

Нижегородцев Александр Александрович

**ПСЕВДОСИММЕТРИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ КАК
БИОИНДИКАЦИОННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ: ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
ОБОСНОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНОК, АПРОБАЦИЯ**

03.02.08 – экология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Нижний Новгород
2010

Работа выполнена на кафедре экологии Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского»

Научный руководитель:	доктор биологических наук, профессор Гелашвили Давид Бежанович
Официальные оппоненты:	доктор биологических наук, профессор Глотов Николай Васильевич
	доктор биологических наук, профессор Веселов Александр Павлович
Ведущая организация:	Институт экологии Волжского бассейна РАН (г. Тольятти)

Защита состоится **«26» мая 2010 г. в 15⁰⁰** часов на заседании диссертационного совета Д.212.166.12 Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, биологический факультет

E-mail: ecology@bio.unn.ru

факс: (831) 462-30-85

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского

Автореферат разослан **«24» апреля 2010 года**

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Н.И. Зазнобина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Симметрия (от греч *συμμετρία* — «соразмерность») представляет собой фундаментальную особенность природы, охватывающую все формы движения и организации материи. Симметрия – понятие, характеризующее переход объектов в самих себя или друг в друга при осуществлении над ними определенных преобразований (преобразований симметрии); в широком плане – свойство неизменности (инвариантности) некоторых сторон, процессов и отношений объектов относительно некоторых преобразований. В свою очередь, в математике, кристаллографии и др. естественнонаучных дисциплинах само множество преобразований описывается теорией групп (Чупрунов и др., 2004). Теория симметрии играет важнейшую методологическую роль в искусстве, технике, математике, физике, химии (Вейль, 1968, Шубников, Копцик, 1972). Во второй половине XX века идеи симметрии как методологический инструмент стали применяться в биологии (Астауров, 1927; Гиляров, 1944; Беклемишев, 1964; Урманцев; 1974; Захаров, 1987, 2001; Заренков, 2009; Waddington, 1957; Van Valen, 1962; Palmer 1986, 2003 и др.). Благодаря работам Ю.А. Урманцева, Н.А Заренкова получило право гражданства новое научное направление - биосимметрика (Урманцев, 1974, Заренков, 2009). В последнее время появились работы, проливающие свет на молекулярно-генетические механизмы дифференцировки основных частей тела у многоклеточных билатерально-симметричных организмов (билатерий) с участием регуляторных *Hox*-генов (Lemons, McGinnis, 2006). Наконец, экологи обнаружили асимметричность в устройстве трофических цепей в экосистеме (Rooney et al., 2006). Если методологическое значение теории симметрии в биологии и экологии не вызывает сомнений, то методы количественных оценок степени симметричности биообъектов остаются полем для дискуссий. Это обусловлено тем, что внимание биологов и экологов было привлечено, в основном, к проблеме флуктуирующей асимметрии (ФА). Первые видели в этом феномене возможность вскрыть некоторые механизмы онтогенеза (Астауров, 1927; Kellner, 2003; Гилева, 2007; Васильев и др. 2007). Вторые – перспективу использования ФА как меры стабильности развития для оценки качества среды обитания в процедуре биомониторинга (Захаров, 1987; Вершинин, 2007; Трубянов, Глотов, 2010; Palmer, 2003). Оба направления дали интересные и впечатляющие результаты, но ограничение их широкого применения обусловлено тем, что ФА является частным случаем в широком спектре приложений теории симметрии. Метрики, предложенные для количественной оценки ФА применимы только для билатерально-симметричных объектов.

Между тем, категория «симметрия» естественным образом дополнена ее противоположностью - категорией «асимметрия», с необходимостью дополняющей ее до гармоничной пары симметрия-асимметрия. 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 асимметрию, наряду с симметрией следует рассматривать как имманентную дуалистическую характеристику биообъекта, неизбежно проявляющуюся в онтогенезе. Д.Б. Гелашвили и Е.В. Чупруновым (Гелашвили и др., 2004) было обосновано применение алгоритма, основанного на свертке функций для количественной оценки степени

псевдосимметричности биообъектов. 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 и биоиндикации. Все вышеизложенное позволяет считать тему диссертации актуальной и следующим образом сформулировать цель и задачи настоящего исследования.

Цель работы. Разработка приложений теории групп к описанию псевдосимметричности растительных биообъектов с билатеральной и поворотной симметрией с целью автоматизации количественной оценки степени псевдосимметрии в процедуре биоиндикации.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Теоретически обосновать и описать на языке теории групп псевдосимметричность биообъектов с билатеральной и поворотной симметрией на примере листовой пластинки и цветка с раздельнолепестным венчиком.

2. Разработать алгоритмы автоматической количественной оценки билатеральной и поворотной псевдосимметрии оцифрованного изображения листовой пластинки и цветка с раздельнолепестным венчиком.

3. Провести апробацию алгоритмов автоматической оценки псевдосимметрии листовой пластинки берёзы повислой (*Betula pendula* Roth.), липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и тополя дрожащего (*Populus tremula* L.) на моделях автотранспортной нагрузки, импактного химического загрязнения и видовой специфичности растительных объектов.

4. Провести апробацию алгоритмов автоматической количественной оценки псевдосимметрии цветков гвоздики Фишера (*Dianthus fischeri* Spreng.) с различной биотопической приуроченностью.

Научная новизна

Впервые реализовано приложение теории групп к описанию псевдосимметрии растительных объектов на примере листовой пластинки берёзы повислой, липы сердцевидной, тополя дрожащего и поворотной симметрии цветка гвоздики Фишера. Разработаны алгоритмы и создан программный продукт BioPs, позволяющий автоматизировать процедуру количественной оценки степени псевдосимметричности растительных объектов и визуализировать ее результаты в виде симметрограммы. Впервые обосновано применение симметрограммы биообъекта как обобщенного геометрического образа типов его симметрии. Показано, что степень инвариантности (псевдосимметричности) биообъекта, определяется минимальным значением псевдосимметрии среди всех её локальных максимумов. Впервые установлено, что степень инвариантности (псевдосимметричность) цветка может характеризовать полиморфизм цветка. Вышеизложенное позволяет рекомендовать степень псевдосимметрии биообъекта в качестве количественного биоиндикационного показателя. Проведена апробация предложенного подхода на моделях автотранспортной нагрузки, импактного химического загрязнения и биотопической приуроченности.

Теоретическое и практическое значение

Разработанные подходы и алгоритмы количественной оценки псевдосимметрии растительных объектов с применением теоретико-групповых методов являются теоретическим вкладом в развитие существующих представлений о методологической роли теории симметрии в естествознании. Версии созданного программного продукта BioPs нашли свое применение в биоиндикационных исследованиях в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, геохимических исследованиях лаборатории экологической радиологии Института экологических проблем Севера УрО РАН (зав. лаб., док. геол.-минерал. наук Киселев Г.П.), размещены д.б.н. Н.Г. Булгаковым на сайте кафедры общей экологии Биологического факультета МГУ (<http://ecograde.belozersky.msu.ru/links/index.html>). Материалы диссертации используются в учебном процессе ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижегородском государственном педагогическом университете при подготовке бакалавров, специалистов, магистров, аспирантов и докторантов.

Положения, выносимые на защиту

1. Зеркальная псевдосимметрия билатеральной листовой пластинки берёзы повислой, липы сердцевидной и тополя дрожащего приближенно описывается точечной группой

$$C_{2v} = \{e, m_1, m_2, 2^1\},$$

поскольку билатеральная и дорзовентральная плоскости симметрии листовой пластинки, пересекающиеся под углом ($\pi/2$), порождают симметрию второго порядка.

2. Поворотная симметрия цветка с раздельнолепестным венчиком может быть приближенно описана точечной группой C_{nv} , содержащей $n+1$ (когда n – простое число) нетривиальных подгрупп: одну подгруппу C_n с осью n -порядка, и n подгрупп C_s , с параллельными этой оси зеркальными плоскостями симметрии.

3. Применение теории групп и количественных оценок псевдосимметрии позволяет формализовать анализ различий в морфологии цветка, как в онтогенетическом (изменчивость), так и филогенетическом (переход от актиноморфности к зигоморфности) аспектах.

4. Симметрограмма биообъекта является обобщенным геометрическим образом типов его псевдосимметрии, при этом степень инвариантности (псевдосимметричности) биообъекта, определяется минимальным значением псевдосимметрии среди всех её локальных максимумов, и степеней псевдосимметрии относительно зеркальных отражений, что в свою очередь, характеризует изменчивость биообъекта и может служить количественным биоиндикационным показателем.

Апробация работы

Результаты работы были доложены на VIII Всероссийском популяционном семинаре (Нижний Новгород, 2005); X Всероссийском популяционном семинаре (Ижевск, 2008); III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Н. Тагил, 2010).

