimental evidence questions the relationship between stress and fluctuating asymmetry in plants // *Symmetry*. 2023. Vol. 15. No. 2. P. 339. DOI: 10.3390/sym15020339.
- Man S. R., Oroian I., Odagiu A., Man A., Braşovean I. Influence of Fertilizations upon the Intensity of *Microsphaera abbreviata* Attack in Oak // *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*. 2012. Vol. 69. No. 2. P. 148.

REFERENCES

- Alves-Silva E., Del-Claro K., Herbivory causes increases in leaf spinescence and fluctuating asymmetry as a mechanism of delayed induced resistance in a tropical savanna tree, *Plant Ecology and Evolution*, 2016, Vol. 149, No 1, pp.

- 73–80, DOI: 10.5091/plecevo.2016.1093.
- Cornelissen T., Stiling P., Drake B., Elevated CO₂ decreases leaf fluctuating asymmetry and herbivory by leaf miners on two oak species, *Global Change Biology*, 2004, Vol. 10, No 1, pp. 27–36, DOI: 10.1046/j.1529-8817.2003.00712.x.
- Cornelissen T., Stiling P., Similar responses of insect herbivores to leaf fluctuating asymmetry, *Arthropod-Plant Interactions*, 2011, Vol. 5, No 1, pp. 59–69, DOI: 10.1007/s11829-010-9116-1.
- Gavrikov D. E., Zverev V., Rachenko M. A., Pristavka A. A., Kozlov M. V., Experimental evidence questions the relationship between stress and fluctuating asymmetry in plants, *Symmetry*, 2023, Vol. 15, No 2, pp. 339, DOI: 10.3390/sym15020339.
- Alykov N. N., Sergeeva E. Ju., Savel'eva E. S., Vlijanie dioksidov sery i azota na sodержanie fotosinteticheskikh pigmentov v list'jah drevesnyh rastenij, *Juzhno-rossijskij vestnik geologii, geografii i global'noj jenergii*, 2006, Vol. 5(18), pp. 91–95.
- Doklad o sostoyanii okruzhayushchej sredy v gorode Moskve v 2023 godu* (Report on the state of the environment in the city of Moscow in 2023), 169 p, URL: clck.ru/3EQH3f (September 10, 2024).
- Fedorov N. I., *Lesnaja fitopatologija: uchebnyk dlja vuzov* (Forest Phytopathology: Textbook for Universities), Minsk: Izdvo BGTU, 2004, 439 p.
- Fedorova T. A., Fluktuirujushhaja asimmetrija lista lipy melkolistnoj (*Tilia cordata Mill.*) kak bioindikacionnyj parametr ocenki kachestva sredy (Fluctuating leaf asymmetry of small-leaved linden (*Tilia cordata Mill.*) as a bioindication parameter for assessing environmental quality), *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, No 3, pp. 41–43.
- Geras'kina N. P., Ocenka stabil'nosti razvitiya duba chereshchatogo na territorii nacional'nogo parka «Orlovskoe poles'e» (Evaluation of the stability of the development of English oak in the territory of the «Orlovskoye Polesie National Park»), *Samarskaja Luka: problemy regional'noj i global'noj jekologii*, 2009, Vol. 18, No 3, pp. 240–244.
- Ginijatullin R. H., Kulagin A. Ju., Osobennosti sodержaniya svinca v organah u zdorovyh i oslablennyh derev'ev berezy povisloj (*Betula pendula Roth*) v uslovijah promyshlennogo zagrjaznenija, *Izvestija Ufimskogo*

