

АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ АСИММЕТРИИ ЛИСТЬЕВ *BETULA PENDULA* (BETULACEAE)

© 2022 г. М. М. Дорофеева^{1, 2, *}, С. А. Бонецкая¹

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
г. Санкт-Петербург, Россия

²Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: dorofeevamm@gmail.com

Поступила в редакцию 21.07.2021 г.

После доработки 28.09.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

На основе цифровых технологий обработки изображений (Самаркина и др., 2019) выполнено изменение параметров листовых пластинок *Betula pendula* Roth и расчет показателей их флуктуирующей асимметрии и площади на 25 пробных площадках на территории г. Санкт-Петербурга. Используемое программное обеспечение на базе Matlab автоматически рассчитывает показатель асимметрии листовых пластинок и площадь листа, анализируя расположение точек на правой и левой кромке листа. Отмечена высокая перспективность метода, по сравнению с традиционной методикой измерения 5-ти параметров листа. Методика не требует применения особого оборудования и легко может быть освоена специалистами.

Ключевые слова: площадь листьев, флуктуирующая асимметрия, методы определения, компьютерные технологии, *Betula pendula*, г. Санкт-Петербург

DOI: 10.31857/S0033994622030049

Древесные растения активно используются в биологическом мониторинге и в целях биоиндикации чаще всего анализируют анатомические и морфологические характеристики листьев. Особой популярностью для этой цели, в связи с широким распространением и билатерально-симметричной формой листовой пластинки, пользуется вид *Betula pendula* Roth.

Многочисленными исследованиями установлена корреляция между величиной флуктуирующей асимметрии (ФА) листовой пластинки *Betula pendula* и уровнем загрязнения среды [1–8]. При этом в некоторых работах авторы указывают на отсутствие ожидаемого увеличения ФА под воздействием экологических стрессов [9]. Было показано, что ФА листьев *Betula pendula* не изменяется в градиенте сильной техногенной нагрузки [10]. В обзоре Graham et al. [11] отмечено, что в более чем половине проанализированных исследований для разных видов растений было выявлено отсутствие значимых различий ФА между загрязненными и незагрязненными местобитаниями. Показано, что увеличение ФА определяется сочетанием воздействия множества факторов среды и зависит так же от климатических и почвенных условий [11]. Отсутствие реакции на загрязнение

может объясняться развитием устойчивости к антропогенным факторам. Вопрос значения показателя ФА при биологическом мониторинге остается пока открытым.

Тем не менее вид *Betula pendula* рекомендован для оценки состояния наземных экосистем “Методическими рекомендациями по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ” распоряжения Росэкологии № 460-р от 16 октября 2003 г. [12]. Данная методика рекомендована для широкого использования и основана на оценке показателя ФА. При измерении ФА оценивается асимметричность проявления пяти признаков на правой и левой половинах листа, рассчитывается средняя арифметическая показателей. Для проведения измерений часть исследователей используют непосредственно листья, а не сканированные изображения листовых пластинок. Измерения выполняются линейками, штангенциркулями и т.д., что значительно снижает точность оценок ФА. Общеизвестная методика является трудоемкой и требует значительных затрат времени, даже при использовании Adobe Photoshop и подобных программ для измерения электронных изображений листьев.

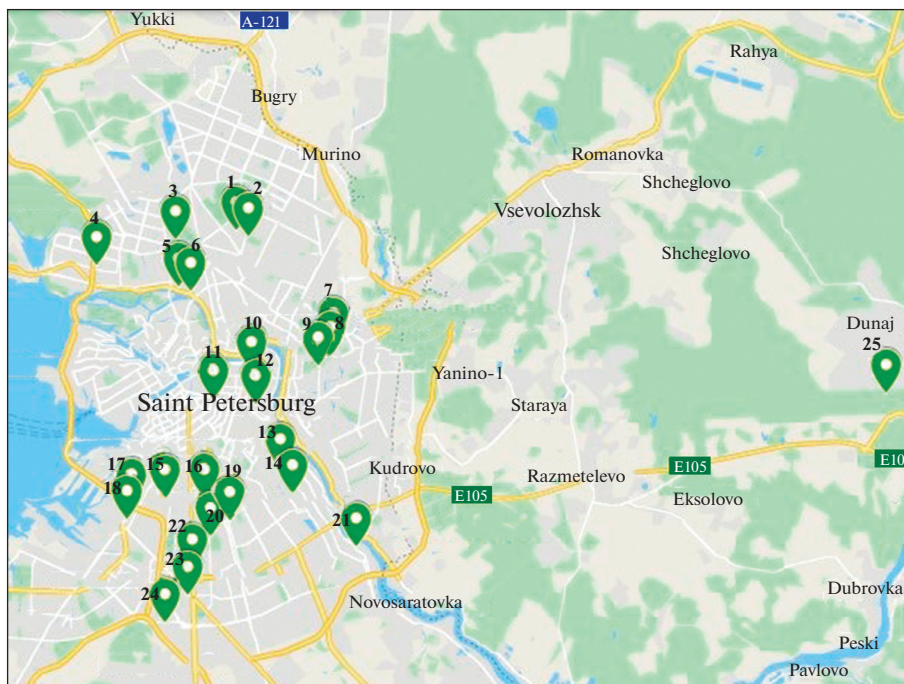


Рис. 1. Карта расположения пробных площадок на территории г. Санкт-Петербурга.
Fig. 1. Location of sample plots in St. Petersburg.

Вместе с тем, при большом объеме исследуемого материала требуется и скорость, и высокая точность измерений. В настоящее время активно разрабатываются современные методики с применением компьютерных технологий, позволяющие ускорить процесс анализа ФА.

Е.И. Самаркиной с соавт. [13] разработана программа с помощью языка программирования, встроенного в комплекс Matlab, предназначенная для определения площади и коэффициента асимметрии листовых пластинок. Данное программное обеспечение (ПО) автоматически рассчитывает показатель асимметрии и площадь листовых пластинок, анализируя расположение точек на правой и левой кромке листа и не требует проведения дополнительных измерений.

Целью работы является оценки состояния среды в г. Санкт-Петербурге по показателю флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* с использованием цифровых технологий обработки изображений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сбор листовых пластинок *Betula pendula* проводился в июле–августе 2019 г. в условиях г. Санкт-Петербурга в соответствии с «Методическими рекомендациями по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ» распоряжения Росэкологии № 460-р [12].

Пробные площадки (ПП) в черте города подбирались с учетом карты почвенных загрязнений, с целью охватить основные районы города. Контрольная пробная площадка в окр. г. Шлиссельбурга (Кировский р-н, Ленинградская обл.) выбрана с учетом отсутствия вблизи крупных промышленных предприятий и дорог. Всего было заложено 25 ПП (рис. 1). Данные о почвенном загрязнении на ПП представлены в табл. 1. Данные об атмосферном загрязнении вблизи ПП приведены с официального сайта «Экологический портал Санкт-Петербурга» [14] с ближайших станций автоматического мониторинга загрязнения атмосферного воздуха (САМ) за май–июнь 2019 г., поскольку именно в этот период происходит рост и развитие листовых пластинок *Betula pendula* (табл. 2).