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное личное участие в постановке задач исследования, выполнении всех его этапов, включая сбор, подготовку, обработку экспериментального материала, обсуждение и теоретическое осмысление полученных результатов.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на 166 страницах машинописного текста и состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов, описания работы с комплексом программных продуктов BioPs, теоретического обоснования методов оценки псевдосимметрии, собственных результатов и их обсуждения, заключения, выводов и списка цитированной литературы. Работа иллюстрирована 35 рисунками и 26 таблицами. Список литературы включает в себя 166 источников.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.б.н., проф., Д. Б. Гелашвили, сотрудникам кафедры кристаллографии и экспериментальной физики ННГУ д.ф.-м.н., проф. Е.В. Чупрунову, к.ф.-м.н., доценту М. О. Марычеву, асс. Н.В. Сомову, доценту кафедры ботаники ННГУ к.б.н. А. И. Широкову, сотрудникам кафедры экологии ННГУ и лаборатории промышленной и экологической токсикологии НИИ Химии ННГУ, своим родным и близким за постоянное внимание, помощь и поддержку на всех этапах выполнения работы.

Глава 1. Обзор литературы. Теоретические и прикладные аспекты изучения псевдосимметрии биологических объектов

В главе дается критический анализ современных вопросов биосимметрии, включая историю изучения симметрии; симметрию и асимметрию биообъектов; рассмотрение симметрии – асимметрии как меры стабильности развития организмов; характеристику методов количественных оценок симметрии-асимметрии; описание растительных объектов как биоиндикаторов.

Глава 2. Материалы и методы исследования

2.1. Материал исследований: сбор, хранение, обработка

Материалом для работы послужили сборы листовых пластинок берёзы повислой, липы сердцевидной, тополя дрожащего, а также цветки гвоздики Фишера. Сбор листовых пластинок производился в полевые сезоны 2006 – 2008 гг. в 12-ти точках г.Н.Новгорода (рис. 1, А) и 2-х точках на территории Нижегородской области (рис. 2). В последнем случае листовые пластинки березы повислой собирали по периметру центра ликвидации межконтинентальных баллистических ракет «Суроватиха» (ЦЛМБР «Суроватиха»), на котором производят дожигание остатков ракетного топлива (гептила) и демонтаж корпусов ракет. Контрольной территорией служили окрестности биостанции ННГУ вблизи с. Ст Пустынь.

Сбор цветков гвоздики Фишера производился в 2-х точках г.Дзержинска вблизи ОАО «Синтез» и ООО «Корунд» (рис.1, Б).

Объём использованного материала приведен в табл. 1. Всего проанализировано 534 растения, обработано 8123 листовых пластинки и 34 цветка. Произведено 22933 промера признаков.

Объём использованного материала

Вид	Число растений	Орган	Количество	
			органов	промеров
Берёза повислая	260	лист	5723	8123
Липа сердцевидная	120	лист	1200	1200
Тополь дрожащий	120	лист	1200	1200
Гвоздика Фишера	34	цветок	34	12410

Сбор листовых пластинок проводился согласно «Методическим рекомендациям по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ», утверждённых распоряжением Росэкологии от 16.10.2003 г. №460-р. Сбор материала проводился из нижней части кроны дерева с максимального количества доступных веток равномерно вокруг дерева.

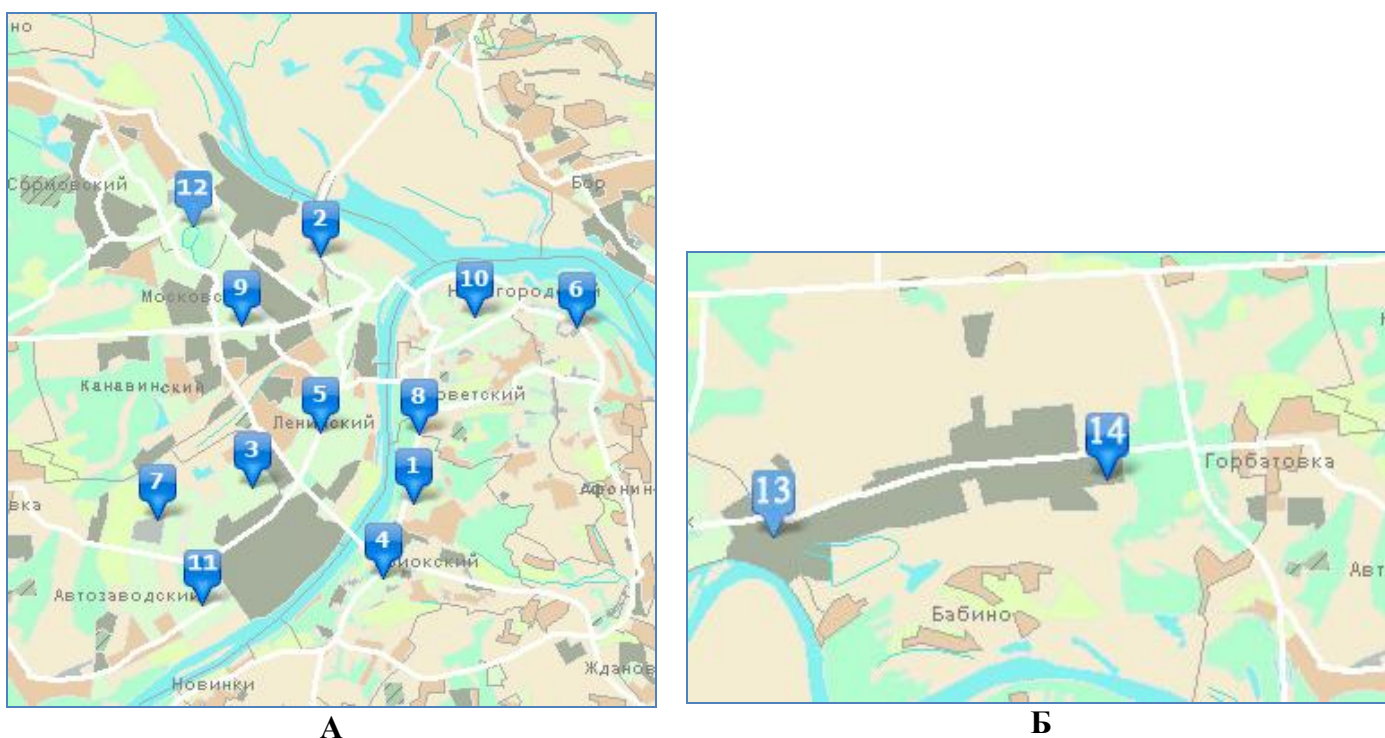


Рис. 1. Карта - схема сбора материала на обследованных территориях г.Н. Новгород и г.Дзержинск.

А - г. Нижний Новгород: 1) ул.40 лет Октября; 2) ул.Акимова; 3) ул.Бусыгина; 4) ул.Голованова, 5) ул.Комарова, 6) ул.Родионова, 7) ул. Строкина, 8) ул.Медицинская, 9) ул.Московское шоссе, 10) пл.Свободы, 11) Южное шоссе, 12) бульвар Юбилейный.

Б - г. Дзержинск: 13) окрестности ООО «Корунд»; 14) окрестности ОАО «Синтез».

Для непродолжительного хранения листовые пластинки помещали в полиэтиленовые пакеты на нижнюю полку холодильника при температуре 4⁰С не более 3-х суток. Собранные листовые пластинки оцифровывали путём сканирования. Сканирование производилось при помощи сканера «Epson 2580» с разрешением 300 dpi (пикселей на дюйм) как цветное изображение (фото). После сканирования оцифрованным изображениям в программе Adobe Photoshop CS3 придавали чёрный фон с помощью функции заливка фона и удаляли неоднородности фона, возникающие при сканировании.

