

УДК 57.087.1

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОВОРОТНОЙ
ПСЕВДОСИММЕТРИИ ЦВЕТКА НА ПРИМЕРЕ ГВОЗДИКИ ФИШЕРА
(*DIANTHUS FISCHERI* SPRENG.)**© 2010 г. **А.А. Нижегородцев, Е.С. Дымович, М.О. Марычев, Н.В. Сомов,
Е.В. Чупрунов, Д.Б. Гелашвили**

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

ecotox@mail.ru

Поступила в редакцию 13.04.2010

На основе алгоритма свертки создана программа для расчёта степени поворотной псевдосимметрии цветка (BioPsFlower – Biological Pseudosimmetry Flower – биологическая псевдосимметрия цветка). Проведена апробация программы на выборках цветков гвоздики Фишера, произрастающих в различных биотопических условиях.

Ключевые слова: *Dianthus fischeri* Spreng., псевдосимметрия.

Введение

Идеальная симметрия является математической абстракцией, тогда как в природе чаще всего встречаются лишь приблизительно симметричные (псевдосимметричные) системы, об инвариантности которых относительно операций симметрии также можно говорить лишь приблизительно. Поэтому симметрию, наряду с асимметрией, следует рассматривать как имманентную дуалистическую характеристику биообъекта, неизбежно проявляющуюся в онтогенезе. Д.Б. Гелашвили и Е.В. Чупруновым было обосновано применение алгоритма, основанного на свертке функций, для количественной оценки степени псевдосимметричности биообъектов [1]. Принципиальным отличием предложенного подхода от существующих является возможность оценивать степень псевдосимметричности биообъектов не только относительно билатеральных признаков, но и других возможных типов преобразований (поворотов, инверсий, трансляций и др.). В свою очередь, это открыло перспективу создания автоматизированной системы оценки псевдосимметрии, а также явилось предпосылкой для разработки приложений теории групп в биосимметрии.

Материал и методы

На основе алгоритма свертки был разработан комплекс программ для расчёта степени псевдосимметрии (BioPs – Biological Pseudosimmetry – биологическая псевдосимметрия) относительно зеркального отражения для плоских билатерально симметричных объектов, например лис-

товых пластинок древесных растений или лепестков цветка (BioPsLeaf – Biological Pseudosimmetry Leaf – биологическая псевдосимметрия листа), а также поворотной симметрии цветка (BioPsFlower – Biological Pseudosimmetry Flower – биологическая псевдосимметрия цветка). Программы позволяют рассчитывать зеркальную или поворотную симметрию как для однородно закрашенного объекта, так и с учётом его тонких особенностей. При повороте изображения объекта с малым по углу шагом, вычисляется поворотная симметрия объекта как функция угла поворота, а затем изображается графически в виде симметрограммы. Кроме симметрограммы, программа строит автокорреллограмму, которая полезна при незначительных пиках симметрограммы, или при затруднении отличить пики симметрограммы от возникающего шума из-за большого количества лепестков и малых промежутков между ними. Программа работает с одиночными изображениями формата jpg и bmp. Объекты сканируют как цветное фото, с разрешением 300 dpi (пикселей на дюйм), сохраняют в формате bmp и в дальнейшем работают в программе с этим форматом. Сбор цветков гвоздики Фишера (*Dianthus fischeri* Spreng.) производился в 2-х точках г. Дзержинска вблизи предприятий химической промышленности ОАО «Синтез» и ООО «Корунд». Расстояние между точками сбора – 10 км.

Для статистической обработки экспериментального материала использовались следующие статистические критерии. Для оценки соответствия распределения экспериментальных данных нормальному распределению – критерии

Колмогорова – Смирнова, Шапиро – Уилка и Лилиефорса. В качестве непараметрического аналога дисперсионного анализа применялся критерий Крускала – Уоллиса. Для парного сравнения несвязанных выборок, не подчиняющихся нормальному распределению, применялся непараметрический критерий Манна – Уитни.

Все статистические расчёты проводили в пакете *Statistica* 8.0, в соответствии с рекомендациями, изложенными в работах [2, 3–5].

