

СТАТЬИ

УДК 63:674.031.795.2

**АДАПТИВНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛИСТОВЫХ ПЛАСТИН
ЛИПЫ МЕЛКОЛИСТНОЙ (*TILIA CORDATA* MILL.)**

¹Зыков И.Е., ²Баранов С.Г., ³Липпонен И.Н., ³Полоскова Е.Ю., ¹Кузнецова Д.Д.

¹ГОУ ВО МО «Государственный гуманитарно-технологический университет»,
Орехово-Зуево, e-mail: zikov-oz@yandex.ru;

²ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»,
Владимир, e-mail: bar.serg58@gmail.com;

³Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина,
Апатиты, e-mail: lipponen-in@yandex.ru

Изучены адаптивные особенности асимметрии и формы листовых пластин липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) на Кольском полуострове (Мурманская область) и в средней полосе европейской части России (Московская и Владимирская области). Использованы методы измерения линейных (мерных) признаков и геометрической морфометрии. Размер листовых пластин в северных районах (Мурманская область) оказался значительно меньше ($p < 0,0001$), чем в подмосковной и владимирской популяциях. Листовые пластины в г. Апатиты обладают большей площадью и меньшей флуктуирующей асимметрией, по сравнению с таковыми на территории Полярно-альпийского ботанического сада-института. Различие в направленной асимметрии проявилось только на уровне листовых пластин, а различие во флуктуирующей асимметрии – на популяционном уровне. В популяциях средней полосы России флуктуирующая асимметрия выражена сильнее ($p < 0,0001$). В отличие от предыдущего года, между пластической и флуктуационной изменчивостью в 2021 г. не выявлена корреляционная зависимость. Повторные сборы не отличаются по морфометрическим показателям. Изменчивость листовых пластин в северной популяции зависит от климатических особенностей года. Наблюдения в течение двух лет показали, что высокая географическая широта не влияет на снижение стабильности развития, но обуславливает более выраженную изменчивость пластических признаков листовых пластин.

Ключевые слова: флуктуирующая асимметрия, листовая пластина, липа мелколистная, геометрическая морфометрия

**ADAPTIVE VARIABILITY OF LEAF PLATES
OF SMALL-LEAVED LINDEN (*TILIA CORDATA* MILL.)**

¹Zykov I.E., ²Baranov S.G., ³Lipponen I.N., ³Poloskova E.Yu., ¹Kuznetsova D.D.

¹State University of Humanities and Technology, Orekhovo-Zuevo, e-mail: zikov-oz@yandex.ru;

²Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, e-mail: bar.serg58@gmail.com;

³Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N.A. Avrorin, Apatity, e-mail: lipponen-in@yandex.ru

Adaptive features of asymmetry and shape of leaf plates of small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) on the Kola Peninsula (Murmansk region) and in the middle zone of the European part of Russia (Moscow and Vladimir regions) studied. Methods of measuring linear (dimensional) features and geometric morphometry used. The size of leaf plates in the northern regions (Murmansk region) turned out to be significantly smaller ($p < 0.0001$) than in the Moscow and Vladimir populations. Leaf plates in Apatity have a larger area and less fluctuating asymmetry, compared with those on the territory of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute. The difference in directional asymmetry manifested itself only at the level of leaf plates, and the difference in fluctuating asymmetry – at the population level. Fluctuating asymmetry is more pronounced in the populations of central Russia ($p < 0.0001$). In contrast to the previous year, there was no correlation between plastic and fluctuation variability in 2021. Repeated fees do not differ in morphometric indicators. The variability of leaf plates in the northern population depends on the climatic features of the year. Observations over two years have shown that a high geographical latitude does not affect the decrease in the stability of development, but causes a more pronounced variability in the plastic characteristics of leaf plates.