На каждой ПП листья собирались с 10 деревьев *Betula pendula* с нижней части кроны по всему периметру. С каждой березы собиралось минимум 10 сформированных листовых пластинок, полностью закончивших рост, без повреждений. Всего было собрано и оцифровано 2720 листовых пластинок. Фотографии обрабатывались в графическом редакторе GIMP при наличии белых бликов, тени от листьев, черешков, для повышения контрастности изображения. Для измерений ФА были подготовлены файлы цифровых фотографии серий листовых пластинок в формате JPEG достаточного разрешения. В результате автоматического распознавания функцией Matlab объек-

Таблица 1. Характеристика пробных площадок и данные о почвенном загрязнении на территории г. Санкт-Петербурга
 Table 1. Characteristics of the sample plots and data on soil pollution in St. Petersburg

№ ПП № SP	Адрес Address	Географические координаты Location coordinates		Данные о почвенном загрязнении* Data on soil pollution*					
		N	E	Pb, мг/кг Pb, mg/kg	бензапирен, мт/кг benzopyrene, mt/kg	диоксины (ДЭ), нг/кг dioxins (toxic equivalency), ng/kg	Zc, ед. ¹ Zc, units	радон, кбк/м ³ radon, kbp/m ³	нефтепродукты, мт/кг oil products, mt/kg
1	ул. Жака Дюкло Zhaka Duclo st.	60.009457	30.359813	150–300	0.06–0.1	0.9–1.5	64–128	10–20	
2	метро Политехническая Politehnicheskaya Metro station	60.006345	30.370074	90–150	0.06–0.1	0.3–0.6	64–128	10–20	
3	Удельный парк Udelny park	60.004962	30.303782	150–300	0.06–0.1	0.9–1.5	64–128	10–20	–
4	ул. Мебельная, 13 13 Mebelnaya st.	59.993273	30.232339	300–450	0.06–0.1	0–0.3	128–300	0–5	–
5	Строгановский парк Stroganovsky Park	59.983586	30.307169	90–150	0.06–0.1	0.6–0.9	64–128	5–10	–
6	Набережная Черной Речки Chernaya Rechka Embankment	59.981527	30.318495	300–450	0.1–0.2	0.9–1.5	128–300	10–20	–
7	ул. Бокситогорская, 6 6 Boksitogorskaya st.	59.959349	30.446910	90–150	0.06–0.1	6–9	64–128	5–10	–
8	Большеохтинское кладбище, правая сторона Bolshoekhtinsky cemetery, right side	59.952715	30.443964	150–300	0.04–0.06	3–6	128–300	5–10	–
9	Большеохтинское кладбище, левая сторона Bolshoekhtinsky cemetery, left side	59.947874	30.433402	30–90	0.06–0.1	0.9–1.5	32–64	10–20	>7500
10	Таврический сад Tavrichesky (Tauride) Garden	59.946218	30.373071	90–150	0.06–0.1	0–0.3	16–32	10–20	–
11	Аничков сад Anichkov Garden	59.933215	30.338798	150–300	0.04–0.06	0.6–0.9	128–300	10–20	2000–4000
12	Овсянниковский сад Ovsyannikovskiy Garden	59.930901	30.376511	150–300	0.06–0.1	0–0.3	128–300	10–20	–
13	Площадь Бехтерева Bekhterev Square	59.902255	30.399425	150–300	0.06–0.1	0.6–0.9	128–300	5–10	–

Таблица 1. Продолжение / Table 1. Continuation

№ ПП № SP	Адрес Address	Географические координаты Location coordinates		Данные о почвенном загрязнении* Data on soil pollution*					
		N	E	Pb, мг/кг Pb, mg/kg	бензапирен, мг/кг benzopyrene, mg/kg	диоксины (ЛЭ), нг/кг dioxins (toxic equivalency), pg/kg	Zc, ед. ¹ Zc, units	радон, ккк/м ³ radon, kbp/m ³	нефтепродукты, мг/кг oil products, mg/kg
14	ул. Ольги Берггольц, 36 к. 3 36-3 Olgy Berggolts st.	59.890409	30.409864	300–450	0.06–0.1	0.9–1.5	>300	10–20	–
15	Кировский завод, электродепо Kirov Plant, electric locomotive house	59.888571	30.294242	300–450	0.02–0.04	>9	128–300	5–10	–
16	Парк Динамо Dynamo Park	59.888482	30.330442	300–450	0.1–0.2	0.3–0.6	128–300	10–20	–
17	Сад Кирьяново Kiryapovo Garden	59.886126	30.263992	300–450	0.06–0.1	3–6	128–300	10–20	–
18	метро Кировский завод Kirovsky Zavod Metro station	59.878665	30.261034	90–150	0.06–0.1	0.6–0.9	32–64	20–30	–
19	ул. Белградская, 11 11 Belgradskaya st.	59.877716	30.353675	150–300	0.1–0.2	0–0.3	64–128	5–10	2000–40000
20	Московский парк победы Moscow Victory Park	59.871357	30.335586	150–300	0.1–0.2	0.6–0.9	128–300	10–20	–
21	метро Пролетарская Proletarskaya Metro station	59.866188	30.468050	30–90	0.06–0.1	0.6–0.9	32–64	20–30	–
22	Московский проспект, 183 183 Moskovsky prospect	59.856291	30.319989	300–450	0.06–0.1	0.6–0.9	32–64	20–30	–
23	ул. Варшавская Varshavskaya st.	59.844446	30.314755	30–90	0.04–0.06	0.3–0.6	16–32	20–30	–
24	ж/д ст. Предпортовая Predportovaya railway station	59.831649	30.295108	150–300	0.02–0.04	0.6–0.9	128–300	20–30	–
25	Садоводческий массив "Сады" "Sady" gardening allotments	59.935898	30.947061	–	–	–	–	–	–

Примечание: * использованы данные карт почвенного загрязнения г. Санкт-Петербург [15]; ¹ – индекс суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами. Прочерк означает отсутствие данных.

Note: * Data were obtained from the soil pollution maps of St. Petersburg [15]; ¹ – index of total heavy metals in soil. A dash means no data.

