

УДК 57.025:574.24:504.064.2:502.057:519.876

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СРЕДЫ ПО ФЛЮКТУИРУЮЩЕЙ АСИММЕТРИИ ЛИСТЬЕВ БЕРЕЗЫ

Мазуркин П.М.

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, e-mail: kaf_po@mail.ru

Кратко представлены способы экологической оценки качества окружающей растущие березы среды по флюктуирующей асимметрии листьев после их остановки в росте. В сравнении со средними значениями измерения параметров у каждого из пяти листьев от не менее чем трех берез повышается точность моделирования и снижается трудоемкость измерений. Флюктуирующую асимметрию можно уловить статистическим моделированием из гораздо меньшего объема измерений. Наименьший объем измерений мы рекомендуем 15 (три дерева по пять разных по крупности листьев из разных мест). Это позволит снизить объем измерений в $100 / 15 \approx 7$ раз. Преимуществом предлагаемых способов по нашим патентам на изобретения является техническая простота исполнения, так как из оборудования требуется только измерительный циркуль и геодезический транспортир со шкалой деления 0,1 мм. Поэтому изобретение может быть широко реализовано в школьных экологических кружках, пришкольных лесничествах и даже в детских садах, а также в географических и иных экспедициях при исследовании качества территории по свойствам листвы берез. На способы получены патенты на изобретения Российской Федерации 2549779, 2556980, 2556985, 2556987, 2569748.

Ключевые слова: три березы, по пять листьев, 10 параметров, факторный анализ, закономерности

ECOLOGICAL METHODS OF ASSESSING THE QUALITY OF THE ENVIRONMENT FOR FLUCTUATING ASYMMETRY OF BIRCH LEAVES

Mazurkin P.M.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: kaf_po@mail.ru

The methods of environmental assessment of the quality of the surrounding growing birch medium by fluctuating asymmetry of the leaves after they stop growing are briefly presented. In comparison with the average values of the measurement parameters for each of the five leaves from at least three birch trees, the accuracy of modeling increases and the complexity of measurements decreases. The fluctuating asymmetry can be captured by statistical modeling from a much smaller volume of measurements. The smallest measurement we recommend is 15 (three trees with five differently sized leaves from different places). This will reduce the volume of measurements 100/15 7 times. The advantage of the proposed methods according to our patents for inventions is the technical simplicity of execution, since the equipment requires only a measuring compass and a geodetic protractor with a scale of division of 0.1 mm. Therefore, the invention can be widely implemented in school ecological circles, school forest districts, and even in kindergartens, as well as in geographical and other expeditions in the study of the quality of the territory on the properties of birch foliage. The methods obtained patents for inventions of the Russian Federation 2549779, 2556980, 2556985, 2556987, 2569748.

Keywords: three birch trees, five leaves each, 10 parameters, factor analysis, regularities

В экологических технологиях с использованием листьев березы повислой [1–3] постепенно приходит понимание необходимости моделирования взаимных связей между параметрами структуры листьев растений методом идентификации [4].

Наши российские изобретения 2549779, 2556980, 2556985, 2556987, 2569748 (соавтор – студентка [5–7]) относятся к инженерной биологии и биоиндикации окружающей среды измерениями качества ростовых органов различных видов растений, преимущественно древесных, например проб в виде листьев берез с простой и небольшой листовой пластинкой.

Технический результат – повышение точности индикации качества окружающей листья березы локальной среды, а также упрощение и повышение производительности измерений параметров листьев. Таким образом, мы полностью восстанавливаем принцип индивидуальности биологических

измерений по геометрии флуктуации каждого листа.

Методика измерений и анализа

На рис. 1 приведена схема измерений каждого листа: 1 – ширина левой b' и правой b'' половинок листа (измерение проводили посередине листовой пластинки), мм; 2 – длина $l'_ж$ и $l''_ж$ второй от основания листа жилки второго порядка, мм; 3 – расстояние $l'_{осн}$ и $l''_{осн}$ между основаниями первой и второй жилок второго порядка, мм; 4 – расстояние $l'_к$ и $l''_к$ между концами этих жилок, мм; 5 – угол α' и α'' между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка.