Keywords: fluctuating asymmetry, leaf plate, small-leaved linden, geometric morphometry

Потепление климата вызывает продвижение на северо-запад границы распространения многих древесных видов, обуславливает их адаптационные возможности. Липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) входит в состав смешанных лесов Евразии, поэтому важно представлять адаптационные особенности этого вида к умеренно холодному климату центра Кольского полуострова. Вопрос

о воздействии на широколиственные растения повышенной эмиссии углекислого газа и метана в северном полушарии пока мало изучен и ожидает внимания научного сообщества [1, 2], а генетические свойства видов играют роль в процессе адаптации к изменяющимся климатическим условиям [3].

Влияние климата на форму и асимметрию листовых пластин рассматривалось

в различных аспектах [4–8], включая зависимость от ареала древесных видов [9–12]. Установлено, что в северных широтах степень асимметричности увеличивается, а размеры листовых пластин уменьшаются [13–16], например у видов рода *Betula* отмечена реакция на изменение климатических и других условий в районах высокогорья и на равнине [12].

Как показали предыдущие исследования, популяция липы на Кольском полуострове обладает значительно меньшими линейными размерами листовых пластин и примесью направленной асимметрии (НА) в отличие от подмосковной популяции с высокой флуктуирующей асимметрией (ФА), лишенной НА. Различия в общей асимметричности не выявлены. Форма листовых пластин является контрастирующим параметром и в средней части ареала более разнообразна [17].

Индексы флуктуирующей асимметрии широко используются для определения стабильности популяционного развития растений, включая представителей рода *Tilia* [18–20]. С использованием линейных признаков изучено влияние поллютантов атмосферы и почвы в урбанизированных районах на увеличение флуктуирующей асимметрии и снижение стабильности развития [21–23]. Однако результаты исследований подвергаются сомнению в связи с частым использованием только одного признака: ширины половины листа, остальные параметры обычно не принимаются во внимание. Ответная реакция у пластических признаков не совпадает по годам, а популяции трудно сравнимы в силу различных условий произрастания.

Пластическая изменчивость (ПИ) величины морфологических признаков часто, но не всегда связана с асимметричностью. В предыдущих исследованиях холодное лето 2017 г. вызвало снижение величины листовых пластин и увеличение флуктуирующей асимметрии, при этом пластическая изменчивость не коррелировала с размером признака [16, 19]. Таким образом, липу мелколистную можно рассматривать как древесную форму факультативных сциофитов с высокой пластической изменчивостью, зависящей от средового воздействия.

В предлагаемой работе изучены морфологические свойства липы мелколистной в популяциях на Кольском полуострове (Мурманская область) и в средней полосе европейской части России (Московская и Владимирская области). Задачей являлось определение изменчивости в сравни-

тельном аспекте четырех географически удаленных популяций. Рабочая гипотеза предполагала статистически значимый эффект влияния климата на асимметричность и форму листовых пластин.

Характеристика мест сбора материала

В Мурманской области в 2021 г. сбор листьев липы мелколистной проведен в двух популяциях. Первая популяция находится на территории Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН. Это ООПТ с координатами 67°38' с.ш., 33°58' в.д. и высотой рельефа 155,5 м над уровнем моря. ПАБСИ располагается в 120 км к северу от Полярного круга вне городской черты г. Апатиты.

Вторая популяция располагается в г. Апатиты, имеет координаты 67°34'03" с.ш., 33°23'36" в.д. и высоту рельефа 178 м над уровнем моря. Обе популяции располагаются вне природного ареала распространения липы мелколистной. Описанные провинции характеризуются прохладным и коротким летом со средней температурой 11–14 °С, зимой с температурой -11–14 °С и годовым количеством осадков 450–560 мм.

В средней полосе России в те же сроки листья липы мелколистной собраны в г. Можайске Московской области с населением 105000 чел., координатами 55°30' с.ш., 36°02' в.д. и высотой рельефа 210 м над уровнем моря и в г. Владимире с населением 352000 чел., координатами 56°08'00" с.ш., 40°25'00" в.д. и высотой рельефа 150 м над уровнем моря (рис. 1).