Результаты и их обсуждение

Апробация автоматического метода оценки степени псевдосимметрии была проведена на раздельнолепестном венчике цветка гвоздики Фишера (*Dianthus fischeri* Spreng.), характеризующимся поворотной симметрией. Поскольку венчик гвоздики Фишера состоит из 5 лепестков (рис. 1), то он может быть приближенно описан группой C_{5v} , которая характеризуется групповым множеством, состоящим из 10 элементов:

$$C_{5v} = \{e, 5^1, 5^2, 5^3, 5^4, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5\}.$$



Рис. 1. Внешний вид цветка гвоздики Фишера (*Dianthus fischeri* Spreng.)

Напомним, что здесь e – тождественный (единичный) элемент группы; 5^p ($p = 1, 2, 3, 4$) – обозначения операций поворотов вокруг оси 5-го порядка; m – плоскости симметрии, проходящие через каждый из лепестков.

Аналізу были подвергнуты две выборки, каждая из которых состояла из 17 цветков гвоздики Фишера, собранных в г. Дзержинске вблизи ООО «Корунд» и ОАО «Синтез». Симметрограммы (рис. 2, А, Б), полученные с помощью программы BioPsFlower, подтверждают выдвинутое предположение, что симметрия рассматриваемого цветка (рис. 1) приближенно описывается группой C_{5v} , содержащей 6 нетривиальных подгрупп: одну подгруппу C_5 и пять подгрупп C_5 . На графиках можно видеть 5 локаль-

ных максимумов при углах поворота $\sim 72^\circ, 144^\circ \dots 360^\circ$ (0°), что говорит об оси симметрии 5-го порядка и дает основание в данном случае провести 5 плоскостей отражения ($m_1 \dots m_5$) через лепестки. Кроме того, этот вывод подтверждается и результатами автокорреляционного анализа (построение автокоррелограммы) (рис. 2, В, Г).

Анализ поворотной псевдосимметрии. С помощью программы BioPsFlower для каждой из выборок были получены значения локальных максимумов при поворотах на $72^\circ, 144^\circ, 216^\circ$ и 288° . Поскольку значения локальных максимумов для углов поворота 0° и 360° совпадают и характеризуют только исходную степень псевдосимметрии ($\eta \cong 1$), то из дальнейшего анализа были исключены. Эти данные приведены в табл. 1, 2. Кроме того, в табл. 1, 2 указаны минимальные значения локальных максимумов поворотной псевдосимметрии, свидетельствующие о степени инвариантности поворотной псевдосимметрии каждого цветка.

На первом этапе статистического анализа было проведено сравнение показателей локальных максимумов поворотной псевдосимметрии при разных значениях угла поворота цветков гвоздики Фишера для выборок, отобранных вблизи ООО «Корунд» и ОАО «Синтез», представленных в табл. 1, 2. Анализ, проведенный с применением критерия Крускала – Уоллиса, показал, что в обеих выборках отсутствуют статистически значимые различия ($p > 0.05$) в показателях локальных максимумов поворотной псевдосимметрии цветков гвоздики Фишера при исследованных углах поворота ($72^\circ, 144^\circ, 216^\circ$ и 288°). Это дало основание на следующем этапе провести сравнительный анализ между объединенными (по всем углам поворотов) выборками с помощью критерия Манна – Уитни. Было установлено, что статистически значимые межбиотопические (между территориями, прилегающими к ООО «Корунд» и ОАО «Синтез») различия по показателям локальных максимумов поворотной псевдосимметрии цветков гвоздики Фишера также отсутствуют ($p = 0.18$).

Анализ билатеральной псевдосимметрии. Принимая во внимание, что групповое множество, характеризующее цветок гвоздики Фишера, включает кроме операций поворотов вокруг оси 5-го порядка, плоскости симметрии, проходящие через каждый из 5-ти лепестков, статистическому анализу были подвергнуты и показатели билатеральной псевдосимметрии для