Сбор материала следует проводить после остановки роста листьев (в средней полосе начиная с июля).

Для экологической оценки антропогенного воздействия на территории принимают не менее трех берез примерно в одинаковых

условиях местопроизрастания. С каждой березы принимают не менее пяти листьев разных размеров со стороны оцениваемой территории. Затем измерения по пяти параметрам листа проводят с применением геодезического транспортира с ценой деления мерной шкалы 0,1 мм, причем все не менее 15 листьев принимают за популяцию из отдельных самостоятельных особей. Поэтому далее составляют таблицу результатов измерений без усреднения измеренных значений.

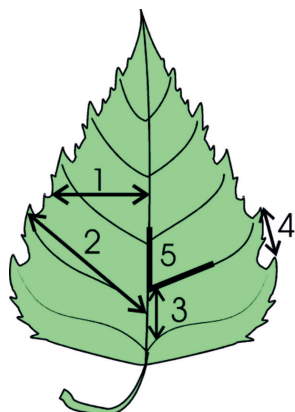


Рис. 1. Схема измерений листа

Полученную выборку статистическим моделированием подвергают факторному анализу выявлением бинарных отношений между 10 показателями, причем все 100 за-

кономерностей идентифицируют в программной среде CurveExpert-1.40 двухчленной формулой вида

$$y = a_1 x^{a_2} \exp(-a_3 x^{a_4}) + a_5 x^{a_6} \exp(-a_7 x^{a_8}), \quad (1)$$

где y – показатель или зависимый количественный фактор (10 параметров по пяти показателям с двух половинок листа); x – объясняющая переменная или влияющий фактор (те же 10 параметров от каждого листа); $a_1 \dots a_8$ – параметры модели, получаемые идентификацией.

По результатам факторного анализа выявлением бинарных отношений между 10 показателями выполняют экологическую оценку территории по коэффициенту коррелятивной вариации, а затем из 100 биотехнических закономерностей отбирают имеющие коэффициент корреляции не менее 0,7 и рассматривают попарно пять параметров листа, а также экологическую оценку проводят по отличиям между структурой и параметрами уравнений.

Результаты измерений в чистой зоне города Звенигово Республики Марий Эл

По принципу индивидуальности каждого листа в табл. 1 занесены результаты измерения параметров 15 листьев всего у трех берез в чистой зоне.

Полный факторный анализ включает 10 факторов и $10^2 = 100$ факторных отношений. Для всех них уравнение имеет вид формулы (1).

Таблица 1

Результаты промеров листьев березы, произрастающих в чистой зоне города (по 5 листьев с 3 растений)

№ дерева	№ листа	Ширина b , мм		Длина $l_{ж}$, мм		Расстояние $l_{осн}$, мм		Расстояние $l_{к}$, мм		Угол α , град	
		левой b'	правой b''	левой $l'_{ж}$	правой $l''_{ж}$	левой $l'_{осн}$	правой $l''_{осн}$	левой l'_k	правой l''_k	левой α'	правой α''
1	1	18	17	32	30	8	8	10	10	30	28
	2	19	21	33	36	9	8	12	13	34	39
	3	22	19	36	32	6	8	14	14	37	33
	4	17	20	31	31	5	7	13	11	44	34
	5	16	17	29	31	12	11	12	16	30	31
2	6	16	17	28	29	5	6	10	10	34	37
	7	17	15	31	29	3	2	10	9	43	37
	8	18	18	33	32	5	5	11	9	37	36
	9	16	19	28	32	5	5	10	11	38	42
	10	23	21	37	40	5	6	12	13	38	37
3	11	18	19	31	33	5	4	13	12	49	49
	12	17	16	30	30	5	4	10	11	46	43
	13	23	21	40	40	4	3	15	15	48	42
	14	16	20	37	35	6	8	13	12	44	44
	15	23	22	37	40	6	7	14	15	46	44