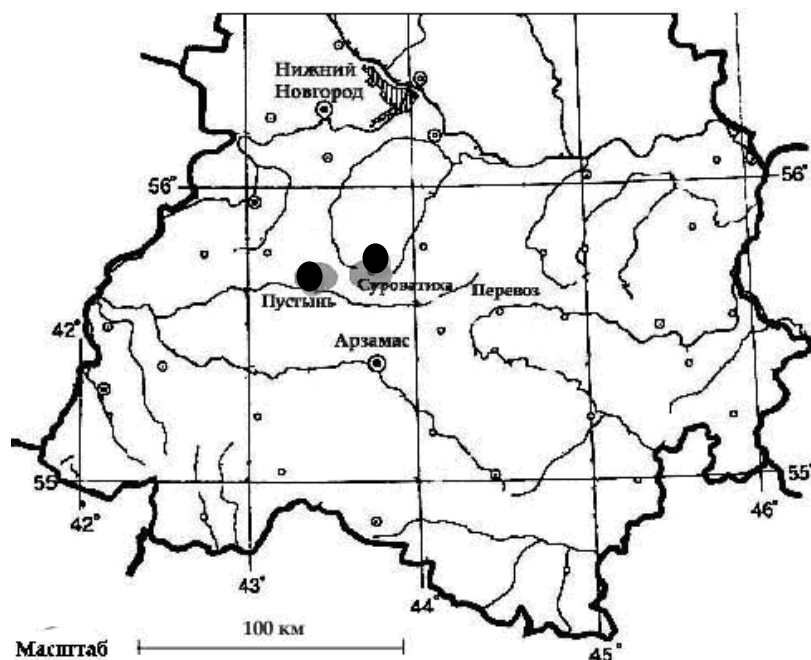


Рис. 2. Карта-схема Нижегородской области с указанием точек сбора материала

После того, как были получены оцифрованные изображения листовых пластинок, их сохраняли на жестком диске. Для каждой точки сбора материала создавалась отдельная папка с указанием года и названием точки сбора материала. Учёт автотранспортной нагрузки производился согласно «Методике определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчётов загрязнения атмосферы городов», утвержденной приказом Госкомэкологии России от 16 февраля 1999 года № 66. В соответствии с методикой учёт автотранспорта производился по обеим сторонам дороги, для каждого направления в отдельности три раза в сутки в часы «пик»: в промежутки времени с 8 до 10 часов - утром, с 12 до 14 часов - днём и вечером – с 17 до 19 часов. После этого рассчитывалось среднее число автомобилей в час, суммарно для обеих сторон дороги.

2.2. Статистическая обработка экспериментального материала

Для статистической обработки экспериментального материала использовались критерии оценки соответствия распределения экспериментальных данных нормальному распределению (критерии Колмогорова-Смирнова, Шапиро-Уилка и Лиллиефорса). В качестве непараметрического аналога дисперсионного анализа применялся критерий Крускала-Уоллиса. Для парного сравнения несвязанных выборок, не подчиняющихся нормальному распределению, применялся непараметрический критерий Манна-Уитни. Для парного множественного сравнения несвязанных выборок, не подчиняющихся нормальному распределению, применялся непараметрический критерий Данна (Гланц, 1999; Реброва, 2003).

Все статистические расчёты проводились в пакете Statistica 8.0, Biostat 2007, SPSS Statistics 17, в соответствии с рекомендациями, изложенными в работах Глотова и др. (1982), Ивантера, Коросова (1992), Гланца (1999), Ребровой (2003), Гелашвили и др. (2007).

Глава 3. Разработка комплекса программных продуктов BioPs для автоматической количественной оценки степени псевдосимметрии растительных объектов

На основе алгоритма свертки нами, совместно с сотрудниками кафедры кристаллографии ННГУ Е.В. Чупруновым, М.О. Марычевым, Н.В Сомовым (Гелашвили и др., 2005; 2010), был разработан комплекс программ для расчёта степени псевдосимметрии (BioPs - Biological Pseudosymmetry – биологическая псевдосимметрия) относительно зеркального отражения для плоских билатерально симметричных объектов, например, листовых пластинок древесных растений, или лепестков цветка (BioPsLeaf - Biological Pseudosymmetry Leaf –биологическая псевдосимметрия листа), а также поворотной симметрии цветка (BioPsFlower - Biological Pseudosymmetry Flower – биологическая псевдосимметрия цветка). Программы позволяют рассчитывать зеркальную или поворотную симметрию как для однородно закрасненного объекта, так и с учётом его тонких особенностей. Практически удобным и необходимым для компьютерной обработки способом выявления таких особенностей является получение цифрового яркостного изображения исследуемого объекта. Это изображение характеризуется числовой матрицей, некоторая внутренняя часть которой содержит информацию о яркостях пикселей, принадлежащих объекту. Пиксели – единичные квадратные элементы изображения, внутри каждого из которых яркость полагается одинаковой. При получении цифрового изображения с достаточно высоким разрешением пиксели достаточно малы и могут соответствовать мельчайшим видимым деталям объекта. Под функцией $f(x_1, x_2)$ в этом случае будем понимать функцию яркостей пикселей изображения, заданную таблично. Выражение интегральной свертки, предложенной Гелашвили и др. (2004) для оценки псевдосимметрии приобретает вид конечной суммы:

$$\eta = \frac{\sum_{i,j} A_{i,j} \cdot B_{i,j}}{\sum_{i,j} A_{i,j}^2}, \quad (1)$$

где η – степень симметричности, A – матрица яркостей исходного изображения, B – матрица яркостей, полученная в результате отражения матрицы A относительно выбранной плоскости. Так как мы имеем дело с суммой положительных чисел, задающих яркости пикселей, то диапазон изменения степени симметрии лежит в пределах от нуля (для полностью несимметричного объекта) до единицы (для абсолютно симметричного). Поскольку листовая пластинка (или лепесток цветка) - приблизительно зеркально симметричные объекты, степень их зеркальной псевдосимметрии программа вычисляет относительно плоскости отражения, проходящей через центральную жилку листовой пластинки или середину лепестка. При этом можно указать вручную положение плоскости симметрии, либо использовать алгоритм распознавания центральной жилки (или ее аналога) с последующей аппроксимацией расставленных маркеров прямой линией по методу наименьших квадратов. В программе также предусмотрена заливка окружающего лист фона изображения черным цветом, при этом пиксели фона приобретают нулевую яркость. Это позволяет выбрать всю площадь прямоугольного изображения в качестве области интегрирования η , поскольку пиксели с нулевой яркостью не вносят вклад в свёртку. Очевидно, что разработанный подход может быть применен и к другим

аналогичным объектам. Алгоритм свертки был положен в основу метода оценки степени псевдосимметрии цветка по отношению к операции поворота вокруг его оси, то есть их поворотной симметрии. В этом случае в выражении (1) A – матрица яркостей пикселей исходного изображения, B – матрица яркостей пикселей, полученная в результате поворота матрицы A относительно выбранной оси (точки поворота). Разработанная компьютерная программа реализует алгоритм поворота исходного изображения на произвольный угол. Для вычисления степени поворотной симметрии программа использует выражение (1). Матрица яркостей пикселей исходного изображения накладывается на матрицу яркостей пикселей повернутого изображения, затем перемножаются яркости пикселей с совпадающими координатами. Суммируя значения таких произведений для всех пикселей, находящихся на области перекрывания матриц яркостей этих двух изображений, и деля её на сумму квадратов яркостей пикселей исходного изображения, получаем искомую величину поворотной симметрии при повороте на заданный угол. При повороте изображения объекта с малым по углу шагом, вычисляется поворотная симметрия объекта, как функция угла поворота, и затем изображается графически в виде симметрограммы.

3.1. Описание комплекса программных продуктов BioPS

Требования к материалу. Программа работает с одиночными изображениями формата jpg и bmp. Объекты сканируют как цветное фото, с разрешением 300dpi (пикселей на дюйм) и сохраняют в формате bmp, что обеспечивает в дальнейшем работу в программе с этим форматом. Объекты рекомендуется сканировать на чёрном фоне, для избегания погрешностей, связанных с тенью, которая возникает при сканировании на белом фоне. В процессе сканирования и дальнейшей работы с оцифрованным материалом могут возникнуть погрешности, обусловленные различиями в ориентации оси поворота, относительно которой будут производиться вычисления, «удалением фона» после сканирования, а также погрешностью самого сканера. В специальном проведённом нами исследовании было установлено, что погрешность операции сканирования не превышает 1,5%.

3.2. Оценка билатеральной псевдосимметрии с помощью программы BioPSLeaf

Программа позволяет работать с оцифрованными изображениями билатерально симметричных биообъектов, например, листовой пластинкой или лепестком цветка. В автоматическом режиме можно получить количественные характеристики биообъекта: степень инвариантности (показатель псевдосимметрии), площадь объекта, его периметр, степень изрезанности границ.

3.3. Оценка поворотной псевдосимметрии с помощью программы BioPsFlower

Как указывалось выше, для вычисления степени поворотной симметрии программа использует выражение (1). Приведем пример результатов расчёта поворотной симметрии для реального биологического объекта на примере цветка душистого табака (рис. 3). При повороте изображения объекта с малым по углу шагом, вычисляется поворотная симметрия объекта, как функция угла поворота, и затем изображается графически в виде симметрограммы (рис. 4, А). Кроме «симметрограммы» программа строит

«автокорреллограмму». Чтобы увидеть результат построения автокорреллограммы необходимо перейти на вкладку «Автокорреляция» (рис. 4, Б). Данная функция полезна при незначительных пиках симметрограммы или при затруднении отличить пики симметрограммы от возникающего шума в симметрограмме из-за большого количества лепестков и малых промежутков между ними. На графиках (рис. 4, А-Б) видны 5 локальных максимумов при углах поворота $\sim 72^\circ, 144^\circ, 216^\circ, 288^\circ, 360^\circ(0^\circ)$, 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.