В каждом локалитете сбор листовых пластин проведен два раза с перерывом в две недели, по пять листьев с каждого из десяти деревьев со всех сторон нижней части кроны. Всего исследовано 400 листовых пластин примерно одинакового размера. Широтная поясность Кольского полуострова обуславливает более поздние фенодаты появления листьев и зацветания липы мелколистной по сравнению с такими средней полосы России.

Материалы и методы исследования

1. Первоначальная обработка и измерение

Листовые пластины после сбора подсушивают на воздухе, помещают в бумажный пресс и сканируют (фотографируют). За экспериментальную единицу принимается как вся популяция, так и листовая пластина. В первом случае находится среднее значение после двукратного сбора, во втором – исходя из совокупности листьев выборки.



Рис. 1. Места сбора материала

Для измерения использованы 5 линейных признаков: 1 – ширина половины середины листа; 2 – расстояние между основаниями первой жилки первого порядка и второй жилки второго порядка; 3 – расстояние между основаниями второй и третьей жилок второго порядка; 4 – расстояние между основаниями первой и второй жилок первого порядка; 5 – угол между рахисом и первой билатеральной жилкой [19]. Величины линейных признаков (в см) неоднородны по гетерогенности дисперсии, что учитывается при описательной статистике.

В среде Excel проведена первоначальная обработка выборок (R–L), включая определение направленной асимметрии (t -test, $H_0: L = R$) и флуктуирующей асимметрии по формуле $FA = |R - L| / (R + L)$, где R и L – величины правого и левого признаков. Найдены коэффициенты корреляции между ФА различных признаков, а также между величиной $(R+L)/2$, т.е. величиной признака и величиной ФА для определения аллометрической зависимости «размер листа – ФА». Пластическая изменчивость, как вариация линейных признаков листа, определена по формуле: $PL = 1 - (x/X)$, где x и X – соответственно минимальное и максимальное значения признака. Обработка результатов проведена в среде STATISTICA 10 (StatSoft Ink).

2. Метод геометрической морфометрии

Оценка асимметрии по форме листовых пластин проведена с помощью эталона, усредненного консенсуса, т.е. формы, полученной после усреднения форм всех образцов листьев. Нормализации вели-

чин (прокрустовы расстояния) выполнены на основании координат наносимых меток, показывающих отклонение от симметричного консенсуса.

Для нанесения 50 меток по контуру листовых пластин и создания общего файла использован пакет программ TPS (Rohlf, 2014), для проведения прокрустового анализа (морфогометрического дисперсионного анализа) – программа MorphoJ (Klingenberg, 2019). Статистическая значимость оценена на уровне 95%.

Определена регрессионная зависимость «ФА – величина центроида». Под центроидом понимается величина, равная корню квадратному из суммы квадратов расстояний от меток консенсуса до его геометрического центра. Таким образом, центроид – величина, косвенно служащая для определения размера листовых пластин в геометрическом пространстве. Для определения центров множеств координат меток и расстояний между ними используется ковариационный анализ координат наносимых меток.

Дана оценка влияния расположения популяции, фактора сбора листьев как на форму листовых пластин, так и на их асимметричность. Как показывают предыдущие исследования, ошибка фотографирования крайне мала, поэтому получение изображения проведено один раз, нанесение меток с последующей обработкой проведено дважды. Процедура нанесения настоящих меток первого типа проведена с разбиением левой и правой половин контура на 50 равных отрезков с последующей расстановкой меток [24, 25].