Таблица 2
Корреляционная матрица полного факторного анализа пластических признаков листьев березы для оценки состояния среды

Влияющие факторы x	Зависимые факторы (показатели y)										Сумма $\sum r_x$	Место I_x
	b'	b''	$l'_{ж}$	$l''_{ж}$	$l'_{очн}$	$l''_{очн}$	$l'_{к}$	$l''_{к}$	α'	α''		
Ширина b' , мм	1	0,6530	0,8105	0,8210	0,1700	0,0905	0,6621	0,6639	0,2740	0,1222	5,2672	6
Ширина b'' , мм	0,7179	1	0,7139	0,9185	0,2413	0,4052	0,7404	0,5721	0,4132	0,3913	6,1138	2
Длина $L'_{жк}$, мм	0,8058	0,6806	1	0,8340	0,2299	0,1746	0,7572	0,5652	0,4036	0,2785	5,7294	5
Длина $L''_{жк}$, мм	0,8175	0,9144	0,8133	1	0,3181	0,3546	0,7190	0,6315	0,3420	0,4419	6,3523	1
Расстояние $l'_{очн}$, мм	0,2712	0,4867	0,3173	0,2346	1	0,8960	0,1701	0,4796	0,6639	0,4962	5,0156	8
Расстояние $l''_{очн}$, мм	0,2776	0,4977	0,0818	0,2226	0,9262	1	0,2068	0,5337	0,6369	0,5953	4,9786	9
Расстояние $l'_{к}$, мм	0,5290	0,7585	0,7693	0,6791	0,4647	0,3308	1	0,7367	0,5290	0,2888	6,0859	3
Расстояние $l''_{к}$, мм	0,5851	0,7079	0,4921	0,6560	0,5585	0,4618	0,7553	1	0,2643	0,4204	5,9014	4
Угол α' , град	0,2573	0,3117	0,3686	0,3450	0,7079	0,6413	0,4834	0,1871	1	0,7796	5,0819	7
Угол α'' , град	0,1405	0,3644	0,2091	0,4233	0,4177	0,5406	0,2787	0,1283	0,7796	1	4,2822	10
Сумма $\sum r_y$	5,4019	6,3749	5,5759	6,1341	5,0343	4,8954	5,773	5,4981	5,3065	4,8142	54,8083	—
Место I_y	6	1	4	2	8	9	3	5	7	10	—	0,5480

Таблица 3
Корреляционная матрица сильных бинарных отношений пластических признаков листьев березы при условии $r \geq 0,7$

Влияющие факторы x	Зависимые факторы (показатели y)									
	b'	b''	$l'_{ж}$	$l''_{ж}$	$l'_{очн}$	$l''_{очн}$	$l'_{к}$	$l''_{к}$	α'	α''
Ширина b' , мм			0,8105	0,8210						
Ширина b'' , мм	0,7179		0,7139	0,9185			0,7404			
Длина $L'_{жк}$, мм	0,8058			0,8340						
Длина $L''_{жк}$, мм	0,8175	0,9144	0,8133				0,7190			
Расстояние $l'_{очн}$, мм						0,8960				
Расстояние $l''_{очн}$, мм					0,9262					
Расстояние $l'_{к}$, мм		0,7585	0,7693					0,7367		
Расстояние $l''_{к}$, мм		0,7079						0,7553		
Угол α' , град					0,7079					0,7796
Угол α'' , град									0,7796	