Рис.3. Внешний вид цветка душистого табака

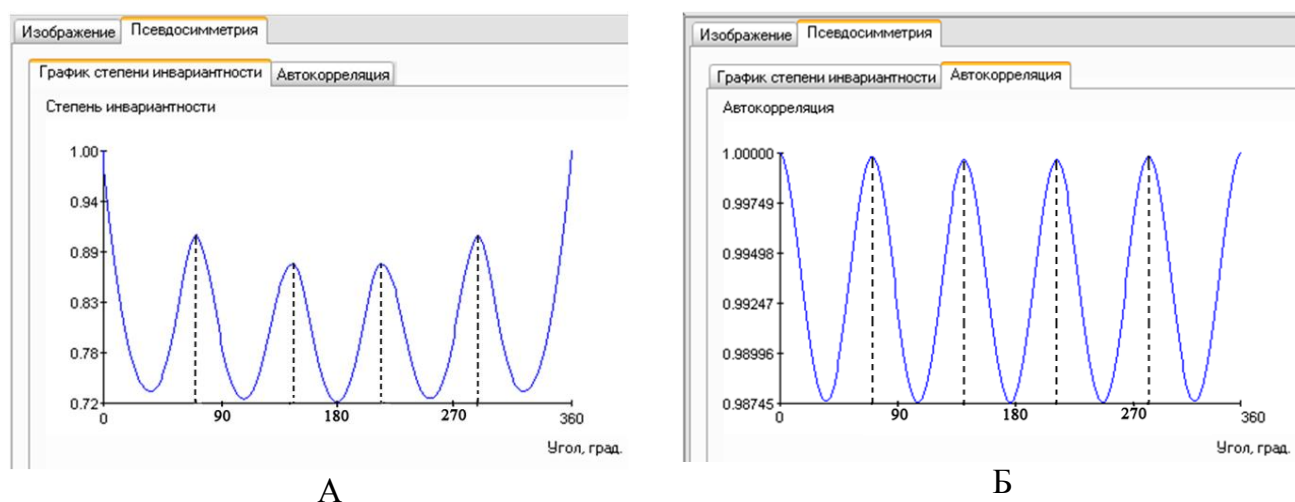


Рис.4. А - Построение симметрограммы в окне «Псевдосимметрия» на вкладке «График степени инвариантности»; Б - Построение автокорреллограммы в окне «Псевдосимметрия» на вкладке «Автокорреляция»

Как и в программе BioPsLeaf, под графиками выводится отчёт. В отчёте представляется информация об исходном изображении (местонахождение на жестком диске или съёмном носителе, ширина и высота изображения) и о заданных параметрах исследования (координаты заданного центра, начальный и конечные углы, а также заданный шаг по углу).

В комплексе программных продуктов BioPs встроена функция работы с элементарной статистикой.

Глава 4. Теоретическое обоснование методов оценки степени псевдосимметрии растительных объектов

Биологические объекты были и остаются достаточно сложными для формального математического описания. Этим, в определенной степени, объясняется известный скепсис некоторых биологов в отношении перспектив математизации биологии и экологии. Тем не менее, в области теоретической биоэкологии, для которой, как для любой естественнонаучной дисциплины, математика является универсальным языком, сделаны к настоящему времени, заметные успехи. Вышесказанное в полной мере относится и к теории групп – наиболее мощному и развитому математическому аппарату, применяемому в теории симметрии. Отметим удивительную особенность преобразований симметрии. Они не могут образовывать произвольные наборы (множества), а составляют вполне определенные наборы – группы. Таким образом, применение методов теории групп в описании симметрии объектов и процессов материального мира базируется на том замечательном обстоятельстве, что операции симметрии физических систем и геометрических объектов могут комбинироваться друг с другом, лишь образуя замкнутые множества, которые и называются группами (Чупрунов и др., 2004). Наряду с этим необходимо подчеркнуть, что до настоящего времени применение теории групп в биосимметрии ограничивалось лишь попыткой классификации типов симметрии биообъектов (Урманцев, 1974).

Рассмотрим развиваемый нами подход на примере актиноморфного, или правильного цветка. Заметим, что для биологических объектов, являющих в то же время и конечными физическими системами, справедлива теорема о взаимном расположении элементов симметрии конечных (ограниченных в пространстве) материальных систем (Чупрунов и др., 2004). Она утверждает, что все элементы симметрии конечной физической системы должны пересекаться хотя бы в одной точке пространства. Такая симметрия называется *точечной симметрией*. Поскольку симметрия цветка связана чаще всего именно с венчиком, сосредоточим наше внимание на симметрии раздельнолепестного венчика, состоящего, например, из пяти лепестков. Такие цветки характеризуются пятью *плоскостями* симметрии и одной *осью* симметрии 5-го порядка. Следовательно, симметрия этого цветка описывается *точечной группой* с осью 5-го порядка и параллельными ей плоскостями симметрии. В соответствии с системой обозначений кристаллографических точечных групп, введенной А. Шенфлисом, эта группа обозначается символом C_{5v} . Таким образом, такой цветок будет инвариантен относительно 10 операций симметрии, в число которых входит и тождественная операция поворота на угол 0° (360°). Итак, группа C_{5v} характеризуется групповым множеством, состоящим из 10 элементов

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

Здесь e – тождественный (единичный) элемент группы; 5^p ($p=1, 2, 3, 4$) – обозначения операций поворотов вокруг оси 5-го порядка; m – плоскости симметрии.

Описание псевдосимметрии цветка. Исторически сложившаяся практика описания степени псевдосимметрии цветка во многом основана на субъективном восприятии геометрии цветка, с последующей формализацией с применением устоявшейся в морфологии растений терминологии. Так, термин «актиноморфный», применяется к т.н. «правильным» цветкам, обладающими поворотной (радиальной) симметрией. Однако,

визуально трудно, или даже невозможно определить насколько цветков одного вида «правильнее» цветка другого вида. Кроме того, приведенная дефиниция не учитывает возможность зеркальной симметрии у актиноморфных цветков. Напротив, у зигоморфных цветков, в случае их, так называемой моносимметричности, считается достаточным провести только одну плоскость зеркальной симметрии и игнорируется возможность поворотной симметрии. Вне зависимости от строгости применяемой терминологии, следует подчеркнуть одно весьма важное обстоятельство: все используемые дефиниции по умолчанию апеллируют к *идеальной симметрии*. Однако, как уже неоднократно указывалось, природные объекты, в том числе, разумеется, цветки, являются в той или иной степени *псевдосимметричными*. Следовательно, количественная оценка псевдосимметричности биообъектов является необходимым элементом их характеристики, как предмета изучения биосимметрии.

Рассмотрим обоснованность выдвинутого положения на примерах схематичного изображения актиноморфного и зигоморфного цветков (рис. 5). Заключение о том, что симметрия рассматриваемого актиноморфного цветка (рис. 5, А) приближенно описывается группой C_{5v} , содержащей 6 нетривиальных подгрупп: одну подгруппу C_5 и пять подгрупп C_s , подтверждается полученной симметрограммой (рис. 5, В). На графике хорошо видны 5 локальных максимумов при углах поворота $\sim 72^\circ, 144^\circ, 216^\circ, 288^\circ, 360^\circ(0^\circ)$, 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. Количественная оценка степени симметрии этого актиноморфного цветка показывает, что минимальное значение поворотной симметрии среди значений её локальных максимумов составляет $\eta = 0.87$ при углах поворота 147° и 230° . В свою очередь минимальное значение симметрии $\eta = 0.91$ зеркального отражения имеет место в плоскости m_2 .

Инвариантность (псевдосимметричность) данного цветка *в целом* может характеризоваться *одной числовой характеристикой* - минимальным значением симметрии среди всех её локальных максимумов для поворотной псевдосимметрии и степеней симметрии относительно зеркальных отражений. В данном случае это значение соответствует $\eta = 0.87$ для подгруппы C_5 (т.е. циклической группой с одной поворотной осью n -порядка).

Проведем аналогичную оценку степени симметрии зигоморфного цветка (рис. 5, Б). Канонический анализ предполагает проведение только одной плоскости симметрии (m_1) (Donoghue et al., 1998). Однако симметрограмма показывает наличие 5-ти локальных максимумов (рис. 5, Г), что говорит об оси симметрии 5-го порядка. Другими словами, для зигоморфного (билатерально симметричного, или моносимметричного) цветка количественно показано наличие поворотной симметрии с минимальным значением $\eta = 0.74$. Анализ зеркальной симметрии показал, что минимальное значение $\eta = 0.65$ имеет место для плоскости m_4 . Таким образом, симметрия зигоморфного цветка также приближенно описывается группой C_{5v} , содержащей 6 нетривиальных подгрупп: одну подгруппу C_5 и пять подгрупп C_s . Однако, инвариантность этого зигоморфного цветка может быть охарактеризована минимальным значением $\eta = 0.65$ для подгруппы C_s (т.е. зеркального отражения).