Таблица 2. Данные атмосферного загрязнения воздуха в мае—июне 2019 г.
Table 2. Data on air pollution in May—June 2019

№ САМ* № AMS*	№ ПП № SP	Средние концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в отношении к среднесуточным предельно допустимым концентрациям (ПДК с.с.) Average pollutant concentrations in the atmospheric air against the daily-average maximum allowable concentrations (MAC a.d.)					SO ₂	O ₃	Содержание взвешенных частиц в отношении к ПДК с.с. The content of particulate matter against MAC a.d.
		CO	NO	NO ₂	NO	NO ₂			
1	3, 5, 6	0.134	0.252	1.047	0.100	1.421	0.200		
2	14	0.100	0.136	0.464	0.116	1.516	0.178		
3	1, 2	0.107	0.164	0.690	—	—	0.159		
4	12	0.121	0.293	0.711	0.100	—	0.170		
5	15, 17, 18	0.105	0.142	0.226	0.115	—	0.449		
6	4	0.105	0.193	0.828	0.127	—	—		
8	16, 20, 22	0.102	0.115	0.559	0.100	1.695	0.151		
9	21	0.113	0.187	0.758	0.100	1.319	0.195		
10	11	0.102	0.146	0.743	0.100	—	—		
12	10	0.179	0.655	1.733	—	—	—		
14	7, 8, 9	0.108	0.167	0.607	—	1.482	0.119		
16	13, 19	0.116	0.151	0.648	0.100	—	0.328		
19	23, 24	0.107	0.110	0.406	—	1.391	0.162		

Примечание: полужирным шрифтом отмечены показатели, превышающие ПДК. Проверк означает отсутствие данных. * — станция автоматического мониторинга.
Note: Indicators in bold type exceed MAC. Dash means no data. * — automatic monitoring station.

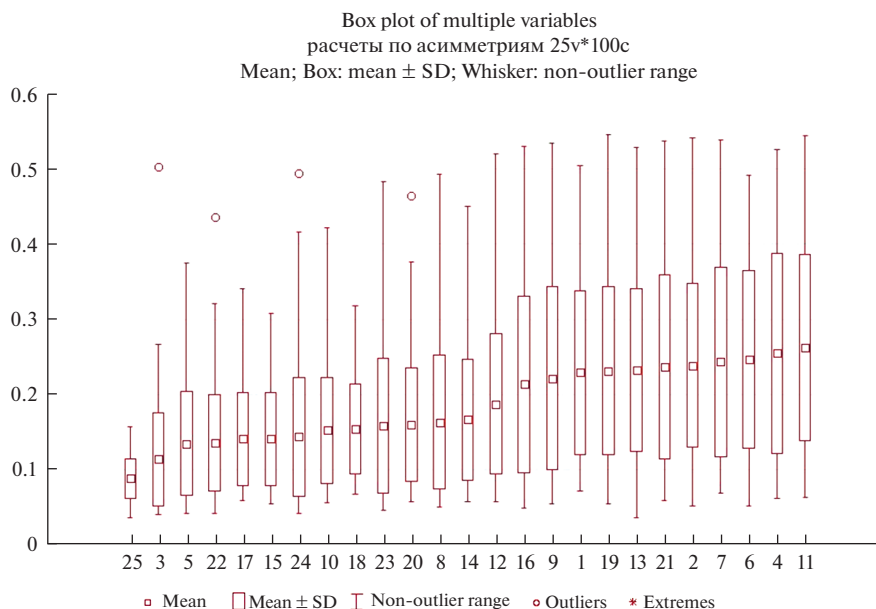


Рис. 2. График распределения значений флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* на пробных площадях. По горизонтали – номер ПП; по вертикали – величина ФА.

Fig. 2. Distribution of *Betula pendula* leaf fluctuating asymmetry values at different sample plots. X-axis – SP number; y-axis – fluctuating asymmetry value.

тов на цифровом изображении был сформирован массив листовых пластинок, каждой из которых соотносится своя бинарная матрица изображения. На основе матрицы бинарного изображения листовой пластинки выводятся показатели асимметрии, логарифм асимметрии, площадь левой и правой половин листовой пластинки, суммарная площадь листовой пластинки [13].

Обработку данных проводили с использованием пакета программ STATISTICA 6.0 и MS EXCEL.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительный анализ данных показателей флуктуирующей асимметрии, полученных с помощью программного обеспечения Matlab

Статистические параметры выборок интегрального показателя флуктуирующей асимметрии листа *Betula pendula* представлены в табл. 3. Наименьшее среднее значение асимметрии, рассчитанное как среднее арифметическое всех значений выборки получено в контрольной точке – ПП № 25 (рис. 2).

Для предварительного анализа данных были взяты две выборки значений показателей флуктуирующей асимметрии: случайная пробная площадка (ПП № 9) и контрольная точка (ПП № 25). При построении гистограмм выявлена их несимметричность и смещенность распределения влево.

По критерию Колмогорова–Смирнова гипотеза о нормальности не отклоняется, но и досто-

верно не подтверждается (ПП № 9: $D = 0.13471$, $p < 0.1$; ПП № 25: $D = 0.11616$, $p < 0.15$). Тест на нормальность по критерию Хи-Квадрат (ПП № 9: $\chi^2 = 29.60539$, $p = 0.00005$; ПП № 25: $\chi^2 = 11.56577$, $p = 0.11577$) и критерию Шапиро–Уилка (ПП № 9: $W = 0.92051$, $p = 0.00001$; ПП № 25: $W = 0.96149$, $p = 0.00514$) позволяет отвергнуть гипотезу о нормальном распределении. В связи с этим рассматривались альтернативные типы распределений: распределение Вейбулла, гамма-распределение, логнормальное распределение.

Оценка, выполненная по критерию Колмогорова–Смирнова, свидетельствует об отсутствии соответствия эмпирических распределений распределению Вейбулла (ПП № 9: $D = 0.22594$, $p < 0.01$; ПП № 25: $D = 0.2845$, $p < 0.01$), гамма-распределению (ПП № 9: $D = 0.74858$, $p < 0.01$; ПП № 25: $D = 0.912286797$, $p < 0.01$) и логнормальному распределению (для обоих эмпирических распределений $D = 1$, $p < 0.01$). По критерию Хи-Квадрат установлено достоверное соответствие выборок значений флуктуирующей асимметрии на ПП № 9 и № 25 ($\chi^2 = 7.09178$, $p = 0.21390$ и $\chi^2 = 4.50375$, $p = 0.47938$ соответственно) (рис. 3, 4).