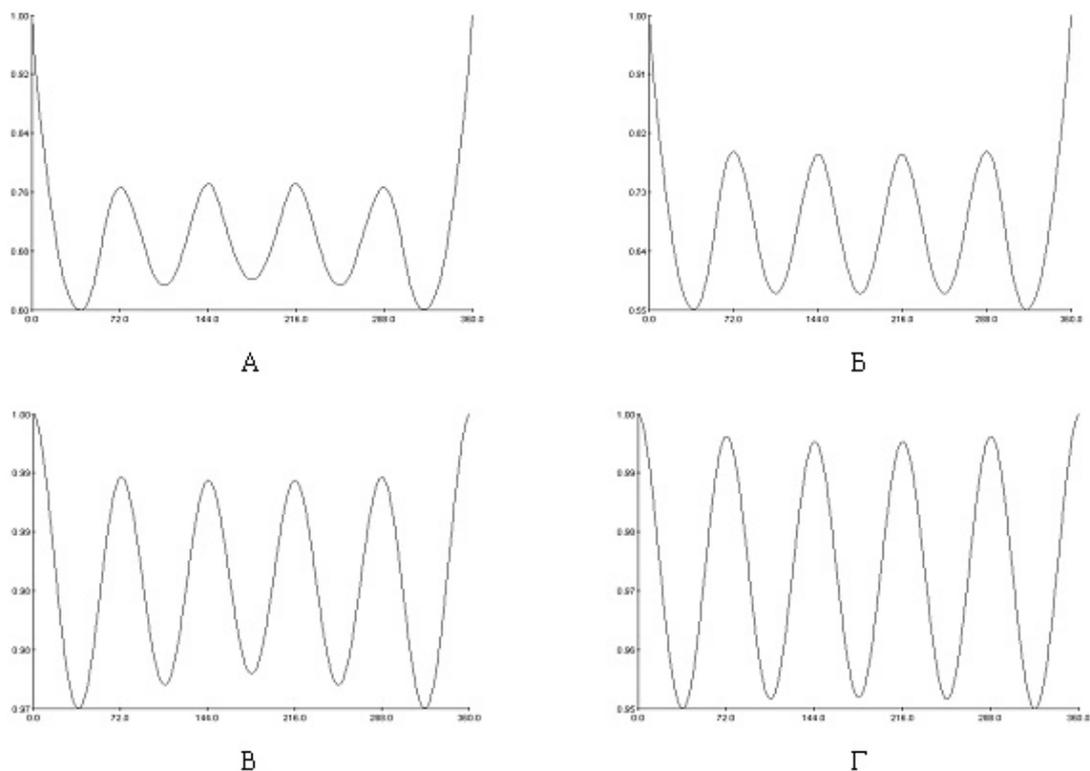


Рис. 2. Графики зависимости степени поворотной симметрии (А, Б) и автокоррелограммы (В, Г) от угла поворота, полученные путем усреднения результатов для изображений 17 цветков гвоздики Фишера (*Dianthus fischeri* Spreng.), А, В – отобранных вблизи ООО «Корунд», Б, Г – отобранных вблизи ОАО «Синтез». По оси ординат – степень поворотной симметрии η (отн. ед.) – для графиков А и Б, значение функции автокорреляции – для графиков В и Г, по оси абсцисс – градусы

Таблица 1

Значения показателей локальных максимумов поворотной псевдосимметрии цветков гвоздики Фишера (*Dianthus fischeri* Spreng.), отобранных вблизи ООО «Корунд»

Номер цветка	Угол поворота				Минимальное значение локального максимума поворотной псевдосимметрии
	72°	144°	216°	288°	
1	0.788	0.661	0.660	0.788	0.660
2	0.782	0.791	0.791	0.781	0.781
3	0.748	0.781	0.781	0.747	0.747
4	0.785	0.839	0.839	0.785	0.785
5	0.845	0.854	0.854	0.844	0.844
6	0.713	0.689	0.689	0.713	0.689
7	0.722	0.632	0.632	0.722	0.632
8	0.801	0.850	0.850	0.802	0.801
9	0.851	0.877	0.877	0.851	0.851
10	0.806	0.867	0.868	0.806	0.806
11	0.885	0.882	0.882	0.885	0.882
12	0.708	0.767	0.767	0.708	0.708
13	0.670	0.796	0.796	0.670	0.670
14	0.821	0.797	0.797	0.821	0.797
15	0.749	0.650	0.650	0.749	0.650
16	0.607	0.633	0.632	0.607	0.607
17	0.715	0.718	0.718	0.715	0.715

каждой выборки, представленные в табл. 3, 4. В этих таблицах также указаны минимальные значения показателей билатеральной псевдо-

симметрии, характеризующие степень инвариантности билатеральной псевдосимметрии каждого цветка.