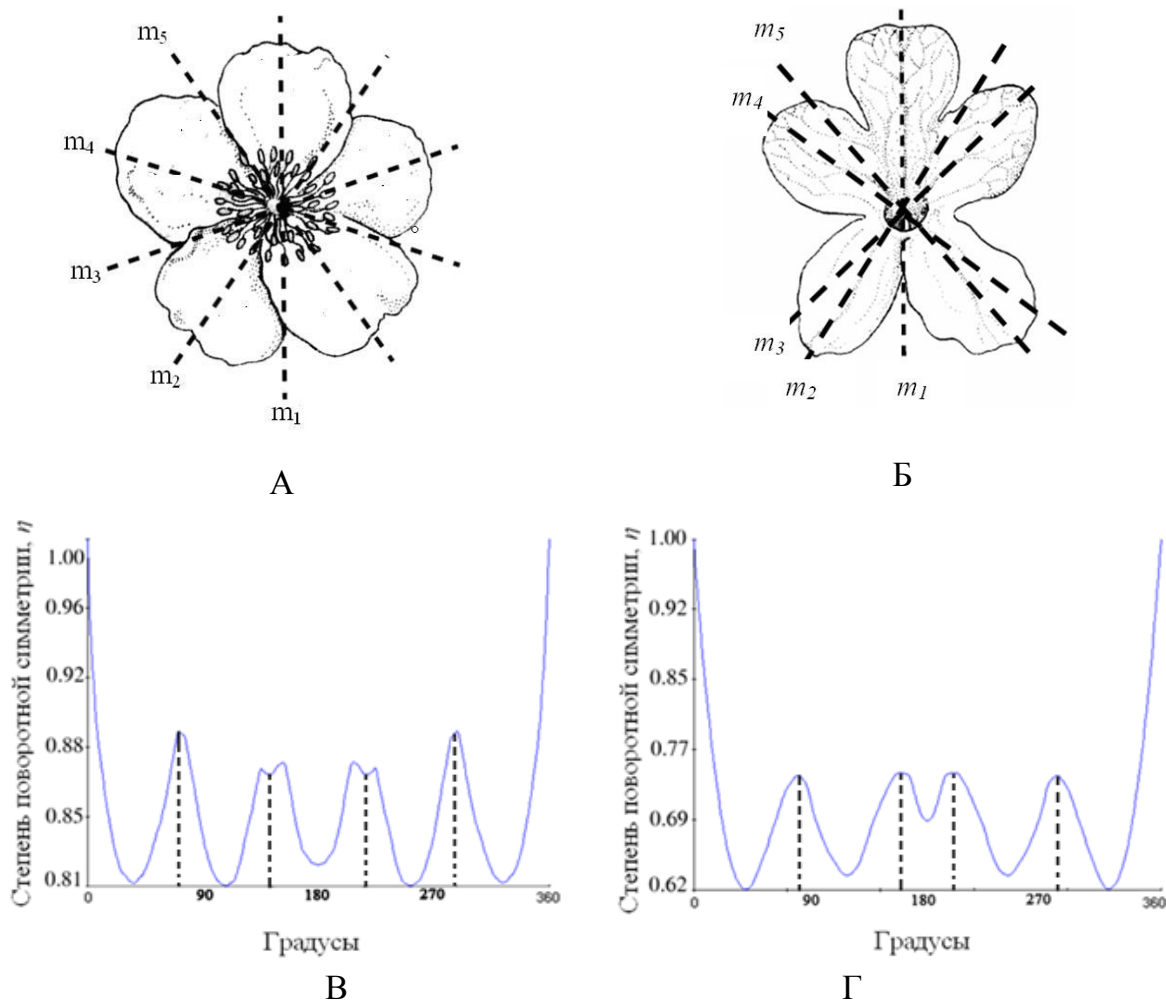
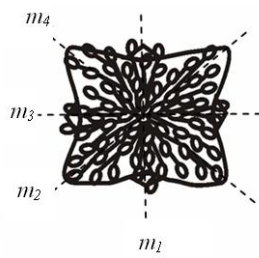


Рис. 5. Псевдосимметрия актиноморфного (А) и зигоморфного (Б) цветков (пояснения в тексте). Симметрограммы актиноморфного (В) и зигоморфного (Г) цветков.

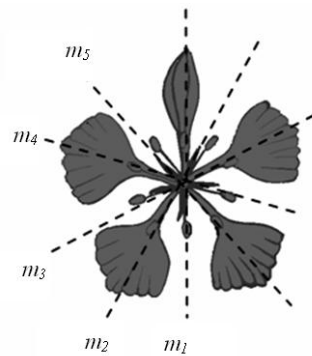
Итак, применение теории групп и количественных оценок псевдосимметрии позволяет формализовать анализ различий в геометрии цветка. Несмотря на то, что в данном тестовом примере оба модельных цветка (актиноморфный и зигоморфный) описываются группой C_{5v} , минимальные значения степени псевдосимметрии дают возможность четко диагностировать их различия, описываемые подгруппой C_5 ($\eta = 0.87$) для актиноморфного цветка и подгруппой C_s ($\eta = 0.65$) - для зигоморфного.

Формализация описания псевдосимметрии цветка с применением теории групп может оказаться полезной и в эволюционном аспекте. В рамках существующих гипотез происхождения цветка (Первухина, 1979; Donoghue et al., 1998; Endress, 1999, и др.), в качестве первичного, как правило, рассматривается актиноморфный цветок.

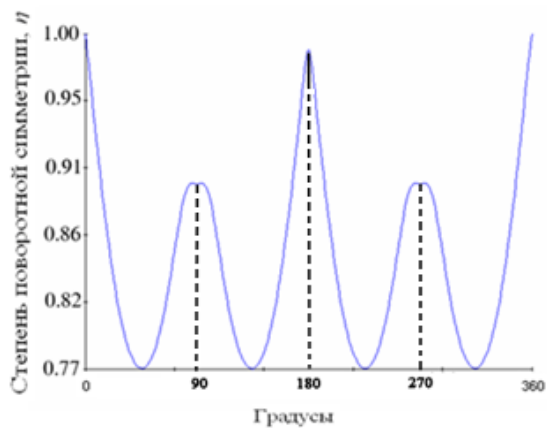
Формирование в процессе эволюции зигоморфного околоцветника, связывают со становлением энтомофилии. Механизм развития зигоморфности в онтогенезе на молекулярно-генетическом уровне объясняется экспрессией гена *CYCLOIDEA* (например, для *Antirrhinum majus* L. (1617) - *Scrophulariaceae*; *Asteridae*) (Donoghue et al., 1998). На рис. 6 и 7 представлен гипотетический эволюционный ряд, иллюстрирующий на примере сем. *Fabaceae* возможный переход от актиноморфного цветка питецелобиума многоголовчатого (*Pithecellobium polycephalum*) (рис.6, А) к выразительно зигоморфному цветку гороха посевного (*Pisum sativum* L.) (рис. 7, Б). При этом питецелобиум многоголовчатый характеризуется преимущественно анемофилией, для делоникса царского (*Delonix regia*) (рис. 6, Б) и комензии вьющейся (*Comensia scandens*) (рис.7, А)



А

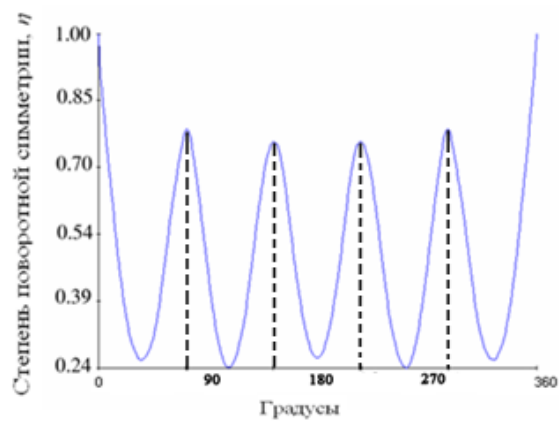


Б



Группа C_{4v}

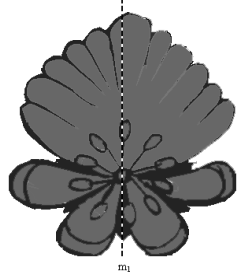
В



Группа C_{5v}

Г

Рис. 6. Псевдосимметрия цветков сем. *Fabaceae*: *Pithecellobium polycephalum* (А), *Delonix regia* (Б), а также их симметрограммы (В – Г), соответственно.