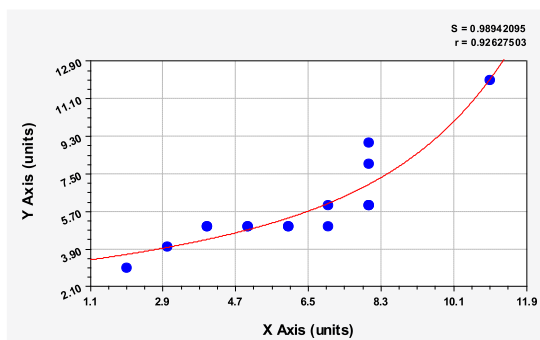


Рис. 2. График результата влияния $l''_{\text{осн}} \rightarrow l'_{\text{осн}}$

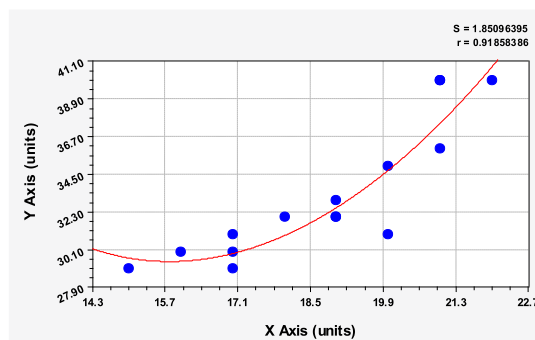


Рис. 3. График результата влияния $b'' \rightarrow l''_{\text{жс}}$

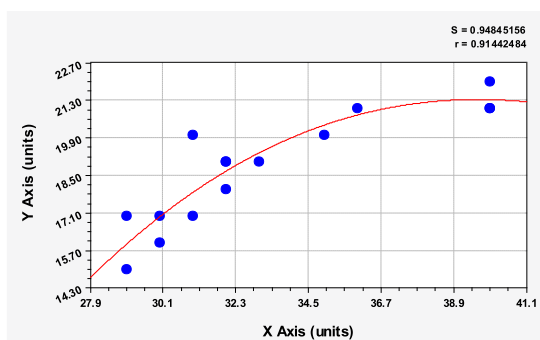


Рис. 4. График результата влияния $l''_{\text{жс}} \rightarrow b''$

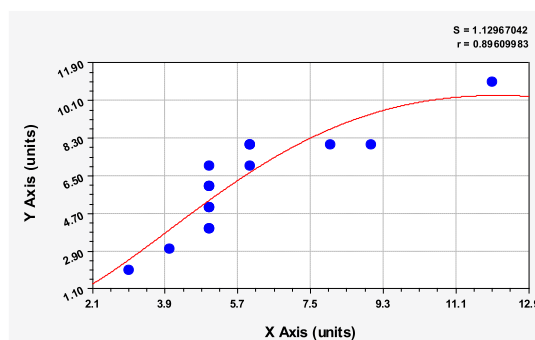


Рис. 5. График результата влияния $l'_{\text{осн}} \rightarrow l''_{\text{осн}}$

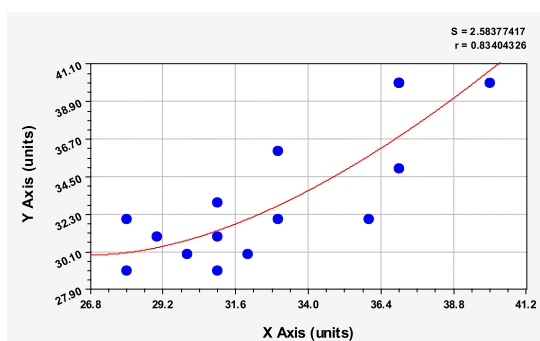


Рис. 6. График результата влияния $l'_{\text{жс}} \rightarrow l''_{\text{жс}}$

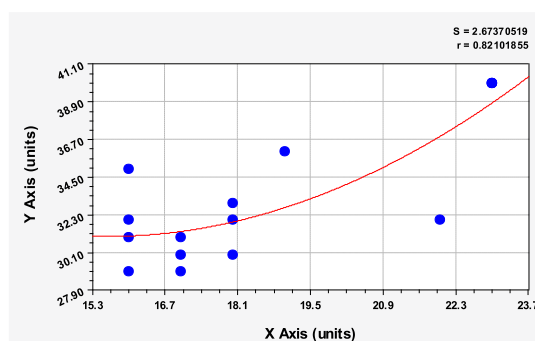


Рис. 7. График результата влияния $b' \rightarrow l''_{\text{жс}}$

Корреляционная матрица факторного анализа приведена в табл. 2.