Результаты исследования и их обсуждение

Описательная статистика популяций Кольского полуострова

Условно популяции Кольского полуострова можно обозначить как экспериментальные. Значения линейных признаков в этой крайней северной точке ареала (1,19 см) явно отличаются от таковых в подмосковной и владимирской популяциях (3,87 см) со средним стандартным отклонением соответственно 0,21 и 1,39 ($p < 0,05$), т.е. размеры листовых пластин здесь примерно в два раза меньше, чем в локалитетах средней полосы России. Тест на направленную асимметрию (t -test, $H_0: R = L$) указывает на ее отсутствие ($p > 0,05$; табл. 1).

Наибольшее отклонение дисперсии в северных популяциях проявилось по второму признаку, как и в 2020 г., т.е. этот при-

знак наименее пригоден для тестирования ФА мерным способом. Отклонение в эксцессе распределения ($R-L$) также отмечено по второму признаку ($\gamma = 1,91$, ПАБСИ; $\gamma = 8,06$; г. Апатиты), по нему же получены и самые высокие значения коэффициента вариации, что, безусловно, влияет на общую величину флуктуирующей асимметрии (0,07 и 0,06 соответственно). Отклонение в распределении ($R-L$) наблюдается преимущественно в сторону правой половины листа, как и в предыдущий год сбора.

Характерным проявлением выборок ФА является их параметрическое распределение ($p > 0,2$; K-S test), хотя в предыдущем 2020 г. распределение сильно отличалось от нормального. Четвертый признак внес наибольший вклад в различие. Величина ФА этого признака выше в популяции ПАБСИ (0,078), чем в г. Апатиты (0,051) (табл. 2).

Таблица 1

Свойства распределения ($R-L$) и величины ФА в популяциях Кольского полуострова

Популяция	Признак	(R-L) aver	SD	s	(R-L) t -test, t	λ $\pm 0,24(SD)$	γ $\pm 0,47(SD)$	ФА		
								$ R-L /(R+L)$	K-S, p	s
ПАБСИ	1	0,15	2,13	4,52	0,38	0,29	0,30	0,031 \pm 0,002	> 0,02	0,001
	2	-0,04	2,77	7,69	-0,12	-0,21	1,91	0,078 \pm 0,007	< 0,01	0,005
	3	0,06	2,32	5,39	0,22	0,32	0,40	0,099 \pm 0,009	< 0,05	0,008
	4	-0,04	2,15	4,62	-0,12	-0,24	0,03	0,078 \pm 0,007	< 0,05	0,005
	5	0,04	1,62	2,62	0,19	-0,09	0,03	0,061 \pm 0,005	< 0,01	0,002
Апатиты	1	0,13	6,32	2,51	0,37	-0,59	0,401	0,034 \pm 0,00	< 0,05	0,001
	2	0,01	8,77	2,96	0,02	1,99	8,06	0,065 \pm 0,01	< 0,05	0,003
	3	-0,29	7,52	2,74	-1,01	-0,74	1,99	0,092 \pm 0,01	< 0,05	0,006
	4	-0,12	4,30	2,07	-0,35	-0,12	2,60	0,051 \pm 0,01	< 0,01	0,003
	5	-0,21	2,43	1,56	-0,98	-0,77	3,99	0,059 \pm 0,00	< 0,01	0,003

Примечание. (R-L) aver – среднее значение выборки (R-L); SD – стандартное отклонение; λ – асимметричность распределения; γ – эксцесс распределения; test K-S – тест Колмогорова – Смирнова; σ – дисперсия.

Таблица 2

Различие в ФА в двух популяциях Кольского полуострова (двухвыборочный t -test)

Признак	Mean pabsi	Mean apatity	t -значение	df	p
1	0,034	0,031	0,853	207	0,394
2	0,065	0,078	-1,569	207	0,118
3	0,092	0,099	-0,643	207	0,521
4	0,051	0,078	-3,066	207	0,002
5	0,059	0,061	-0,388	207	0,698
среднее	0,060	0,069			

Примечание. mean pabsi – среднее значение (популяция ПАБСИ); mean apatity – среднее значение (популяция г. Апатиты); df – степень свободы; p – уровень вероятности.