Таблица 2

**Значения показателей локальных максимумов поворотной псевдосимметрии
цветков гвоздики Фишера (*Dianthus fischeri* Spreng.), отобранных вблизи ОАО «Синтез»**

Номер цветка	Угол поворота				Минимальное значение локального максимума поворотной псевдосимметрии
	72°	144°	216°	288°	
1	0.785	0.756	0.756	0.786	0.756
2	0.727	0.830	0.829	0.727	0.727
3	0.755	0.782	0.783	0.755	0.755
4	0.758	0.638	0.637	0.758	0.637
5	0.864	0.789	0.789	0.865	0.789
6	0.773	0.862	0.862	0.773	0.773
7	0.816	0.755	0.755	0.817	0.755
8	0.780	0.673	0.673	0.780	0.673
9	0.780	0.721	0.721	0.780	0.721
10	0.853	0.819	0.819	0.852	0.819
11	0.817	0.861	0.860	0.817	0.817
12	0.851	0.838	0.838	0.851	0.838
13	0.851	0.833	0.833	0.852	0.833
14	0.834	0.879	0.879	0.834	0.834
15	0.762	0.847	0.847	0.762	0.762
16	0.714	0.776	0.776	0.714	0.714
17	0.731	0.720	0.721	0.731	0.720

Таблица 3

**Значения показателей билатеральной псевдосимметрии цветков
гвоздики Фишера (*Dianthus fischeri* Spreng.), отобранных вблизи ООО «Корунд»**

Номер цветка	Плоскости билатеральной симметрии					Минимальное значение показателя билатеральной псевдосимметрии
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	
1	0.896	0.763	0.826	0.765	0.749	0.749
2	0.741	0.751	0.760	0.676	0.791	0.676
3	0.751	0.703	0.696	0.814	0.739	0.696
4	0.693	0.770	0.865	0.862	0.783	0.693
5	0.758	0.881	0.820	0.762	0.824	0.758
6	0.708	0.705	0.780	0.914	0.777	0.705
7	0.719	0.758	0.761	0.907	0.756	0.719
8	0.901	0.767	0.802	0.828	0.761	0.761
9	0.863	0.784	0.743	0.697	0.902	0.697
10	0.766	0.827	0.841	0.901	0.810	0.766
11	0.867	0.878	0.871	0.885	0.910	0.867
12	0.755	0.883	0.709	0.724	0.772	0.709
13	0.642	0.886	0.767	0.744	0.658	0.642
14	0.788	0.842	0.799	0.627	0.791	0.627
15	0.861	0.746	0.880	0.703	0.780	0.703
16	0.674	0.691	0.625	0.587	0.603	0.587
17	0.716	0.825	0.713	0.570	0.688	0.570

Сравнение показателей билатеральной псевдосимметрии для плоскостей симметрии $m_1 \dots m_5$ лепестков цветков гвоздики Фишера в выборках, отобранных вблизи ООО «Корунд» и ОАО «Синтез», проведенное с применением критерия Крускала – Уоллиса, показало отсутствие статистически значимых различий ($p > 0.05$) в обеих выборках. Это дало основание на следующем этапе провести сравнительный анализ между объединенными (по всем плоскостям симметрии) выборками с помощью критерия Манна – Уитни. В этом

случае статистически значимые межбиотопические (между ООО «Корунд» и ОАО «Синтез») различия по показателям билатеральной псевдосимметрии цветков гвоздики Фишера также отсутствовали ($p = 0.66$).