- nauchnogo centra RAN*, 2018, Vol. 3, pp. 39–44.
- Kaplina N. F., Selochnik N. N., Tekushhee i dolgovremennoe sostojanie duba chershchatogo v treh kontrastnyh tipah lesa juzhnoj lesostepi (Current and long-term status of English oak in three contrasting forest types of the southern forest-steppe), *Lesovedenie*, 2015, No 3, pp. 191–201.
- Konstantinov E. L., Osobennosti fluktuirujushhej asimmetrii listovoj plastinki berezy povisloj (*Betula pendula Roth.*) kak vida bioindikatora Dis... kand. biol. nauk (Features of fluctuating asymmetry of the leaf blade of silver birch (*Betula pendula Roth.*) as a bioindicator species (Candidate's biol. sci.), Kaluga, 2001, 126 p.
- Kozlov M. V., Issledovanija fluktuirujushhej asimmetrii rastenij v Rossii: mifologija i metodologija (Research of fluctuating asymmetry of plants in Russia: mythology and methodology), *Jekologija*, 2017, No 1, pp. 3–12, DOI: 10.7868/S0367059717010103.
- Kravec E. A., Grodzinskij D. M., Shilina Ju. V., Ovsjannikova L. G., Mehanizmy indukcii asimmetrii organogeneza rastenij (Mechanisms of induction of asymmetry of plant organogenesis), *Izvestija TSHA*, 2007, Vol. 5, pp. 120–124.
- Kulakova N. Ju., Kolesnikov A. V., Kurganova I. N., Shujskaja E. V., Mironova A. V., Skorobogatova D. M., Izmenenie biohimicheskikh i morfologicheskikh pokazatelej sostojanija derev'ev duba chershchatogo (*Quercus robur L.*) pod vlijaniem avtotransportnogo zagrijaznenija (Changes in biochemical and morphological indicators of the condition of English oak trees (*Quercus robur L.*) under the influence of road pollution), *Lesovedenie*, 2021, No 4, pp. 393–405.
- Kulakova N. Ju., Shabanova N. P., Zasolenie pochv – odna iz problem gorodskogo ozelenenija (Soil salinization is one of the problems of urban greening) *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2019, No 54, pp. 127–131.
- Lajus D. L., Grjem D. H., Katolikova M. V., Jurceva A. O., Fluktuirujushhaja asimmetrija i sluchajnaja fenotipicheskaja izmenchivost' v populjacionnyh isledovanijah: istorija, dostizhenija, problemy, perspektivy (Fluctuating asymmetry and random phenotypic variability in population studies: history, achievements, problems, prospects), *Vestn. S.-Peterburg. un-ta*.

- Ser. 3: Biologija*, 2009, No 3, pp. 98–110.
- Man S. R., Oroian I., Odagiu A., Man A., Braşovean I., Influence of Fertilizations upon the Intensity of *Microsphaera abbreviata* Attack in Oak // *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*, 2012, Vol. 69, No 2, Article number 148.
- Nazarova N. M., K voprosu o perspektivnosti ispol'zovaniya *S. Vulgaris* l. v kachestve vida – bioindikatora tehnogenogo zagryaznenija urbosredy g. Orenburga (On the prospects of using *S. Vulgaris* l. as a bioindicator species of technogenic pollution of the urban environment of Orenburg), *Prirodno-resursnyj Potencial, Jekologija i Ustojchivoe Razvitie Regionov Rossii*, (Natural resource potential, ecology and sustainable development of Russian regions), Collection of articles Proc. Conf., Penza: Penza State Agrarian University, 24–25 January, 2019, pp. 129–133.
- Pavlov I. I., Izuchenie sorbcii ftora v list'jah drevesnyh rastenij (Study of fluorine sorption in leaves of woody plants), *Himija rastitel'nogo syr'ja*, 1999, Vol. 2, pp. 37–43.
- Poljakova L. V., Litvinenko V. I., Znachenie vtorichnyh metabolitov v formirovanii ustojchivosti k muchnistoj rose derev'ev 16 – letnih kul'tur duba chereschatogo (The Importance of Secondary Metabolites in the Formation of Resistance to Powdery Mildew in 16-Year-Old English Oak Crop Trees), *Lesovedenie*, 2019, No 2, pp. 128–137, DOI: 10.1134/S0024114819010108.
- Poljakova L. V., Saltykov A. N., Zhurova P. T., Dinamika pokazatelej ustojchivosti k vrediteljam i boleznjam list'ev duba chereschatogo na fone izmenchivosti biohimicheskikh priznakov (Dynamics of indicators of resistance to pests and diseases of leaves of English oak against the background of variability of biochemical traits), *Biological Diversity and Sustainability of Forest and Urban Ecosystems. The First International Readings in Memory of GF Morozov*, Coll. art. Simferopol, 12–16 September, 2019, pp. 79–84.
- Polonskij V. I., Poljakova I. S., Fluktuirujushaja asimmetrija list'ev: mehanizm formirovanija i primenenie v fitoindikacii (Fluctuating leaf asymmetry: mechanism of formation and application in phytoindication), *Problems of Botany of Southern Siberia and Mongolia*, Proc. Conf. Barnaul, 23–26 May, 2016, pp. 506–510.

- Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V., *Tjzhelye metally i rastenija (Heavy metals and plants)*, Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2014, 194 p.
- Zaharov V. M., Baranov A. S., Borisov V. I., Vacleckij A. V., Krjazheva N. G., Chistjakova E.K., Chubinishvili A.B. *Zdorov'e sredy: metody ocenki (Environmental Health: Assessment Methods)*, Moscow: Psihologija, 2000, 66 p.
- Zheleznova O. S., Chernyh N. A., Tobratov S. A., *Cink i kadmij v fitomasse drevesnyh rastenij lesnyh jekosistem: zakonomernosti translokacii, akkumuljicii i bar'ernyh mehanizmov (Zinc and cadmium in the phytomass of woody plants of forest ecosystems: patterns of translocation, accumulation and barrier mechanisms)*, *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Serija: Jekologija i bezopasnost' zhizne-dejatel'nosti*, 2017, Vol. 25, No 2, pp. 253–270, DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-253-270.
- Zorina A. A., Korosov A. V., *Harakteristika fluktuirujushhej asimmetrii lista dvuh vidov berez v Karelii (Characteristics of fluctuating leaf asymmetry of two birch species in Karelia)*, *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2007, No 11, pp. 28–36.

THE DEPENDENCE OF THE INDICATORS OF FLUCTUATING ASYMMETRY OF *QUERCUS ROBUR* L. LEAVES ON VARIOUS PARAMETERS OF THE CONDITION OF TREES IN CONDITIONS OF POLLUTION BY MOTOR VEHICLES

N. Yu. Kulakova^{1*}, I. N. Kurganova²

¹*Institute of Forest Science RAS,
Sovetskaya st. 21, Uspenskoe village, 143030 Moscow Region, Russia*

²*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science RAS
FRC PSCBI RAS, Institutskaya st., bldg. 2, k. 2, 142290, Pushchino, Russia*

Received: 14.08.2024

Revised: 14.09.2024

Accepted: 22.09.2024

The relationships between the fluctuating asymmetry indices (FAI) of English oak leaves and the sanitary condition of trees, the concentration of Mg, P, K, Ca, Fe, Zn in leaves; Mg, P, K, Ca, Fe, Cu, Zn, Pb in branches and Na, Mg, P, K, Ca, Fe, Cu, Zn, Pb in the soil directly under the tree were studied. 28 trees located in places with different pollution levels (10–30 m from the Moscow Ring Road and Uzko forest park, Moscow) were examined. In the full sample of trees, significant positive correlations were found between the FAI of leaves and the concentration of Ca, Zn, S, Fe in them, as well as between the FAI of leaves and the concentration of Ca, Cu, Na, Fe, Zn in the soil. Negative dependencies were found between the FAI of leaves, the concentration of P in branches and the vital condition of trees. In the case of small samples (n = 10), the presence of correlations between the leaf PFA and the vital condition of trees was noted only in the group of trees in poor vital condition.

Keywords: *vehicle pollution, biodiagnostics, vital state of trees, powdery mildew, oak stands*

Рецензент: д.б.н. Евстигнеев О. И.