Распределения многих показателей и индексов асимметрии, как правило, не подчиняются нормальному закону [16, 17]. В связи с этим в исследованиях асимметрии иногда применяют различные дополнительные преобразования для перевода ненормально распределенных показателей

Таблица 3. Статистические показатели выборки интегрального показателя флуктуирующей асимметрии листа *Betula pendula*
 Table 3. Statistical indicators of the samples of *Betula pendula* leaf fluctuating asymmetry integrated index

№ ПП № SP	Среднее Mean	Доверительный уровень Confidence level		Медиана Median	Дисперсия Variance	Стандартное отклонение Std. dev.	Коэффициент асимметрии Skewness	Коэффициент эксцесса Kurtosis	Диапазон Range	
		-95.000%	+95.000%						Min	Max
1	0.2292	0.0115	0.4469	0.2111	0.0119	0.1092	0.6044	-0.4007	0.0710	0.5046
2	0.2386	0.0119	0.4654	0.2224	0.0120	0.1094	0.4827	-0.5501	0.0507	0.5419
3	0.1138	0.0057	0.2219	0.0971	0.0038	0.0617	3.0374	15.4428	0.0399	0.5035
4	0.2547	0.0127	0.4966	0.2307	0.0176	0.1327	0.3056	-1.1657	0.0615	0.5260
5	0.1348	0.0067	0.2628	0.1184	0.0047	0.0688	1.4135	1.7920	0.0411	0.3754
6	0.2467	0.0123	0.4811	0.2172	0.0139	0.1178	0.3870	-0.9872	0.0508	0.4919
7	0.2437	0.0122	0.4752	0.2045	0.0159	0.1261	0.6848	-0.6813	0.0691	0.5387
8	0.1628	0.0081	0.3175	0.1367	0.0080	0.0892	1.7879	3.3102	0.0495	0.4935
9	0.2214	0.0111	0.4318	0.1871	0.0148	0.1217	0.8287	-0.1185	0.0540	0.5353
10	0.1521	0.0076	0.2965	0.1395	0.0049	0.0701	1.2941	2.2098	0.0553	0.4218
11	0.2628	0.0131	0.5124	0.2436	0.0154	0.1239	0.3289	-0.8269	0.0633	0.5452
12	0.1871	0.0094	0.3648	0.1738	0.0087	0.0931	1.0392	0.9856	0.0566	0.5205
13	0.2324	0.0116	0.4532	0.2052	0.0118	0.1086	0.7111	0.1407	0.0357	0.5288
14	0.1666	0.0083	0.3248	0.1463	0.0064	0.0802	1.1743	1.2855	0.0564	0.4499
15	0.1407	0.0070	0.2744	0.1217	0.0039	0.0624	0.9167	0.0764	0.0545	0.3074
16	0.2135	0.0107	0.4163	0.1775	0.0138	0.1174	0.6537	-0.6092	0.0488	0.5302
17	0.1406	0.0070	0.2741	0.1318	0.0039	0.0625	1.4018	2.0069	0.0579	0.3408
18	0.1538	0.0077	0.2999	0.1448	0.0036	0.0603	0.7972	0.1684	0.0669	0.3183
19	0.2316	0.0116	0.4516	0.2130	0.0125	0.1120	0.5347	-0.4149	0.0541	0.5460
20	0.1594	0.0080	0.3108	0.1385	0.0057	0.0754	1.4090	2.4364	0.0572	0.4650
21	0.2370	0.0119	0.4622	0.2217	0.0150	0.1224	0.3632	-0.9041	0.0592	0.5379
22	0.1354	0.0068	0.2640	0.1213	0.0042	0.0647	1.7351	4.5128	0.0410	0.4368
23	0.1583	0.0079	0.3087	0.1324	0.0080	0.0892	1.1139	1.1283	0.0460	0.4835
24	0.1436	0.0072	0.2799	0.1215	0.0062	0.0786	1.8910	4.8263	0.0413	0.4952
25	0.0877	0.0044	0.1710	0.0836	0.0007	0.0263	0.6473	0.0533	0.0361	0.1566

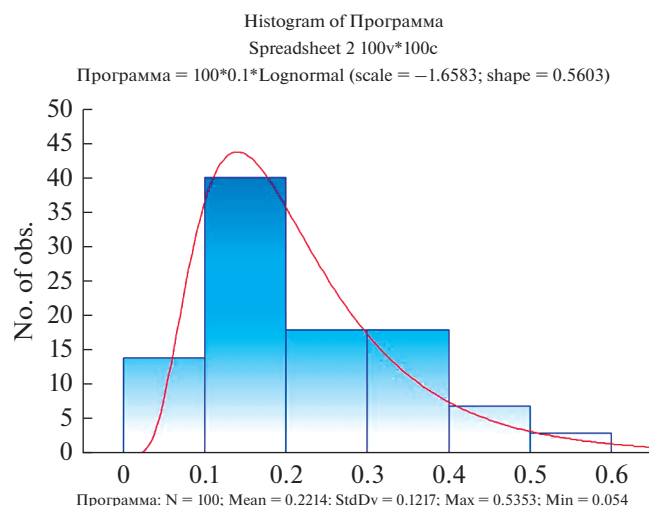


Рис. 3. Гистограмма распределения значений флуктуирующей асимметрии на ПП № 9 и кривая логнормального распределения.

Fig. 3. Histogram of the distribution of fluctuating asymmetry values at SP 9 and the log-normal distribution curve.

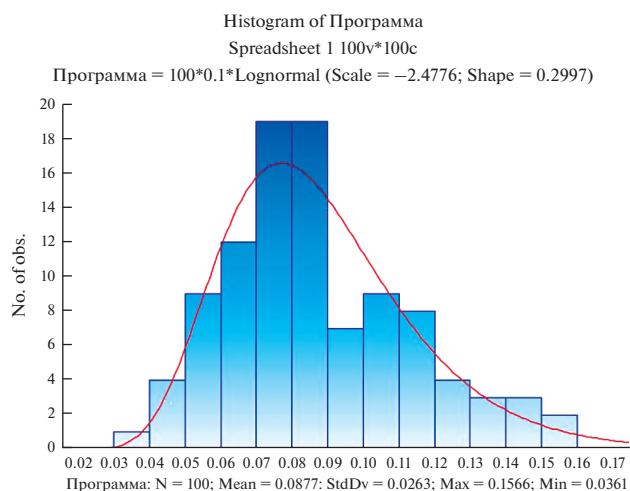


Рис. 4. Гистограмма распределения значений флуктуирующей асимметрии на ПП № 25 и кривая логнормального распределения.

Fig. 4. Histogram of the distribution of fluctuating asymmetry values at SP 25 and the log-normal distribution curve.

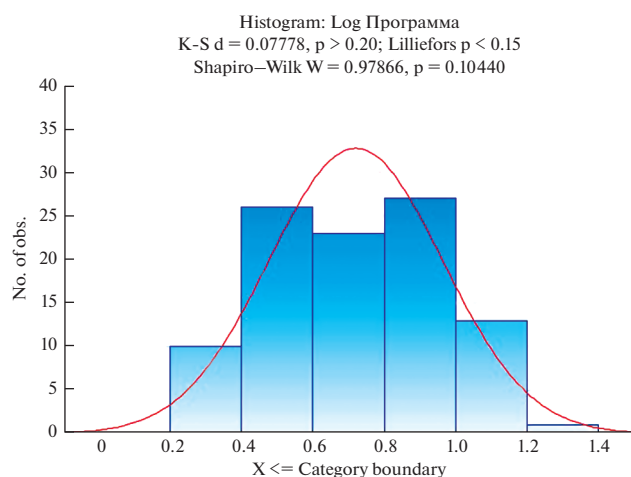


Рис. 5. Гистограмма распределения логарифмированных значений флуктуирующей асимметрии на ПП № 9 и кривая нормального распределения.