Коэффициент коррелятивной вариации экологического множества из 15 листьев (по 5 листьев с 3 деревьев) равен $54,8083 / 10^2 = 0,5480$. Этот критерий применяется при сравнении различных мест взятия проб березовых листьев.

Анализ бинарных отношений между факторами

Для этого из данных табл. 2 исключим монарные отношения, оставив только бинарные отношения с сильными факторными связями (табл. 3) с коэффициентами корреляции не менее 0,7.

Остались 22 сильные бинарные зависимости. Наивысшей силой обладает формула биотехнической закономерности $l''_{\text{осн}} \rightarrow l'_{\text{осн}}$. Расстояние между основаниями первой и второй жилки с правой стороны листьев наибольшим образом влияет на расстояние между основаниями первой и второй жилки с левой стороны листьев.

Для примера на рис. 2 показан график результата влияния $l''_{\text{осн}} \rightarrow l'_{\text{осн}}$ расстояния между основаниями первой и второй жилки с правой стороны листьев на расстояние между основаниями первой и второй жилки с левой стороны листьев при проведении измерений по нашему способу на 15 листьях у трех берез. На рис. 3 показан график

результата $b'' \rightarrow l''_{\text{ж}}$ влияния ширины на правой стороне листьев на длину второй жилки на правой стороне листьев. На рис. 4 – график результата $l''_{\text{ж}} \rightarrow b''$ влияния длины второй жилки на правой стороне листьев на ширину на правой стороне листьев. На рис. 5 – график результата $l'_{\text{осн}} \rightarrow l''_{\text{осн}}$ влияния расстояния между основаниями первой и второй жилок с левой стороны листьев на расстояние между основаниями первой и второй жилок с правой стороны листьев. На рис. 6 – график результата $l'_{\text{ж}} \rightarrow l''_{\text{ж}}$ влияния длины второй жилки на левой стороне листьев на длину второй жилки на правой стороне листьев. На рис. 7 – график результата $b' \rightarrow l''_{\text{ж}}$ влияния ширины на левой стороне листьев на длину второй жилки на правой стороне листьев.

Сравнение предлагаемых способов с прототипом

Таким образом, сравнение показывает, что предлагаемая информационная техно-

логия по обработке значений одних и тех же параметров у отдельных листьев в $57 / 22 = 2,59$ раза строже по сравнению с прототипом. При этом коэффициент корреляции также в $0,7538 / 0,5480 = 1,38$ раза меньше, что указывает на лучшую изменчивость. Поэтому можно сделать вывод о том, что принятие средних арифметических значений параметров листьев березы до 100 (10 деревьев по 10 листочков) является искусственным, сглаживающим изменчивость флуктуирующей асимметрии. В реальности она намного вариабельнее.

Все 22 сильные связи в табл. 3 расположены без выпадения строки и образуют какой-то геометрический рисунок. Этот факт также указывает в пользу применения принципа индивидуальности, то есть без усреднения результатов экологических измерений.

Распишем формулы у 22 сильных бинарных факторных связей, ранжируя в табл. 4 по убыванию коэффициента корреляции.