В табл. 5 приведены итоговые данные по анализу псевдосимметрии цветков гвоздики Фишера. Инвариантность (симметричность) каждого цветка в целом может характеризоваться одной числовой характеристикой – минимальным значением симметрии среди всех её локальных максимумов

Таблица 4

**Значения показателей билатеральной псевдосимметрии
цветков гвоздики Фишера (*Dianthus fischeri* Spreng.), отобранных вблизи ОАО «Синтез»**

Номер цветка	Плоскости билатеральной симметрии					Минимальное значение показателя билатеральной псевдосимметрии
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	
1	0.808	0.716	0.791	0.588	0.745	0.588
2	0.743	0.821	0.696	0.727	0.748	0.696
3	0.802	0.652	0.894	0.661	0.767	0.652
4	0.824	0.792	0.771	0.871	0.796	0.771
5	0.786	0.849	0.684	0.721	0.733	0.684
6	0.852	0.821	0.804	0.909	0.727	0.727
7	0.817	0.840	0.836	0.886	0.804	0.804
8	0.803	0.845	0.784	0.909	0.794	0.784
9	0.887	0.682	0.854	0.855	0.875	0.682
10	0.842	0.860	0.798	0.806	0.895	0.798
11	0.840	0.883	0.822	0.844	0.698	0.698
12	0.864	0.796	0.695	0.734	0.88	0.695
13	0.880	0.792	0.728	0.731	0.703	0.703
14	0.547	0.753	0.815	0.780	0.768	0.547
15	0.765	0.739	0.676	0.875	0.732	0.676
16	0.726	0.816	0.781	0.628	0.854	0.628
17	0.592	0.680	0.687	0.653	0.619	0.592

для поворотной симметрии и степеней симметрии относительно зеркальных (билатеральных) отражений. Так, например, для цветка № 1 в выборке ООО «Корунд» это значение соответствует $\eta = 0.66$ (угол поворота 216°) (табл. 1) для подгруппы C_5 (т.е. циклической группой с одной поворотной осью n -порядка). Напротив, для цветка № 1 в выборке ОАО «Синтез» инвариантность определяется подгруппой C_s с минимальным значением показателя билатеральной псевдосимметрии ($\eta = 0.588$) в плоскости симметрии m_4 (табл. 4).

«Синтез» с помощью критерия Манна – Уитни не выявил их статистической значимости ($p = 0.72$).

Полученные результаты об отсутствии статистически значимых различий в показателях поворотной и билатеральной псевдосимметрии цветков гвоздики Фишера, отобранных вблизи ООО «Корунд» и ОАО «Синтез», согласуются с данными натурных исследований 2008 г., согласно которым уровень содержания загрязняющих веществ от стационарных источников ОАО «Синтез» и ООО «Корунд» не превышал допустимых значений [6].

В то же время данные табл. 5 свидетельствуют, что наблюдается определенная изменчивость цветков по показателю минимального значения псевдосимметрии, характеризующему степень инвариантности при разных операциях симметрии. Так, в выборке ООО «Корунд» 5 из 17 цветков (29.4%, или в долях 0.294) характеризовались инвариантностью по поворотной псевдосимметрии, тогда как в выборке ОАО «Синтез» аналогичное соотношение составило 3

из 17 (17.6%, или 0.176). Сравнение долей показало отсутствие статистически значимых различий ($p > 0.05$). Однако этот результат, впрочем как и ранее проведенные оценки, нуждаются в дополнительных исследованиях, поскольку отсутствие статистически значимых отличий может быть обусловлено недостаточным объемом выборок. Подчеркнем, что основной задачей этого исследования было не выявление различий в сравниваемых выборках, а апробация разработанного автоматического метода количественной оценки псевдосимметрии.

Подводя итог полученным результатам, можно сказать, что предлагаемые методы количественной оценки псевдосимметрии цветка дают возможность не только установить инвариантность (симметричность) цветка в целом, но и получить нетривиальную информацию об его полиморфизме в терминах типов симметрии. Эти данные дополняют и расширяют имеющиеся представления об асимметрии, как показателя внутрииндивидуальной, внутригрупповой и межгрупповой изменчивости фенотипа [7–9]. Развитие технологий уже сегодня позволяет получать объёмные изображения с помощью 3D лазерного сканирования, что открывает возможность получения более полной информации без её потери при проекции в плоское изображение. Применение подобных технологий для расчёта псевдосимметрии на основе уже разработанных нами алгоритмов для двумерных оцифрованных изображений биоиндикаторных видов растений представляется весьма интересным и перспективным.