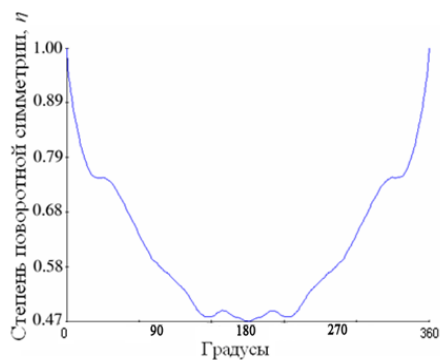
m_1

А



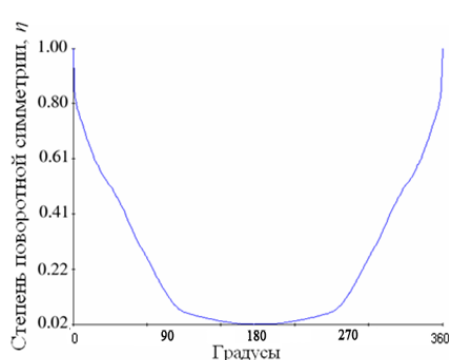
m_1

Б



Группа C_s

В



Группа C_s

Г

Рис. 7. Псевдосимметрия цветков сем. *Fabaceae*: *Samolensia scandens* (А), *Pisum sativum* (Б), а также их симметрограммы (В – Г), соответственно;

отмечается смешанный способ опыления (анемо- и энтомофилия), а цветки гороха посевного, как и других близких к нему видов, опыляются преимущественно перепончатокрылыми.

Как можно видеть из соответствующих симметрограмм, имеет место закономерный переход от групп псевдосимметрии C_{4v} и C_{5v} (рис. 6, В, Г), описывающих разную выраженность актиноморфности, к группе C_s (рис. 7, В, Г) для типично зигоморфного цветка, моносимметричность которого подтверждается видом симметрограммы, имеющей только один выраженный локальный максимум при повороте на $360^0(0^0)$.

Глава 5. Апробация методов автоматической количественной оценки степени псевдосимметрии растительных объектов с помощью комплекса программных продуктов BioPs

Программа BioPsLeaf была апробирована на листовых пластинках древесных растений (березы повислой, тополя дрожащего и липы сердцевидной). Программы BioPsFlower и BioPsLeaf – на раздельнолепестковом венчике гвоздики Фишера.

5.1 Влияние автотранспортной нагрузки на степень псевдосимметрии листовой пластинки

В качестве отклика на автотранспортную нагрузку рассмотрим изменение показателя псевдосимметрии листовых пластинок берёзы повислой. Наблюдения производились на четырёх автомагистралях г. Нижнего Новгорода в 2007–2008 гг. Регрессионный анализ, проведенный на основе полученных данных показал, что зависимость показателя псевдосимметрии (η) листовой пластинки березы повислой от интенсивности автотранспортной нагрузки (рис. 8) может быть удовлетворительно аппроксимирована полиномом второй степени: $y = -3 \cdot 10^{-9}x^2 + 6 \cdot 10^{-6}x + 0,934$, где y – показатель псевдосимметрии (η), а x – количество автотранспорта (автомобилей в час).

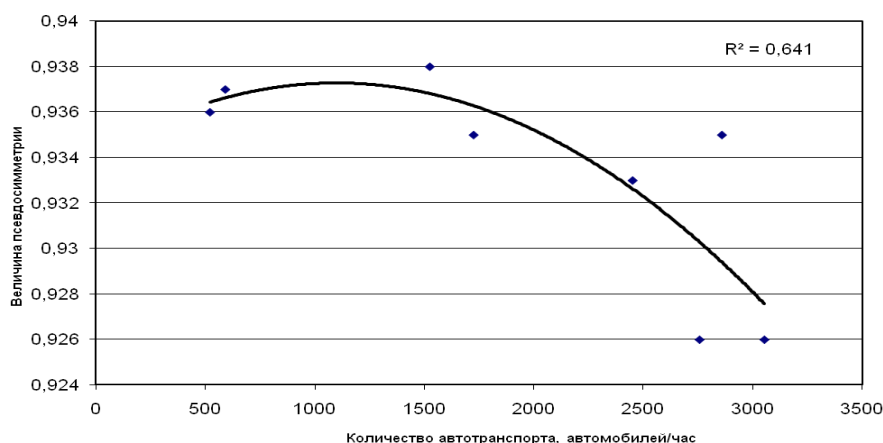


Рис. 8. Зависимость показателя псевдосимметрии листовых пластинок берёзы повислой от автотранспортной нагрузки на автомагистралях г. Н.Новгорода по объединенным данным 2007 - 2008 годов

Показатель детерминации $R^2=0,641$ ($p=0,045$) свидетельствует о той доле общей дисперсии отклика (η), которая обусловлена линейной регрессией. Не учтенные эффекты могут быть связаны с воздействием как биотических, так и абиотических факторов, например, стационарных источников загрязнения.

Регрессионной анализ зависимости величины ФА от числа автотранспортных средств, проведенный Мокровым (2005) показал, что за период 1998-2002 гг. эта

зависимость характеризуется показателем детерминации $R^2=0.66$, что сопоставимо с нашими данными оценки псевдосимметрии листовой пластинки берёзы повислой, полученные с помощью программы BioPsLeaf.

5.2 Влияние импактной химической нагрузки на степень псевдосимметрии листовой пластинки

В качестве модельного примера рассмотрим данные, полученные в рамках сотрудничества с компанией Raytheon («Рейтеон техникал сервисез компании», США), на основании международного соглашения между Российской Федерацией и США о дальнейшем сокращении и ограничении стратегических наступательных вооружений (СНВ-2). Одним из полигонов, на которых российская сторона производит дожигание остатков ракетного топлива (гептила) и демонтаж корпусов ракет является база ликвидации межконтинентальных баллистических ракет (ЦЛМБР) «Суроватиха» (Нижегородская область). Гептил, или несимметричный диметилгидразин (НДМГ) – чрезвычайно токсичное вещество 1 класса опасности, стабильное в окружающей среде, обладающее неспецифическим воздействием на организм и наличием отдаленных негативных эффектов (Сидоров и др., 2007).

Проверка межгодовых различий показателя псевдосимметрии листовых пластинок берёзы повислой, отобранных на импактном (ЦЛМБР «Суроватиха») и контрольном (с. Ст. Пустынь) участках, в 2006 – 2007 гг. была проведена с помощью критерия Крускала-Уоллиса (табл. 2) .

Таблица 2

Статистический анализ межгодовых различий в 2006-2008 гг. показателя псевдосимметрии листовых пластинок берёзы повислой на импактном (ЦЛМБР «Суроватиха») и контрольном (с.Ст. Пустынь) участках с помощью непараметрического критерия Крускала-Уоллиса (H)

Год	с.Ст. Пустынь			ЦЛМБР "Суроватиха"		
	Показатель псевдосимметрии, η	Статистические показатели		Показатель псевдосимметрии, η	Статистические показатели	
		Сумма рангов	Критерий Крускала-Уоллиса		Сумма рангов	Критерий Крускала-Уоллиса
2006	0,947±0,018	16373	$H=7,38$ $p=0,025^*$	0,918±0,073	14063	$H=6,54$ $p=0,038$
2007	0,937±0,027	13179		0,937±0,031	14228	
2008	0,944±0,024	15598		0,947±0,021	16859	

* Здесь и далее жирным шрифтом выделены статистически значимые отличия

Из табл. 2 следует, что по показателю псевдосимметрии листовых пластинок берёзы повислой существуют статистически значимые межгодовые различия по критерию Крускала-Уоллиса как на импактном (ЦЛМБР «Суроватиха») ($p=0.038$), так и на контрольном (с.Ст. Пустынь) ($p=0.025$) участках. Однако статистически значимые ($p=0.042$) различия между импактным и контрольным участками по критерию Манна-Уитни установлены только в 2006 году. В 2007 и 2008 гг. статистически значимых различий по показателю псевдосимметрии листовых пластинок берёзы повислой, отобранных на импактном (ЦЛМБР «Суроватиха») и контрольном (с.Ст. Пустынь), участках не выявлено. Полученные данные согласуются с результатами по оценке флуктуирующей асимметрии листовых пластинок берёзы повислой в этих же условиях.

Таким образом, процедура автоматической оценки псевдосимметрии листовых пластинок, является вполне корректной.