Исходя из общего интегрального значения ФА стабильность развития в ПАБСИ (0,07) ниже, чем в г. Апатиты (0,06) ($df=102$; $t=1,66$; $p=0,02$).

Корреляционная зависимость

Корреляция между значениями ФА признаков практически не выявлена. Такая независимость параметров позволяет использовать их величины для определения ФА. Корреляция ФА по величине признака имеет высокие значения лишь по четвертому признаку ($r=0,77$) в популяциях средней полосы России. Корреляция ФА–ПИ ($r>0,7$) встречается одинаково во всех популяциях (по 12%).

В 2021 г. в популяции г. Апатиты отмечена связь пластической и флуктуационной изменчивости $r=0,45$. На территории ПАБСИ такая связь не выявлена, вероятно, из-за меньшей величины листовых пластин. Очевидно, климатические особенности года влияют на пластическую изменчивость и обуславливают более высокую связь ПИ и ФА. Пластическая изменчивость, особенно в северных популяциях, ассоциирована с флуктуационной изменчивостью.

Геометрическая морфометрия формы листовых пластин

Множество значений координат ХУ в виде меток преобразованы в консенсусную форму для совокупности листовых пластин, удалена составляющая величины, т.е. проведено прокрустово выравнивание. Результаты прокрустова двухфакторного анализа показали изменчивость формы и асимметрии листовых пластин (табл. 3).

Отмечено отсутствие различий в форме листьев (первая строка) как на внутривидовом, так и на межвидовом уровнях. Направленная асимметрия (фактор «сторона») различается среди листо-

вых пластин ($p<0,0001$). Направленная асимметрия и флуктуирующая асимметрия (взаимодействие обоих факторов) статистически значимы только на уровне листовых пластин при высоком значении степени свободы ($df=14\,800$).

Ошибка измерения листовых пластин («остатки») составляла 0,50–0,51% от общей суммы квадратов MS, что считается приемлемым при нахождении флуктуирующей асимметрии. Таким образом, географически популяции различаются по обоим видам асимметрии.

Чтобы определить характер различий, проведен прокрустов анализ для листьев северных популяций и популяций средней полосы России (табл. 4). Направленная асимметрия листовых пластин, как экспериментальной единицы, преобладает на Кольском полуострове («сторона» $F=30,3$; $p<0,0001$), флуктуирующая асимметрия примерно одинаково проявляется в обеих группах листьев («сторона×лист» $F=3,02$ и $F=4,94$; $p<0,0001$).

На основании координат меток на листовых пластинах для двух регионов проведен ковариационный анализ. Канонические коэффициенты разделились на две группы по форме листовых пластин и по асимметричности (рис. 2).

По первому компоненту формы установлена отрицательная связь с усредненной общей формой листовых пластин и положительная связь асимметрии с дисперсией меток и дисперсией объединенных данных. И асимметрия, и форма отличаются географически по расстоянию в морфо-геометрическом пространстве. Наибольшее прокрустово расстояние между центрами множеств формы установлено для ПАБСИ и г. Можайска (0,09; $p<0,001$).

Таблица 3

Географическое различие между северными популяциями и популяциями средней полосы России

Фактор	SS	MS	df	F
Популяция	0,665	0,007	100	1 ^{ns}
Сторона	0,790	0,008	100	1,19 ^{ns}
Сбор×сторона	0,663	0,007	100	64,2***
Остатки	14,421	0,000	139600	
Лист	4,199	0,000	14800	0,96 ^{ns}
Сторона	0,790	0,008	100	26,83***
Лист×сторона	4,358	0,000	14800	4,51***
Остатки	7,192	0,000	110200	

Примечание. SS – сумма квадратов; df – степень свободы; MS – средний квадрат; F – критерий Гудолла; *** – $p<0,0001$; ns – статистически не значимо.