Таблица 4

Параметры закономерностей сильных бинарных связей факторов

№ п/п	$x \rightarrow y$	$y = a_1 x^{a_2} \exp(-a_3 x^{a_4}) + a_5 x^{a_6} \exp(-a_7 x^{a_8})$								Кэф. корр.
		Первая составляющая				Вторая составляющая				
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	
1	$l''_{\text{осн}} \rightarrow l'_{\text{осн}}$	3,071555	0	0,071176	0	0,037407	0,39827	0,36397	0	0,9262
2	$b'' \rightarrow l''_{\text{ж}}$	216,90035	0	0,18129	0	0,48931	0,82839	0,079967	0	0,9185
3	$l''_{\text{ж}} \rightarrow b''$	0,13005	2,26719	0,057208	0	35,24084	0	0	0	0,9144
4	$l'_{\text{осн}} \rightarrow l''_{\text{осн}}$	0,37763	2,21272	0,18243	0	0	0	0	0	0,8960
5	$l'_{\text{ж}} \rightarrow l''_{\text{ж}}$	285,55703	0	0,13188	0	0,61588	0,94539	0,016692	0	0,8340
6	$b' \rightarrow l''_{\text{ж}}$	83,922	0	0,10854	0	0,62999	0,88169	0,050474	0	0,8210
7	$l''_{\text{ж}} \rightarrow b'$	429,19236	0	0,15290	0	0,25493	0,89348	0,028748	0	0,8175
8	$l''_{\text{ж}} \rightarrow l'_{\text{ж}}$	9,96212	0	0,019433	0	0,74876	1,025059	0,00041489	0	0,8133
9	$b' \rightarrow l'_{\text{ж}}$	45,87364	0	0,081235	0	0,85588	0,92382	0,029908	0	0,8105
10	$l'_{\text{ж}} \rightarrow b'$	0,0097932	2,10278	0,0099842	0	7,62307	0	0	0	0,8058
11	$\alpha' \rightarrow \alpha''$	5,52381	0	0,0057460	0	2,68220	0,62964	0,0054722	0	0,7796
12	$\alpha'' \rightarrow \alpha'$	1,99219	0	0,039772	0	1,065425	1,035282	0,010853	0	0,7796
13	$l'_{\text{к}} \rightarrow l'_{\text{ж}}$	33,97637	0	0,041107	0	0,39111	0,61879	0,15405	0	0,7693
14	$l'_{\text{к}} \rightarrow b''$	0,098318	3,010187	0,19554	0	2,58419	0	0	0	0,7585
15	$l''_{\text{к}} \rightarrow l'_{\text{к}}$	0,017059	3036064	0,19256	0	4,97922	0	0	0	0,7553
16	$b'' \rightarrow l'_{\text{к}}$	110,10051	0	0,40834	0	0,60848	1,01504	0,00041684	0	0,7404
17	$l'_{\text{к}} \rightarrow l''_{\text{к}}$	4,27876	0,78319	0,023133	0	10,46382	0	0	0	0,7367
18	$l''_{\text{ж}} \rightarrow l'_{\text{к}}$	0,087963	2,27808	0,058024	0	25,015367	0	0	0	0,7190
19	$b'' \rightarrow b'$	125,22754	0	0,16146	0	0,13403	0,73296	0,12324	0	0,7179
20	$b'' \rightarrow l'_{\text{ж}}$	138,011555	0	0,16128	0	0,75209	0,91987	0,043949	0	0,7139
21	$l''_{\text{к}} \rightarrow b''$	0,14397	3,050669	0,22213	0	0	0	0	0	0,7079
22	$\alpha' \rightarrow l'_{\text{осн}}$	33,68506	0	0,044599	0	0	0	0	0	0,7079

Матричное представление модели (1) компактное, но для наглядности распишем три первых бинарные связи по отдельности в виде формул:

– влияние расстояния между основаниями первой и второй жилок с правой стороны листьев на такое расстояние (рис. 2) с левой стороны листьев

$$l'_{\text{осн}} = 3,071555 \exp(0,071176l''_{\text{осн}}) + 0,037407l''_{\text{осн}}{}^{0,39827} \exp(0,39827l''_{\text{осн}}); \quad (2)$$

– влияние ширины на правой стороне листьев на длину второй жилки (рис. 3) на правой стороне листьев

$$l''_{\text{ж}} = 216,90035 \exp(0,18129b'') + 0,48931b''^{0,82839} \exp(0,079967b''); \quad (3)$$

– влияние длины второй жилки на правой стороне листьев на ширину на правой (рис. 4) стороне листьев

$$b'' = 0,13005l''_{\text{ж}}{}^{2,26719} \exp(-0,057208l''_{\text{ж}}) - 35,24084; \quad (4)$$