Fig. 5. Histogram of the distribution of logarithmic values of fluctuating asymmetry at SP 9 and the normal distribution curve.

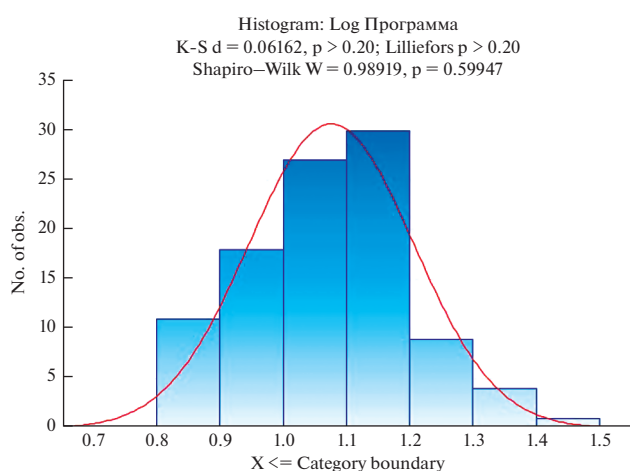


Рис. 6. Гистограмма распределения логарифмированных значений флуктуирующей асимметрии на ПП № 25 и кривая нормального распределения.

Fig. 6. Histogram of the distribution of logarithmic values of fluctuating asymmetry at SP 25 and the normal distribution curve.

в форму нормального распределения (например, логарифмические трансформации).

Результаты проверки статистического анализа гипотезы о виде распределения, подтверждают нормальность распределения выборок после логарифмирования данных (рис. 5, 6). Тест на нормальность по критерию Хи-Квадрат ($\chi^2 = 4.47817$, $p = 0.61225$) и Шапиро-Уилка ($W = 0.97865$, $p = 0.1044$) позволяет подтвердить гипотезу о нор-

мальном распределении после логарифмирования данных выборки ПП № 9 и выборки ПП № 25 ($\chi^2 = 2.07830$, $p = 0.35375$; $W = 0.98918$, $p = 0.5995$).

Значение асимметрии и соответствующий ей логарифм асимметрии характеризуют листовую пластинку.

Результаты проверки гипотезы о равенстве средних для выборок ПП № 9 и № 25 подтверждают, основываясь на численном значении Р-ста-

Таблица 4. Балльная шкала оценки значений логарифма флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula***Table 4.** Scoring scale for assessing the logarithmic values of *Betula pendula* leaf fluctuating asymmetry

Диапазоны модулей логарифма ФА Ranges of FA logarithm moduli	Балл Score
0.636–0.724	5
0.724–0.812	4
0.812–0.900	3
0.900–0.988	2
0.988–1.076	1

тистики равно 0.00, что имеется статистически существенная разница значений средних, полученных по этим выборкам.

Показатель флуктуирующей асимметрии, полученный с помощью программного обеспечения Matlab

Для построение балльной оценочной шкалы были выявлены минимальные и максимальные значения логарифма асимметрии листовой пластинки и размах этих значений разбит на диапазоны (табл. 4). Проведено сопоставление численных значений границ диапазонов оценочной шкалы со средним значением логарифма показателя флуктуирующей асимметрии каждой ПП.

Таблица 5. Балльная оценка среднего показателя флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula*

№ ПП № SP	Средние значения показателя флуктуирующей асимметрии на ПП Average values of the fluctuating asymmetry index at the SP	Средний логарифм величины флуктуирующей асимметрии Mean logarithm of fluctuating asymmetry	Модуль логарифма Logarithm modulus	Балл Score
1	0.229	–0.692	0.692	5
2	0.239	–0.672	0.672	5
3	0.114	–0.989	0.989	1
4	0.255	–0.660	0.660	5
5	0.135	–0.919	0.919	2
6	0.247	–0.663	0.663	5
7	0.244	–0.671	0.671	5
8	0.163	–0.838	0.838	3
9	0.221	–0.720	0.720	5
10	0.152	–0.860	0.860	3
11	0.263	–0.636	0.636	5
12	0.187	–0.779	0.779	4
13	0.232	–0.684	0.684	5
14	0.167	–0.829	0.829	3
15	0.141	–0.891	0.891	3
16	0.213	–0.739	0.739	4
17	0.141	–0.889	0.889	3
18	0.154	–0.845	0.845	3
19	0.232	–0.691	0.691	5
20	0.159	–0.840	0.840	3
21	0.237	–0.692	0.692	5
22	0.135	–0.910	0.910	2
23	0.158	–0.865	0.865	3
24	0.144	–0.895	0.895	3
25	0.088	–1.076	1.076	1

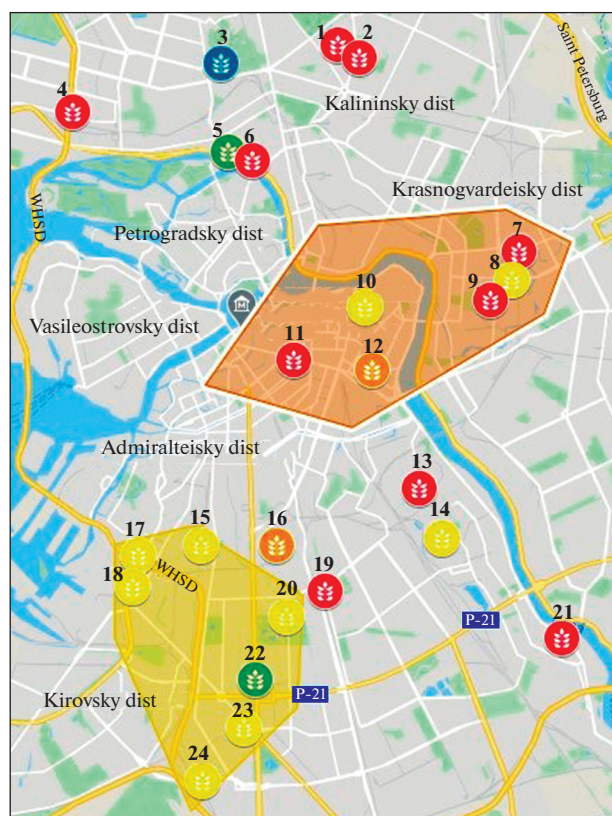


Рис. 7. Распределение уровней загрязнения на территории г. Санкт-Петербурга, согласно данным о величине ФА листьев *Betula pendula*. Балльная оценка ПП: красный – 5, оранжевый – 4, желтый – 3, зеленый – 2, синий – 1.