Таблица 4

Различия в направленной и флуктуирующей асимметрии

Эффект	Средняя полоса России				Кольский полуостров			
	SS	MS	df	F	SS	MS	df	F
Лист	1.121	0,000	8200	3,16***	3.016	0,000	6500	0,72 ^{ns}
Сторона	0.008	0,000	100	1,78***	1.946	0,019	100	30,27***
Лист×сторона	0.354	0,000	8200	3,02***	4.178	0,001	6500	4,94***
Остатки	0.712	0.000	49800		7.863	0,000	60400	

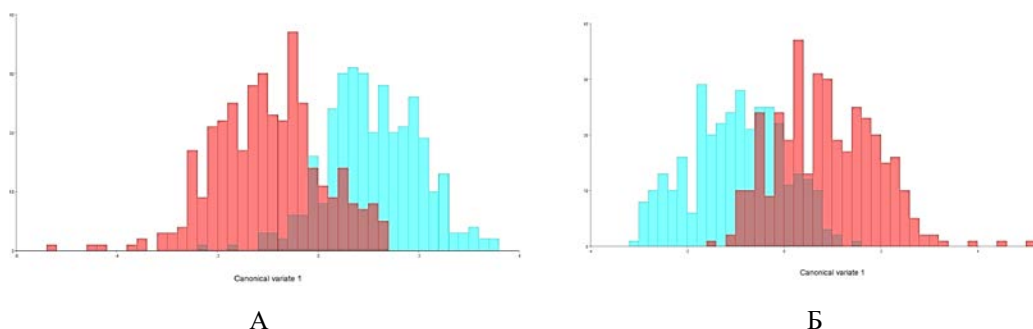


Рис. 2. Распределение частот первого компонента формы (А) и асимметрии (Б).
Кирпичный цвет – совокупность северных популяций,
лиловый цвет – совокупность популяций средней полосы России

Не все расстояния между множествами асимметрии значимы. Например, г. Владимир и г. Можайск (0,004; $p = 0,6$), г. Апатиты и ПАБСИ (0,009; $p = 0,6$) не отличаются по асимметричности. Наибольшее различие установлено между популяциями г. Владимира и ПАБСИ (0,07; $p < 0,001$), между г. Можайском и ПАБСИ, г. Можайском и г. Апатиты (0,06; $p < 0,001$). В 2020 г. асимметричность не различалась статистически, так как на нее, по-видимому, влияет год сбора материала.

Как и в сборах предыдущего года, асимметричный компонент формы включает направленную и флуктуирующую асимметрию. Регрессионная связь между величиной консенсуса и ФА не установлена. При работе с линейными признаками замечено проявление прямой связи между ними и ФА. Меньшие размеры листьев в северных популяциях явно связаны с направленной асимметрией. Методом геометрической морфометрии объединяются все метки, проводится разделение на популяционном уровне, регрессионным анализом проверяются аллометрические свойства, т.е. связь между размером консенсуса-центроида и ФА (взаимодействие факторов в прокрустовом анализе).

Направленная асимметрия, как индикатор стресс-фактора, снижающего стабильность развития [22], может проявляться в северных популяциях и служить генетически обусловленной адаптацией к суровым климатическим условиям.

Заключение

Метод геометрической морфометрии с интегральным подходом, позволяющий тестировать изменчивость формы и асимметрии листовых пластин, может быть использован для образцов разного размера. Экспериментальные (северные) популяции обладают значительно меньшими размерами листьев, пластическая изменчивость мерных признаков здесь теснее связана с флуктуационной изменчивостью. Скрытая направленная асимметрия проявляется на биосистемном уровне листовых пластин, но, учитывая стабильность развития как популяционное свойство, правильнее рассматривать асимметричность на популяционном уровне, который в нашем случае указывает на различие в ФА и на снижение стабильности развития в популяциях средней полосы России.