5.3. Видовая специфичность морфометрических показателей листовой пластинки берёзы повислой, липы сердцевидной и тополя дрожащего, произрастающих в нагорной и заречной частях г. Н. Новгорода

В соответствии с задачами исследования автоматические количественные методы измерения псевдосимметрии листовой пластинки и ее степени изрезанности были применены для оценки морфометрических показателей листовой пластинки берёзы повислой, липы сердцевидной и тополя дрожащего, произрастающих в нагорной и заречной частях г. Н.Новгорода

Нагорная часть г. Н. Новгорода. Анализ с применением критерия Крускала-Уоллиса показал статистически значимые различия показателей псевдосимметрии ($p < 0.001$) и степени изрезанности ($p < 0.001$) листовых пластинок березы, липы и тополя. Этот результат можно интерпретировать как наличие видоспецифичности использованных характеристик, выявленных апробируемым автоматическим методом. На следующем этапе анализа были проведены парные множественные сравнения между видами-индикаторами по указанным морфометрическим показателям с помощью критерия Данна. По показателю псевдосимметрии листовой пластинки имеются статистически значимые различия между березой повислой, с одной стороны, и липой сердцевидной ($p < 0.001$) и тополем дрожащем ($p < 0.001$) – с другой, тогда как между липой и тополем статистически значимые различия не выявлены ($p = 0.99$). По показателю степени изрезанности листовой пластинки статистически значимы различаются все три древесные породы ($p < 0.001$).

Заречная часть г. Н. Новгорода. В заречной части, также как и в нагорной, показатели псевдосимметрии и степени изрезанности листовых пластинок березы, липы и тополя, также статистически значимо различаются по критерию Крускала-Уоллиса. ($p < 0.001$). Парные множественные сравнения по критерию Данна между видами-индикаторами по показателям псевдосимметрии показали статистически значимые различия между тремя древесными породами. Напротив, по показателю степени изрезанности листовой пластинки статистически значимо ($p < 0.001$) отличается только береза повислая от липы сердцевидной и тополя дрожащего. В то же время, между липой и тополем статистически значимые различия не выявлены ($p = 0.99$). Таким образом, наличие видоспецифичности использованных характеристик, выявленное апробируемым автоматическим методом, подтвердилось и для заречной части города.

Сравнение нагорной и заречной частей г.Н.Новгорода по показателю псевдосимметрии листовых пластинок. Межбиотопические (нагорная и заречная части города) различия в показателях псевдосимметрии и степени изрезанности листовых пластинок индикаторах видов были изучены с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни. Анализ показал, что по показателю псевдосимметрии статистически значимые межбиотопические различия выявляются для березы повислой и липы сердцевидной ($p < 0.001$ и $p = 0.04$, соответственно), но отсутствуют для тополя дрожащего ($p = 0.67$). По показателю степени изрезанности листовой пластинки статистически значимые различия между нагорной и заречной частями города установлены только для березы повислой ($p < 0.001$). Таким образом, разработанные автоматические методы

измерения морфометрических показателей листовой пластинки позволяют выявить межбиотопические различия у изученных биоиндикаторов.

5.4. Апробация программ BioPsFlower и BioPSLeaf для оценки степени псевдосимметрии цветка гвоздики Фишера, как биоиндикационного показателя биообъектов с поворотной симметрией

Аналізу были подвергнуты две выборки, каждая из которых состояла из 17 цветков гвоздики Фишера, собранных в г. Дзержинске вблизи химических предприятий ООО «Корунд» и ОАО «Синтез». Расстояние между точками сбора составило 10 км.

Симметрограммы, полученные с помощью программы BioPsFlower, подтверждают выдвинутое предположение, что симметрия рассматриваемого цветка приближенно описывается группой C_{5v} , содержащей 6 нетривиальных подгрупп: одну подгруппу C_5 и пять подгрупп C_2 . В качестве примера приведена усреднённая симметрограмма цветков выборки ООО «Корунд» (рис. 9), на которых можно видеть 5 локальных максимумов при углах поворота $\sim 72^\circ, 144^\circ, 216^\circ, 288^\circ, 360^\circ(0^\circ)$, 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.

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. Пример этих данных для выборки ООО «Корунд» приведен в табл. 3.

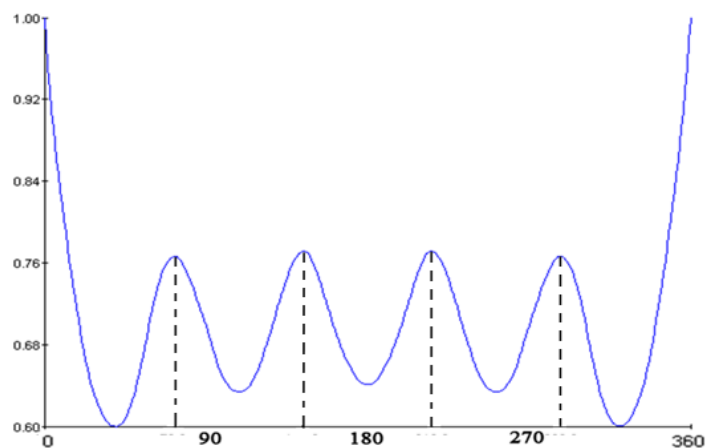


Рис. 9. График зависимости степени поворотной симметрии от угла поворота, полученный путем усреднения результатов для изображений 17 цветков гвоздики Фишера, отобранных вблизи ООО «Корунд». По оси ординат – степень поворотной симметрии, η (отн. ед.), по оси абсцисс - градусы.

В табл. 3 также 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». Анализ, проведенный с применением критерия

Крускала-Уолесса, показал, что в обеих выборках отсутствуют статистически значимые различия ($p > 0.05$) в показателях локальных максимумов поворотной псевдосимметрии цветков гвоздики Фишера для исследованных углов поворотов (72^0 , 144^0 , 216^0 и 288^0). 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 ООО «Корунд» и ОАО «Синтез») различия по показателям локальных максимумов поворотной псевдосимметрии цветков гвоздики Фишера также отсутствуют ($p = 0,18$).

Таблица 3

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

Номер цветка п/п	Угол поворота				Минимальное значение локального максимума поворотной псевдосимметрии
	72^0	144^0	216^0	288^0	
1	0,788	0,661	0,660	0,788	0,660
2	0,782	0,791	0,791	0,781	0,781
...
16	0,607	0,633	0,632	0,607	0,607
17	0,715	0,718	0,718	0,715	0,715
$\bar{x} \pm \sigma$	0,764 $\pm 0,071$	0,770 $\pm 0,089$	0,770 $\pm 0,090$	0,764 $\pm 0,071$	0,743 $\pm 0,083$

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 каждой выборки представленные в табл. 4 (на примере ООО «Корунд»).

Таблица 4

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

Номер цветка п/п	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
...
16	0,674	0,691	0,625	0,587	0,603	0,587
17	0,716	0,825	0,713	0,570	0,688	0,57
$\bar{x} \pm \sigma$	0,771 $\pm 0,080$	0,792 $\pm 0,066$	0,780 $\pm 0,069$	0,763 $\pm 0,111$	0,770 $\pm 0,076$	0,701 $\pm 0,071$

В таблице также указаны минимальные значения показателей билатеральной псевдосимметрии, характеризующие степень инвариантности билатеральной псевдосимметрии каждого цветка. Сравнение показателей билатеральной псевдосимметрии для плоскостей симметрии $m_1 \dots m_5$ лепестков цветков гвоздики Фишера в выборках, отобранных вблизи ООО «Корунд» ($p = 0.883$) и ОАО «Синтез» ($p = 0.839$), проведенное с применением критерия Крускала-Уолесса, показало отсутствие статистически значимых различий 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 ($p = 0,658$).

В табл. 5 приведены итоговые данные по анализу псевдосимметрии цветков гвоздики Фишера. Как уже говорилось инвариантность (симметричность) каждого цветка в целом может характеризоваться одной числовой характеристикой - минимальным значением симметрии среди всех её локальных максимумов для поворотной симметрии и степеней симметрии относительно зеркальных отражений. Так, например, для цветка №1 в выборке ООО «Корунд» это значение соответствует $\eta = 0.66$ (угол поворота 216^0) (табл. 3) 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. 5) (фактические данные по выборке ОАО «Синтез» приведены в тексте диссертации). Анализ биотопических различий показателей инвариантности (псевдосимметричности) цветков гвоздики Фишера, отобранных вблизи ООО «Корунд» и ОАО «Синтез», с помощью критерия Манна-Уитни не выявил их статистически значимых различий. 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 2008г., согласно которым уровень содержания загрязняющих веществ от стационарных источников ОАО «Синтез» и ООО «Корунд» не превышал допустимых значений (Состояние..., 2009).