Fig. 7. Distribution of pollution in St. Petersburg, according to the data on *Betula pendula* leaf fluctuating asymmetry values. SP score: red – 5, orange – 4, yellow – 3, green – 2, blue – 1.

Для ПП получено заключение о среднем показателе ФА листовой пластинки в виде балльной оценки (табл. 5).

Наиболее часто встречаются показатели логарифма асимметрии листьев от 0.812 до 0.900 и от 0.636 до 0.724 – соответственно 3 и 5 баллов. Наиболее высокое значение средней ФА листьев получено для ПП № 11 и составило 0.263. Контрольная ПП № 25 имеет наименьший показатель

Таблица 6. Шкала оценки площади листовой пластинки *Betula pendula*

Table 6. Scoring scale of *Betula pendula* leaf blade area

Диапазон средней площади листа, см ² Range of average sheet area, cm ²	Балл Score
15.54–17.93	5
17.93–20.32	4
20.32–22.71	3
22.71–25.11	2
25.11–27.50	1

флуктуирующей асимметрии листа – 0.088, наибольшую величину его логарифма и наименьший балл (табл. 5).

По результатам картирования ПП с разными значениями параметра асимметрии листья березы повислой с помощью Google maps, можно выделить несколько районов, в которых прослеживается закономерность распределения баллов флуктуирующей асимметрии (рис. 7). В юго-западной части города преобладают объекты с 3-м баллом асимметрии. На этих участках отмечено низкое атмосферное загрязнение и средняя загрязненность почв свинцом и тяжелыми металлами. В центральной части преобладают ПП с 4-м и 5-м баллами; на этих участках присутствует загрязнение нефтепродуктами, отмечена высокая антропогенная и транспортная нагрузка. Для северной части города характерен разброс по баллам ПП. По направлению с северо-запада на северо-восток наблюдается переход от 5-го к 1–2-ому и снова к 5-му баллу. На всех ПП в этой части города, имеющих высокий балл асимметрии, присутствует высокий уровень загрязнения почв тяжелыми металлами (превышение ПДК в 25 раз).

Наибольшим показателем асимметрии характеризуется ПП № 11. На данном участке наблюдается загрязнение почв нефтепродуктами (превышение ПДК более чем в 2 раза), зафиксировано превышение ПДК для Рb в 7 раз (150–300 мг/кг), для бензапирена – в 25 раз (0.04–0.06 мг/кг), для тяжелых металлов – в 25 раз (128–300 мг/кг).

Для контрольной ПП № 25, расположенной за чертой города, характерен, как уже говорилось, наименьший показатель флуктуирующей асимметрии.

Показатель площади листовых пластинок, полученный с помощью программного обеспечения Matlab

Предварительный тест на нормальность распределения величин площади листовых пластинок березы повислой по критериям Хи-Квадрат и Шапиро–Уилка ($\chi^2 = 5.27396$, $p = 0.50919$; $W = 0.97886$, $p = 0.1084$) позволяет подтвердить гипотезу о нормальном распределении этого параметра в выборке ПП № 9 (случайная пробная площадка) и выборке ПП № 25 (контрольная точка) ($\chi^2 = 10.35026$, $p = 0.11066$; $W = 0.96146$, $p = 0.0051$). Аналогичный вывод получен при оценке по критерию согласия Колмогорова–Смирнова: данные выборки ПП № 9 ($D = 0.06435$, $p > 0.2$) и № 25 ($D = 0.09551$, $p > 0.2$) соответствуют нормальному распределению.

Для оценки изменения площади листовых пластинок *Betula pendula* были вычислены средние значения, размах средних значений разбит на 5 диапазонов (табл. 6). Для каждой ПП получено

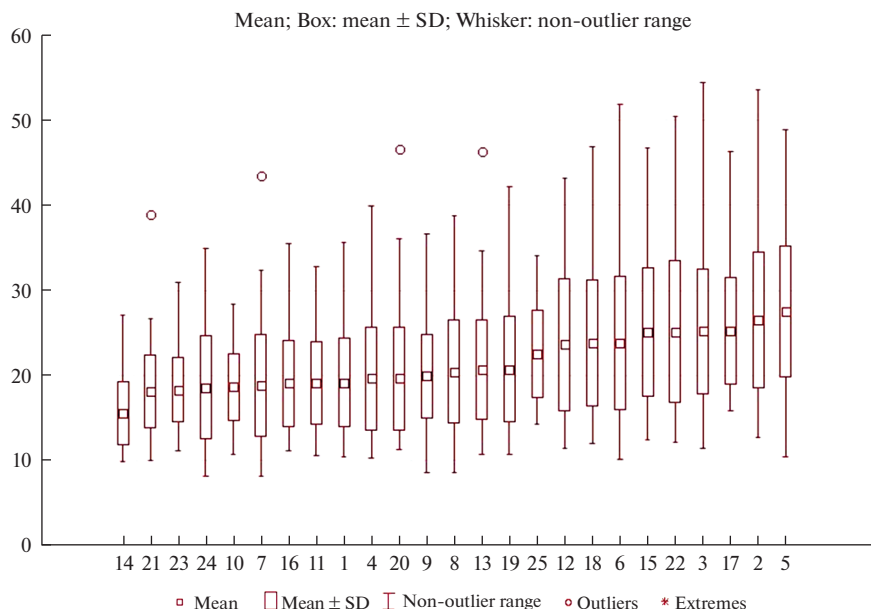


Рис. 8. Средняя площадь листовых пластинок *Betula pendula*.
По горизонтали – номер ПП; по вертикали – площадь листа, см².
Fig. 8. Average *Betula pendula* leaf blade area.
X-axis – SP number; y-axis – leaf blade area, cm².

заключение о средней площади листовой пластинки в виде балльной оценки (табл. 7).

Наиболее часто встречается 4-й балл – площадь листьев от 17.93 до 20.32 см². Наибольшее значение средней площади получено для ПП № 5 и составило 27.5 см². Контрольная ПП № 25 имеет средний балл и средний показатель площади листа (рис. 8).

Можно выделить 2 участка, на которых близко расположенные ПП имеют большую среднюю площадь листовых пластинок по сравнению с контрольной ПП № 25 (рис. 9). Первый участок – это пробные площади №№ 3, 5, 6, расположенные вблизи станции автоматического мониторинга (САМ) 1, где не зафиксировано превышений ПДК по содержанию токсичных газов в атмосферном воздухе, но при этом имеются данные о превышении ПДК по содержанию свинца, бензапирена и цинка в почве. Второй участок – ПП №№ 15, 17, 18, расположенные в окрестностях САМ 5, где выявлено превышение ПДК по содержанию в воздухе оксида азота и озона, и, кроме того, превышение ПДК по содержанию в почвах свинца, бензапирена, диоксинов, радона и цинка.