Гипотеза о техногенном влиянии на стабильность развития не подтверждена:

на Кольском полуострове в ПАБСИ флуктуирующая асимметрия оказывается выше, чем в популяции г. Апатиты.

Форма листовых пластин является более контрастирующей характеристикой. В средней части ареала форма листовых пластин липы мелколистной более разнообразна.

Список литературы

- MacDonald G., Kremenetski K., Beilman D. Climate change and the northern Russian treeline zone. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 2008. No. 363. P. 2283–2299.
- Liess S., Snyder P.K., Harding K.J. The effects of boreal forest expansion on the summer Arctic frontal zone. *Clim Dyn.* 2012. No. 38. P. 1805–1827.
- Zhang Li.Y., Liao Y., Wang P.C., Wang T.X., Ueno S., Du F. K. Genetic, geographic, and climatic factors jointly shape leaf morphology of an alpine oak, *Quercus aquifolioides* Rehder & EH Wilson. *Annals of Forest Science.* 2021. Vol. 78. No. 3. P. 1–18.
- Мартынов Л.Г. Результаты интродукции древесных растений европейского происхождения в ботаническом саду Института биологии Коми научного центра. *Известия Коми научного центра УРО РАН.* 2014. Т. 3. № 19. С. 58–84.
- Li. L., Wang X., Manning W.J. Effects of elevated CO₂ on leaf senescence, leaf nitrogen resorption, and late-season photosynthesis in *Tilia americana* L. *Frontiers in plant science.* 2019. No. 10. P. 1217. DOI: 10.3389/fpls.2019.01217.
- Erofeeva E.A. Dependence of guaiacol peroxidase activity and lipid peroxidation rate in drooping birch (*Betula pendula* Roth.) and linden (*Tilia cordata* Mill.) leaf on motor trac pollution intensity. *Dose Response.* 2015. No. 13. P. 1–6. DOI: 10.1177/2F1559325815588510.
- Kramer K. Phenotypic plasticity of the phenology of seven European tree species in relation to climatic warming. *Plant Cell and Environment.* 1995. No. 18. P. 93–104. DOI: 10.1111/j.1365-3040.1995.tb00356.x.
- Vitasse Y., Bresson C., Kremer A., Michalet R., Delzon S. Quantifying phenological plasticity to temperature in two temperate tree species. *Functional Ecology.* 2010. No. 24. P. 1211–1218. DOI : 10.1111/j.1365-2435.2010.01748.x.
- Acuna-Rodriguez S., Torres-Diaz C., Hereme R., Molina-Montenegro M.A. Asymmetric responses to simulated global warming by populations of *Colobanthus quitensis* along a latitudinal gradient. *Peer J.* 2017. No. 5. P. 3718. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28948096> (date of access: 05.07.2022).
- Morais D.V. De, Nunes L.A., Mata V.P. Da, Carvalho Costa M.A. P. De, Silva Sodre G. Da, Carvalho C.A.L. De. Leaf geometric morphometrics among populations of *Dalbergia ecastaphyllum* (L.). *Taub. Bioscience Journal.* 2019. Vol. 35. No. 6. P. 1789–1798. URL: <http://orcid.org/0000-0002-2737-7428> (date of access: 05.07.2022).
- Sheth S.N., Morueta Holme N., Angert A.L. Determinants of geographic range size in plants. *New Phytologist.* 2020. Vol. 226. No. 3. P. 650–665. DOI: 10.1111/nph.16406.
- Migalina S.V., Ivanova L.A., Makhnev A.K. Size of the Leaf as a Marker of Birch Productivity at a Distance from the Climatic Optimum. *Russian journal of plant physiology.* 2009. Vol. 56. No. 6. P. 858. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S102144370906017X#citeas> (date of access: 11.07.2022).
- Zakharov V.M., Kryazheva N.G., Dmitriev S.G., Trofimov I.E. Evaluation of possible changes in population state due to climate change (with particular references to the study of developmental stability of the European white birch). *Biology Bulletin Reviews.* 2012. Vol. 2. No. 2. P. 190–193. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S2079086412020107#citeas> (date of access: 11.07.2022).