– влияние расстояния между основаниями первой и второй жилок с левой стороны листьев на расстояние между основаниями первой и второй жилок с правой стороны листьев

$$l''_{\text{осн}} = 0,37763l'_{\text{осн}}{}^{2,21272} \exp(-0,18243l'_{\text{осн}}); \quad (5)$$

– влияние длины второй жилки на левой стороне листьев на длину второй жилки на правой стороне листьев

$$l''_{\text{ж}} = 285,55703 \exp(-0,13188l'_{\text{ж}}) + 0,61588l'_{\text{ж}}{}^{0,94539} \exp(0,016692l'_{\text{ж}}); \quad (6)$$

– влияние ширины на левой стороне листьев на длину второй жилки на правой стороне этих же листьев

$$l''_{\text{ж}} = 83,922 \exp(-0,10854b') + 0,62999b'^{0,88169} \exp(0,050474b'); \quad (7)$$

– влияние длины второй жилки на правой стороне на ширину на левой стороне листьев

$$b' = 429,19236 \exp(-0,15290l'_{\text{ж}}) + 0,25493l'_{\text{ж}}{}^{0,89348} \exp(0,028748l'_{\text{ж}}); \quad (8)$$

– влияние длины второй жилки на правой стороне листьев на длину второй жилки на левой стороне листьев

$$l'_{\text{ж}} = 9,96212 \exp(-0,019433l''_{\text{ж}}) + 0,74876l''_{\text{ж}}{}^{1,025059} \exp(0,00041489l''_{\text{ж}}); \quad (9)$$

– влияние ширины на левой стороне на длину второй жилки на левой стороне листьев

$$l'_{\text{ж}} = 45,87364 \exp(-0,081235b') + 0,85588b'^{0,92382} \exp(0,029908b'); \quad (10)$$

– влияние длины второй жилки на левой стороне на ширину на левой стороне листьев

$$b' = 0,0097932l'_{\text{ж}}{}^{2,10278} \exp(-0,0099842l'_{\text{ж}}) + 7,62307; \quad (11)$$

– влияние угла между главной и второй от основания листа жилками с левой стороны листьев на угол между главной и второй от основания листа жилками с правой стороны листьев

$$\alpha'' = 5,52381 \exp(-0,0057460\alpha') + 2,68220\alpha'^{0,62964} \exp(0,0054722\alpha'); \quad (12)$$

– влияние угла между главной и второй от основания листа жилками с правой стороны листьев на угол между главной и второй от основания листа жилками с левой стороны листьев

$$\alpha' = 1,99219 \exp(0,039772\alpha'') + 1,065425\alpha''^{1,035282} \exp(-0,010853\alpha''); \quad (13)$$

– влияние расстояния между концами первой и второй жилок с левой стороны листьев на длину второй жилки на левой стороне листьев

$$l'_{\text{ж}} = 33,97637 \exp(-0,041107l'_{\text{к}}) + 0,39111l'_{\text{к}}{}^{0,61879} \exp(0,15405l'_{\text{к}}); \quad (14)$$

– влияние расстояния между концами первой и второй жилок с левой стороны листьев на ширину на правой стороне листьев

$$b'' = 0,098318l'_{\text{к}}{}^{3,010187} \exp(-0,19554l'_{\text{к}}) + 2,58419; \quad (15)$$

– влияние расстояния между концами первой и второй жилок с правой стороны листьев на расстояние между концами первой и второй жилок с левой стороны листьев

$$l'_k = 0,017059l_k^{3,36064} \exp(-0,19256l'_k) + 4,97922; \quad (16)$$

– влияние ширины на правой стороне листьев на расстояние между концами первой и второй жилок с левой стороны листьев

$$l'_k = 110,10051 \exp(-0,40834b'') + 0,60848b''^{1,01504} \exp(-0,00041684b''); \quad (17)$$