Среди исследователей нет единого мнения на счет влияния загрязнения на площадь листовой пластинки растений. Имеются сведения о тенденции к увеличению длины, ширины и площади листьев, в том числе у *Betula pendula*, под влиянием загрязнения [18]. По полученным данным наименьшая средняя площадь листовой пластинки отмечена на ПП № 14 и составила 15.54 см². Согласно картам почвенного загрязнения, это

Таблица 7. Балльная оценка средней площади листовых пластинок *Betula pendula*
Table 7. Score of *Betula pendula* average leaf blade area

№ ПП № SP	Средняя площадь листьев, см ² Average leaf blade area, cm ²	Балл Score
1	19.17	4
2	26.56	1
3	25.17	1
4	19.62	4
5	27.50	1
6	23.85	2
7	18.87	4
8	20.48	3
9	19.93	4
10	18.62	4
11	19.15	4
12	23.60	2
13	20.69	3
14	15.54	5
15	25.10	2
16	19.06	4
17	25.23	1
18	23.78	2
19	20.70	3
20	19.67	4
21	18.15	4
22	25.17	1
23	18.30	4
24	18.60	4
25	22.53	3



Рис. 9. Результаты балльного оценивания ПП по площади листовых пластинок *Betula pendula* на территории г. Санкт-Петербурга: красный – 5, оранжевый – 4, желтый – 3, зеленый – 2, синий – 1.

Fig. 9. The results of the sample plots scoring by *Betula pendula* leaf blades area in St. Petersburg: red – 5, orange – 4, yellow – 3, green – 2, blue – 1.

единственная ПП, где индекс суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами (Z_c) превышает 300 ед., при том, что ПДК по данному показателю составляет 16 ед. Зависимость показателя площади листовой пластинки от расположения пункта или уровня атмосферного и почвенного загрязнения не прослеживается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для работы с программным обеспечением необходимы файлы цифровых фотографии серий листовых пластинок достаточного разрешения.

При наличии белых бликов, тени от листьев, черешков, для повышения контрастности изображения может понадобиться дополнительная обработка изображений в графическом редакторе. Используемая методика не требует применения особого оборудования и легко может быть освоена специалистами. По сравнению с традиционной методикой измерения 5-ти параметров листа, программное обеспечение на базе Matlab отличается высокой продуктивностью.

Анализ изменения площади листовых пластинок *Betula pendula* в г. Санкт-Петербурге не выявил зависимости этого показателя от расположения пробных площадок и уровня атмосферного загрязнения. В зоне максимального загрязнения почв тяжелыми металлами отмечена наименьшая средняя площадь листовой пластинки. На контрольной пробной площадке, расположенной за чертой города, выявлен средний показатель площади листа (балл 3).

Средний балл асимметрии листовой пластинки *B. pendula* в черте г. Санкт-Петербурга составил 3,6, что свидетельствует о достаточно высоком уровне загрязнения. Контрольная пробная площадка, расположенная за пределами города, отличается наименьшим показателем флуктуирующей асимметрии. Наиболее загрязненными, согласно величине показателя флуктуирующей асимметрии, являются центральный и восточный районы г. Санкт-Петербурга. В юго-западной части города наблюдается снижение показателя флуктуирующей асимметрии. В северной части города отмечен довольно широкий разброс показателей флуктуирующей асимметрии, что может указывать на большое количество локальных источников антропогенного воздействия на растения *Betula pendula*.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке научного проекта Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН № АААА-А19-119031290052-1 “Сосудистые растения Евразии: систематика, флора, растительные ресурсы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерофеева Е.А. 2015. Флуктуирующая асимметрия листа *Betula pendula* (Betulaceae) в условиях автотранспортного загрязнения (г. Нижний Новгород). – Растительные ресурсы. 51(3): 366–383. <http://elibrary.ru/item.asp?id=23700417>
2. Ерофеева Е.А., Наумова М.М. 2012. Сезонная динамика морфофизиологических показателей листа *Betula pendula* (Betulaceae) при автотранспортном загрязнении. – Растительные ресурсы. 48(1): 59–70. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17686701>
3. Собчак Р.О., Афанасьева Т.Г., Копылов М.А. 2013. Оценка экологического состояния рекреационных зон методом флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* Roth. – Вестн. Том. гос. ун-та. 368: 195–199. http://journals.tsu.ru/vestnik/&journal_page=archive&id=881&article_id=1155
4. Гелашвили Д.Б., Лобанова И.В., Ерофеева Е.А., Наумова М.М. 2007. Влияние лесопатологического состояния березы повислой на величину флуктуирующей асимметрии листовой пластинки. – Поволжский экологический журн. 2: 106–115. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9483780>

5. Мандра Ю.А., Еременко Р.С. 2010. Биоиндикационная оценка состояния окружающей среды города Кисловодска на основе анализа флуктуирующей асимметрии. — Известия Самарского научного центра РАН. 12(1–8): 1990–1994. http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2010/2010_1_1990_1994.pdf
6. Бойко А.А. 2004. Оценка стабильности развития листьев березы повислой в условиях аэротехногенного загрязнения окружающей среды. — Вестник МГУЛ. Лесной вестник. 5(36): 121–123. https://les-vest.msfu.ru/les_vest/2004/Les_vest_5_2004.pdf
7. Амосова И.Б., Феклистов П.А. 2010. Асимметрия листовой пластинки березы повислой у особей разного возрастного состояния в пригородных лесах г. Архангельска. — Известия ВУЗов. Лесной журн. 2: 60–66. <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/599/59997e883ce455b8cbc903c1d12b0687.pdf>
8. Шабалина О.М., Демьяненко Т.Н. 2011. Оценка влияния загрязнения среды и почвенных факторов на показатели флуктуирующей асимметрии листа березы повислой (*Betula pendula* Roth) в г. Красноярске. — Вестник КрасГАУ. 12(63): 135–140. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17240811>
9. Коротеева Е.В., Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Чащина О.Е. 2015. В градиенте влияния выбросов Карабашского медеплавильного комбината изменяется размер, но не флуктуирующая асимметрия листа березы повислой. — Докл. РАН. 460(3): 364–367. <https://doi.org/10.7868/S0869565215020279>
10. Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Чащина О.Е., Коротеева Е.В. 2016. Влияние выбросов Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) на размер и флуктуирующую асимметрию листа подроста *Betula pendula* (Betulaceae). — Растительные ресурсы. 52(1): 109–124. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25407839>
11. Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E. 2010. Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications. — Symmetry. 2(2): 466–540. <https://doi.org/10.3390/sym2020466>
12. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). 2003. — Распоряжение Росэкологии от 16.10.2003 № 460. М. 24 с.
13. Самаркина Е.И., Самаркин А.И., Соколова И.Г., Жаров И.Н. 2019. Методика измерения параметров листовых пластинок по цифровому изображению с использованием специализированного программного обеспечения. — Растительные ресурсы. 4(55): 537–547. <https://doi.org/10.1134/S0033994619040101>
14. Экологический портал Санкт-Петербурга. <http://www.infoeco.ru/index.php?id=53>
15. Экологическая обстановка в районах Санкт-Петербурга. 2003. СПб. 720 с.
16. Гелашивили Д.Б., Чупрунов Е.В., Иудин Д.И. 2004. Структурные и биоиндикационные аспекты флуктуирующей асимметрии билатерально симметричных организмов. — Журн. общ. биол. 65(5): 433–441. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17641674>
17. Урбах В.Ю. Биометрические методы. 1964. М. 415 с.
18. Соколова Г.Г., Ерёмкина А.А. 2014. Влияние загрязнения воздушной среды на развитие листьев древесных растений в условиях г. Горно-Алтайска. — Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 13: 208–213. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22657238>