Таблица 5

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

	Номер цветка п/п	Минимальное значение локального максимума поворотной псевдосимметрии	Минимальное значение показателя билатеральной псевдосимметрии	Инвариантность (псевдосимметричность) цветка
ООО Корунд	1	0,660*	0,749	0,660
	2	0,781	0,676	0,676

	16	0,607	0,587	0,587
	17	0,715	0,570	0,570
ОАО Синтез	1	0,756	0,588	0,588
	2	0,727	0,696	0,696

	16	0,714	0,628	0,628
	17	0,720	0,592	0,592

* - фоном выделены минимальные значения локальных максимумов, среди билатеральной и поворотной псевдосимметрии

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 ($p > 0,05$). Анализ объединенной выборки показал, что цветки гвоздики Фишера характеризуются изменчивостью по типам симметрии: ~ 24% инвариантны по поворотной псевдосимметрии, тогда как ~76% - по билатеральной.

Однако этот результат, впрочем, как ранее проведенные оценки, нуждаются в дополнительных исследованиях, поскольку отсутствие статистически значимых отличий может быть обусловлено недостаточным объемом выборок. Подчеркнем, что основной задачей этого раздела исследований 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 изменчивости в терминах типов симметрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги представленных материалов и попытаемся ответить на вопрос, что нового дает применение предложенных подходов для понимания сути структурной организации, функционирования, экологии и эволюции биообъектов, рассмотренных на примере листовой пластинки и цветка. Заметим, что применяемые от Линнея (Linné, 1751; Линней, 1989) до настоящего времени в отношении к цветкам термины «симметричный» и «асимметричный» практически целиком основываются на ощущениях естествоиспытателя. Однако, не все цветки, *кажущиеся* нам «симметричными» или «асимметричными», являются таковыми в полном объеме этих терминов. И те, и другие – «псевдосимметричны», но в разной степени, и количественная оценка степени псевдосимметричности является мерой их различия. Основой для применения псевдосимметрии для описания особенностей структуры биообъектов является то обстоятельство, что псевдосимметрические особенности проявляются как симметрические, что и позволяет применить аппарат теории групп к их *приближенному* описанию и исследованию. Еще раз подчеркнем, что геометрические характеристики материальных (физических или биологических структур), в частности, симметрия и псевдосимметрия, как правило, определяют лишь необходимые условия наличия тех или иных свойств данного объекта. Поэтому успех применения геометрических методов в биологии, также как и в физике возможен лишь вместе с соответствующими биологическими или физическими представлениями и методами (Чупрунов, 2007). Нам представляется, что одним из существенных результатов предлагаемого подхода является приведенная в работе аргументация о возможности с помощью алгоритма свертки получить количественные оценки псевдосимметрии биообъектов относительно преобразований любого типа с практически неограниченной степенью подробности. В свою очередь количественные подходы дают возможность максимально объективизировать характеристики биообъектов, получить корректные статистические оценки, автоматизировать процедуру расчета зеркальной или поворотной псевдосимметрии как

для структурно однородного объекта, так и с учётом его тонких особенностей. Важно, что предложенные подходы имеют широкое поле применения в биологии и экологии. В рассматриваемом контексте применения математических методов в биологии и экологии, существенным является фундаментальное значение законов симметрии, т.е. нахождение *инвариантов* и соответствующих им групп преобразований. Действительно, именно нахождение инвариантов в каком-либо классе объектов означает выявление их структурного базиса. В этой связи подчеркнем полученный в работе результат, позволяющий получить симметрограмму цветка, рассматриваемую как обобщенный геометрический образ типов его симметрии. При этом степень инвариантности (псевдосимметричности) цветка, определяется минимальным значением псевдосимметрии среди всех её локальных максимумов, что, в свою очередь, может служить количественным биоиндикационным показателем. Подчеркнем, что количественные подходы являются необходимой предпосылкой возможности применения теории групп для описания псевдосимметрии биообъектов. Уже первые полученные нами результаты свидетельствуют, что применение точечных групп симметрии позволяет теоретически предсказать возможные виды симметрии биообъектов, оптимизирует число операций, относительно которых необходимо рассчитывать степень инвариантности биоиндикаторов в процедуре биомониторинга. Для развития биосимметрии, как одного из эффективных инструментов познания закономерностей структурной организации биообъектов, теория групп, безусловно, является необходимым математическим аппаратом. Поэтому адаптация теории групп к описанию симметрии биообъектов (биосимметрии) важна не только в фундаментальном плане, но и в аспекте междисциплинарного взаимопонимания между биологами, физиками, кристаллографами и другими специалистами, языком общения между которыми служит математика. Заметим, что известные примеры применения теории групп в биосимметрии (Урманцев, 1974) сводились к фразеолого-семантическим дефинициям и фактически были лишены количественных оценок.

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.

ВЫВОДЫ

1. Псевдосимметрия листовой пластинки березы повислой, тополя дрожащего и липы сердцевидной приближенно описывается точечной группой

$$C_{2v} = \{e, m_1, m_2, 2^1\},$$

что обосновывает применение в качестве биоиндикаторного показателя степень псевдосимметрии не только при зеркальном отражении в плоскости m_1 (билатеральная псевдосимметрия), но и в плоскости m_2 (дорзовентральная псевдосимметрия).

2. Псевдосимметрия цветка гвоздики Фишера приближенно описывается точечной группой симметрии

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

что даёт возможность применения в качестве биоиндикаторного показателя инвариантность цветка – минимальное значение псевдосимметрии среди всех её локальных максимумов и степеней псевдосимметрии относительно зеркальных отражений.

3. Апробация программы BioPsLeaf для автоматизированной оценки псевдосимметрии листовых пластинок березы повислой, тополя дрожащего и липы сердцевидной на моделях автотранспортной нагрузки и видовой специфичности (г.Н. Новгород), а также импактного химического загрязнения (ЦЛМБР «Суроватиха») подтвердила ее работоспособность и пригодность для целей биоиндикации.

4. Применение программы BioPsFlower дало возможность установить, что цветки гвоздики Фишера характеризуются изменчивостью по типам симметрии: ~ 24% инвариантны по поворотной псевдосимметрии, тогда как ~76% - по билатеральной.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В изданиях рекомендованных ВАК:

1. Флуктуирующая асимметрия билатеральных признаков разноцветной ящурки *Eremias arguta* как популяционная характеристика / Гелашвили Д.Б., **Нижегородцев А.А.**, Епланова Г.В., Табачишин В.Г. // Известия Самарского научного центра РАН. Т.9, №4, 2007. С.941-949.

2. Ерофеева Е.А., Наумова М.М., **Нижегородцев А.А.** Морфогенетические и биохимические аспекты оценки стабильности развития на примере листовой пластинки берёзы повислой (*Betula pendula* Rorth.) // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. №5. – Н.Новгород, 2007. – 229с

3. Приложение теории групп к описанию псевдосимметрии биологических объектов / Гелашвили Д.Б., Чупрунов Е.В., Марычев М.О., Сомов Н.В., Широков А.И., **Нижегородцев А.А.** // Журн. общ. биологии. 2010. №6 (в печати).

В других изданиях:

4. Автоматическая оценка псевдосимметрии листовой пластинки берёзы повислой / Гелашвили Д.Б., Марычев М.О., Чалкова Н.В., Чупрунов Е.В., **Нижегородцев А.А.**, Мокров И.В., Силкин А.А. // Популяции в пространстве и времени: Сборник материалов VIII Всероссийского популяционного семинара, Н.Новгород, 2005. С. 60-62.

5. Оценка экологической безопасности деятельности базы ликвидации ракет в Суроватихе (Нижегородская область) 2002 – 2007 гг. / Гелашвили Д.Б., Силкин А.А., Пухнаревич Д.А., **Нижегородцев А.А.**, Залозных Д.В., Носкова О.С., Тихомиров Ю.П., Дмитриев А.И. / Приволжский научный журнал №4, 2008, С. 175-182.

6. **Нижегородцев А.А.**, Силкин А.А., Пухнаревич Д.А. Мониторинг стабильности развития индикаторных видов на территории прилегающей к центру ликвидации межконтинентальных ракет // Современное состояние и пути развития популяционной биологии: Материалы X Всероссийского популяционного семинара. Ижевск: КнигоГрад, 2008. С.289-294.

7. Силкин А.А., **Нижегородцев А.А.** Влияние условий хранения листовой пластинки березы повислой (*Betula pendula* Roth.) на величину флуктуирующей асимметрии // Современное состояние и пути развития популяционной биологии: Материалы X Всероссийского популяционного семинара. Ижевск: КнигоГрад, 2008. С.306-309.

8. Гелашвили Д.Б., Мокров И.В., Силкин А.А., **Нижегородцев А.А.** // Оценка качества среды в административных районах Н.Новгорода по стабильности развития древесных растений // Экология Нижнего Новгорода / под. ред. Д.Б. Гелашвили; Н.Новгород, 2008. Гл.14.1. С. 436-442.

9. **Нижегородцев А.А.**, Дымович Е.С., Гелашвили Д.Б. Показатель поворотной псевдосимметрии как индикатор состояния окружающей природной среды // Материалы III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Н. Тагил. 2010. Ч. 2. С. 75-78.