– влияние расстояния между концами первой и второй жилок с левой стороны листьев на расстояние между концами первой и второй жилок с правой стороны листьев

$$l''_k = 4,27876l_k^{0,78319} \exp(-0,023133l'_k) - 10,46382; \quad (18)$$

– влияние длины второй жилки на правой стороне листьев на расстояние между концами первой и второй жилок с левой стороны листьев

$$l'_k = 0,087963l_{ж}^{2,27808} \exp(-0,058024l''_k) - 25,015367; \quad (19)$$

– влияние ширины на правой стороне листьев на ширину на левой стороне листьев

$$b' = 125,22754 \exp(-0,16146b'') + 0,13403b''^{0,73296} \exp(0,12324b''); \quad (20)$$

– влияние ширины на правой стороне на длину второй жилки на левой стороне листьев:

$$l'_{ж} = 138,011555 \exp(-0,16128b'') + 0,75209b''^{0,91987} \exp(0,043949b''); \quad (21)$$

– влияние расстояния между концами первой и второй жилок с правой стороны листьев на ширину на правой стороне листьев

$$b'' = 0,14397l_k^{3,050669} \exp(-0,22213l'_k); \quad (22)$$

– влияние угла между главной и второй от основания листа жилкой с левой стороны листьев на расстояние между основаниями первой и второй жилок с левой стороны листьев

$$l'_{осн} = 33,68506 \exp(-0,044599\alpha'). \quad (23)$$

Заключение

Флуктуирующую асимметрию можно уловить статистическим моделированием из гораздо меньшего объема измерений. Наименьший объем измерений мы рекомендуем 15 (три дерева по пять разных по крупности листьев из разных мест). Это позволит снизить объем измерений в $100 / 15 \approx 7$ раз. Однако при этом повышается точность анализа флуктуирующей асимметрии.

Все парные закономерности из табл. 2 имеют общую конструкцию по формуле (1). В частных случаях образуются формулы (2–23) при условиях получения некоторыми параметрами модели значений 0 или 1. Например, формула (22) получается при условиях $a = 1$ и $a_5 = 0$. А уравнение (23) получилось при условиях $a_2 = 0$, $a_4 = 1$ и $a_5 = 0$. Тогда можно сделать вывод о том, что все 10 параметров листьев на момент проведения измерений взаимно изменяются по общей трендовой модели (1). При этом конкретные количественные значения параметров этой модели зависят от факторов окружающей среды. В динамике онтогенеза параметры листьев изменяются по волновым закономерностям [4]. Тогда

появляется возможность перехода на индивидуальные измерения каждого учетного листа, но для этого необходимы более совершенные измерительные приборы.

Список литературы

1. Гелашвили Д.Б., Чупрунов Е.В., Иудин Д.И. Структурные и биоиндикационные аспекты флуктуирующей асимметрии билатерально-симметричных организмов // Журнал общей биологии. 2004. Т. 65. № 5. С. 433–441.
2. Гуртяк А.А., Углев А.А. Оценка состояния среды городской территории с использованием березы повислой в качестве биоиндикатора // Изв. Том. политех. ун-та. 2010. Т. 317. № 1. С. 200–204.
3. Зорина А.А., Коросов А.В. Оценка флуктуирующей асимметрии. Специальные методы биометрии. Петрозаводск, 2007. С. 79–88.
4. Мазуркин П.М. Экономико-статистическое моделирование: учеб. пос. с грифом УМО РАЕ. Йошкар-Ола: Поволжский ГТУ, 2016. 276 с.
5. Семенова Д.В. Оценка среды по моделям структуры листьев березы: матер. XLIX Междунар. научно-студ. конф. «Студент и научно-технический прогресс»: Биология. Новосибирск: НГУ, 2011. С. 122.
6. Семенова Д.В. Асимметрия длины жилок листьев березы: матер. 51 Междунар. научно-студ. конф. «Студент и научно-технический прогресс»: Биология. Новосибирск: НГУ, 2013. С. 100.
7. Семенова Д.В. Флуктуирующая асимметрия ширины листьев березы: матер. 51 Междунар. научно-студ. конф. «Студент и научно-технический прогресс»: Биология. Новосибирск: НГУ, 2013. С. 101.