Assessing the State of Urban Environment in Saint-Petersburg by the Indicator of *Betula pendula* (Betulaceae) Leaf Fluctuating Asymmetry

M. M. Dorofeeva^{a, b, *}, S. A. Bonetskaya^b

^a Komarov Botanical Institute Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

^b Saint Petersburg state forest engineering University, Saint-Petersburg, Russia

*e-mail: dorofeevamm@gmail.com

Abstract—Using digital image processing techniques (Samarkina et al., 2019), *Betula pendula* Roth leaf blade parameters were measured, and their area and fluctuating asymmetry indicators were calculated for 25 sample plots in St. Petersburg. We used Matlab-based software that automatically calculates leaf area and leaf blade asymmetry index using the matching points position on the right and left edges of the leaf blade. The high prospects of the method as compared to the traditional measuring of five leaf parameters have been noted. The technique does not require using special equipment and can be easily learned by specialists.

Keywords: leaf area, fluctuating asymmetry, determination methods, computer technology, *Betula pendula*, St. Petersburg

ACKNOWLEDGMENTS

This study was conducted as part of the State research assignment to the Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences: research topic “Vascular plants of Eurasia: taxonomy, flora, plant resources” (No. AAAA-A19-119031290052-1).

REFERENCES

1. Erofeeva E.A. 2015. Dependence of leaf fluctuating asymmetry of *Betula pendula* (Betulaceae) on motor traffic pollution intensity. – Rastitelnye resursy. 51(3): 366–383. <http://elibrary.ru/item.asp?id=23700417> (In Russian)
2. Erofeeva E.A., Naumova M.M. 2012. Seasonal dynamics of morphological and physiological parameters of *Betula pendula* (Betulaceae) leaf under traffic pollution. – Rastitelnye resursy. 48(1): 59–70. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17686701> (In Russian)
3. Sobchak R.O., Afanasyeva T.G., Kopylov M.A. 2013. [Evaluation of recreation areas ecological state by method of *Betula pendula* Roth leaves fluctuating asymmetry]. – Tomsk State University J. 368: 195–199. http://journals.tsu.ru/vestnik/en/&journal_page=archive&id=881&article_id=1155 (In Russian)
4. Gelashvili D.B., Lobanova I.V., Erofeeva E.A., Naumova M.M. 2007. [Influence of phytopathologic state of *Betula pendula* Roth on fluctuating asymmetry of its leaf laminae]. – Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal. 2: 106–115. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9483780> (In Russian)
5. Mandra Yu.A., Eremenko R.S. 2010. Bioindicator estimation the state of the environment in Kislovodsk City on the basis of fluctuating dissymmetry analysis. – Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 12(1–8): 1990–1994. http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2010/2010_1_1990_1994.pdf (In Russian)
6. Boyko A.A. 2004. [Assessment of the stability of *Betula pendula* Roth leaf development under aerotechnogenic environmental pollution]. – Lesnoy Vestnik / Forestry Bulletin. 5(36): 121–123. https://les-vest.msfu.ru/les_vest/2004/Les_vest_5_2004.pdf (In Russian)
7. Amosova I.B., Feklistov P.A. 2010. Leaf plate asymmetry of silver birch of various age in Arkhangelsk suburban forests. – Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 2: 60–66. <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/599/59997e883ce455b8cbc903c1d12b0687.pdf> (In Russian)
8. Shabalina O.M., Demyanenko T.N. 2011. Estimation of environment pollution and soil factor influence on the indicators of the drooping birch (*Betula pendula* Roth) leaf fluctuating asymmetry in Krasnoyarsk. – The Bulletin of KrasGAU. 12(63): 135–140. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17240811> (In Russian)
9. Koroteeva E.V., Veselkin D.V., Kuyanceva N.B., Chashchina O.E. 2015. The size, but not the fluctuating asymmetry of the leaf, of silver birch changes under the gradient influence of emissions of the Karabash Copper Smelter Plant. – Doklady Biological Sciences. 460(1): 36–39. <https://doi.org/10.1134/S0012496615010056>
10. Veselkin D.V., Kuyanteva N.B., Chashchina O.E., Koroteeva E.V. 2016. Impact of Karabash copper smelter emissions on leaf size and fluctuating asymmetry of *Betula pendula* (Betulaceae) undergrowth. – Rastitelnye resursy. 52(1): 109–124. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25407839> (In Russian)
11. Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E. 2010. Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications. – Symmetry. 2(2): 466–540. <https://doi.org/10.3390/sym2020466>
12. [Methodological recommendations for assessing the quality of the environment according to the state of living beings (assessment of the stability of the development of living organisms by the level of asymmetry of morphological structures)]. 2003. – Directive of Rosecologiya dated October 16, 2003 No. 460. Moscow. 24 p. (In Russian)
13. Samarkina E.I., Samarkin A.I., Sokolova I.G., Zharov I.N. 2019. Method for measuring leaf blade parameters by digital images using dedicated software. – Rastitelnye resursy. 4(55): 537–547. <https://doi.org/10.1134/S0033994619040101> (In Russian)
14. Ecological portal of St. Petersburg. <http://www.infoeco.ru/index.php?id=53> (In Russian)
15. [Ecological situation in the districts of St. Petersburg]. 2003. Saint Petersburg. 720 p. (In Russian)
16. Gelashvili D.B., Chuprunov E.V., Iudin D.I. 2004. Structural and bioindicative aspects of fluctuated asymmetry of bilateral organisms. – Zh. Obshch. Biol. 65(5): 433–441. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17641674> (In Russian)
17. Urbah V.Yu. [Biometric methods]. 1964. Moscow. 415 p. (In Russian)
18. Sokolova G.G., Eryomina A.A. 2014. The influence of air pollution on the development of woody plant leaves under conditions of Gorno-Altaysk City. – Problems of Botany of South Siberia and Mongolia. 13: 208–213. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22657238> (In Russian)