Таблица 5

**Минимальные значения показателей билатеральной и поворотной псевдосимметрии
цветков гвоздики Фишера (*Dianthus fischeri* Spreng.), отобранных вблизи ООО «Корунд» и ОАО «Синтез»**

Номер цветка	ООО «Корунд»				ОАО «Синтез»		
	Минимальное значение локального максимума поворотной псевдосимметрии	Минимальное значение показателя билатеральной псевдосимметрии	Инвариантность (псевдосимметричность) цветка	Минимальное значение локального максимума поворотной псевдосимметрии	Минимальное значение показателя билатеральной псевдосимметрии	Инвариантность (псевдосимметричность) цветка	
1	0.660	0.749	0.660	0.756	0.588	0.588	
2	0.781	0.676	0.676	0.727	0.696	0.696	
3	0.747	0.696	0.696	0.755	0.652	0.652	
4	0.785	0.693	0.693	0.637	0.771	0.637	
5	0.844	0.758	0.758	0.789	0.684	0.684	
6	0.689	0.705	0.689	0.773	0.727	0.727	
7	0.632	0.719	0.632	0.755	0.804	0.755	
8	0.801	0.761	0.761	0.673	0.784	0.673	
9	0.851	0.697	0.697	0.721	0.682	0.682	
10	0.806	0.766	0.766	0.819	0.798	0.798	
11	0.882	0.867	0.867	0.817	0.698	0.698	
12	0.708	0.709	0.708	0.838	0.695	0.695	
13	0.670	0.642	0.642	0.833	0.703	0.703	
14	0.797	0.627	0.627	0.834	0.547	0.547	
15	0.650	0.703	0.650	0.762	0.676	0.676	
16	0.607	0.587	0.587	0.714	0.628	0.628	
17	0.715	0.570	0.570	0.720	0.592	0.592	
Среднее	0.743±0.083	0.701±0.071	0.687±0.073	0.760±0.058	0.690±0.074	0.672±0.062	

Список литературы

1. Гелашвили Д.Б., Чупрунов Е.В., Иудин Д.И. Структурно-информационные показатели флуктуирующей асимметрии билатерально симметричных организмов // Журн. общ. биол. 2004. Т. 65. № 4. С. 377–385.
2. Глотов Н.В., Животовский Л.А., Хованов Н.В., Хромов-Борисов Н.Н. Биометрия. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1982. 263 с.
3. Ивантер Э.В., Коросов А.В. Основы биометрии: введение в статистический анализ биологических явлений и процессов. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского госуниверситета, 1992. 168 с.
4. Гланц С. Медико-биологическая статистика / Пер. с англ. М.: Практика, 1998. 459 с.
5. Реброва О.Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение прикладных программ STATISTICA. М.: МедиаСфера, 2003. 312 с.
6. Состояние окружающей среды и природных ресурсов Нижегородской области в 2008 году // Доклад Министерства экологии и природных ресурсов Нижегородской области, ФГУ «ГФИ по Приволжскому федеральному округу». Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии госслужбы, 2009. 222 с.
7. Зорина А.А. Нормальная изменчивость флуктуирующей асимметрии животных и растений // Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2009. 19 с.
8. Leung B., Forbes M.R., Houle D. Fluctuating asymmetry as a bioindicator of stress: Comparing efficacy of analyses involving multiple traits // American Naturalist. 2000. V. 155. P. 101–115.
9. Гелашвили Д.Б., Марычев М.О., Чалкова Н.В., Чупрунов Е.В. и др. // Матер. VIII Всерос. популяционного семинара «Популяции в пространстве и времени». Н. Новгород, 2005. С. 60–62.

**AUTOMATIC ESTIMATION OF FLOWER ROTATIONAL PSEUDOSYMMETRY
(CASE STUDY OF DIANTHUS FISCHERI SPRENG.)**

*A.A. Nizhegorodtsev, E.S. Dymovich, M.O. Marychev, N.V. Somov,
E.V. Chuprunov, D.B. Gelashvili*

Using convolution algorithm, a program has been developed to calculate the rotational pseudosymmetry of the flower (BioPsFlower - Biological Pseudosymmetry of Flower). The program has been tested on the samples of the *Dianthus fischeri* Spreng. growing in different biotopes.

Keywords: *Dianthus fischeri* Spreng., pseudosymmetry.