- Shadrina E.G., Vol'pert Y.L. Developmental instability of the organism as a result of pessimization of environment under anthropogenic transformation of natural landscapes. *Russian Journal of Developmental Biology.* 2014. Vol. 45. No. 3. P. 117–126. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1062360414030059#citeas> (date of access: 11.07.2022).
- Kozlov M.V., Zverev V. Temperature and herbivory, but not pollution, affect fluctuating asymmetry of mountain birch leaves: Results of 25-year monitoring around the copper-nickel smelter in Monchegorsk, northwestern Russia. *Sci. Total Environ.* 2018. Vol. 640. P. 678–687. URL : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.328> (date of access: 11.07.2022).
- Zverev V., Kozlov M.V. Variation in leaf size and fluctuating asymmetry of Mountain Birch (*Betula pubescens* var. *pumila*) in space and time: implications for global change research. *Symmetry.* 2020. № 12. P. 1703. URL: <https://doi.org/10.3390/sym12101703> (date of access: 11.07.2022).
- Baranov S.G., Zykov I.E., Poloskova E.Yu., Lipponen I.N., Goncharova O.A., Kuznetsova D.D. Spatial Variability of Small-leaved Linden (*Tilia cordata* Mill.) Leaf Blade. In *E3S Web of Conferences.* 2021. Vol. 254. P. 06002.
- Зыков И.Е., Федорова Л.В., Баранов С.Г. Оценка биоиндикационного значения уровня изменчивости параметров листовых пластинок липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях города Орехово-Зуево и Орехово-Зуевского района // *Вестник Московского государственного областного университета. Естественные науки.* 2015. № 1. С. 15–20.
- Baranov S.G., Zykov I.E., Fedorova L.V. Investigation of intraspecific variability of little-leaved. *Bulletin of Tomsk State University. Biology.* 2015. Vol. 2. No. 30. P. 134–145.
- Baranov S., Zykov I., Fedorova L. Influence of climatic factor on plasticity and asymmetry of laminas of genus *Tilia* species. *Principles of ecology.* 2019. Vol. 8. No. 1. P. 3–18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-klimaticheskogo-faktora-na-plastichnost-i-asimetriyu-listovyh-plastin-predstaviteley-roda-tilia-l> (дата обращения: 27.01.2021).
- Baranov S.G. Use of morphogeometric method for study fluctuating asymmetry in leaves *Tilia cordata* under industrial pollution. *Advan. Environ. Biol.* 2014. No. 8. P. 2391–2398. URL: <http://www.aensiweb.com/aeb.html> (date of access: 12.07.2022).
- Erofeeva E.A., Yakimov B.N. Change of leaf trait asymmetry type in *Tilia cordata* Mill. and *Betula pendula* Roth. under air pollution. *Symmetry.* 2020. Vol. 12. No. 5. P. 727. DOI: 10.3390/sym12050727.
- Baranov S.G., Zykov I.E., Kuznetsova D.D. Conjugacy of two types of phenotypic variability of small-leaved linden. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding.* 2019. No. 23. P. 496–502. DOI: 10.18699/VJ19.519.
- Baranov S.G., Vinokurov I.Y., Zykov I.E., Fedorova L.V. Asymmetry and shape in leaf blade red clover. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2020. Vol. 548. No. 7. P. 072015. IOP Publishing. (2020, August). DOI:10.1088/1755-1315/548/7/072015.
- Baranov S.G., Zykov I.E., Kuznetsova D.D., Antsyshkina A.M., Fedorova L.V. Evaluation of shape and asymmetry in rye leaf. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2020. Vol. 548. No. 3. P. 032001. IOP Publishing. (2020, August). DOI:10.1088/1755-1315/548/3/032001.