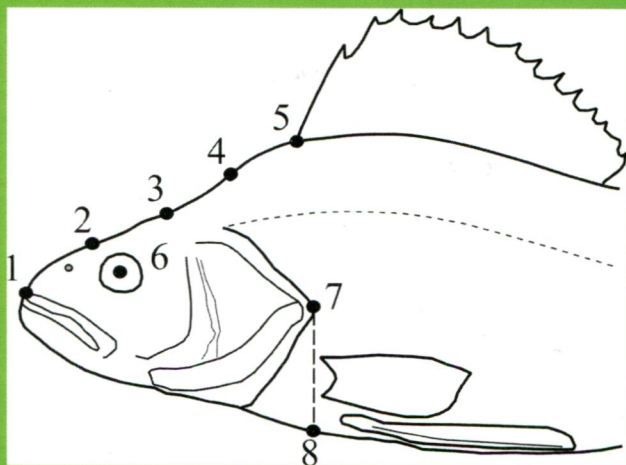
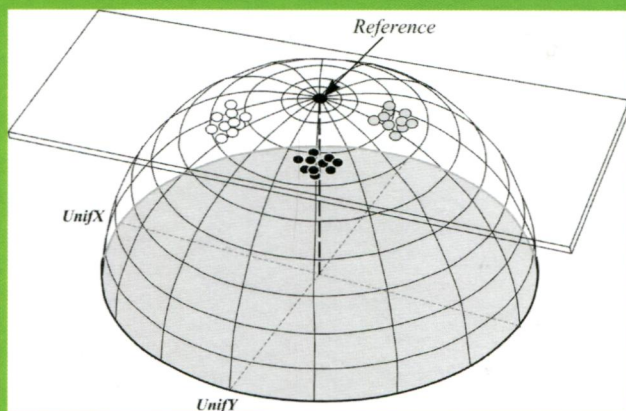


А. Г. Васильев
И. А. Васильева
А. О. Шкурихин

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОРФОМЕТРИЯ

от теории к практике



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
Институт экологии растений и животных

А. Г. Васильев, И. А. Васильева, А. О. Шкурихин

**ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОРФОМЕТРИЯ:
ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ**

ТОВАРИЩЕСТВО НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ КМК
Москва ❖ 2018

УДК 575.83:575.21

ББК 28.62+28.66

В19

Васильев А. Г., Васильева И. А., Шкурихин А. О. Геометрическая морфометрия: от теории к практике. М.: Товарищество научных изданий КМК 2018. 471 с.

В монографии представлено описание традиционных и новых методов в области геометрической морфометрии (ГМ). Книга предназначена для биологов, желающих освоить эти методы самостоятельно, и содержит детальные рекомендации для начинающих по применению наиболее популярных компьютерных программ (TPS, IMP, MorphoJ и др.). Предложен новый подход — фенотипометрия, позволяющая применять методы геометрической морфометрии для решения задач фенетики популяционной фенетики. Приведены примеры применения ГМ, включая решение задач таксономии, морфокартирования филогений и оценки филогенетического сигнала в морфологических данных у разных групп животных, оценки роли симпатрического формообразования в эволюции Дарвиновых вьюрков и флок африканских усачей (*Labeobarbus*). Изложен опыт разработки технологии экологического мониторинга на примере растений и животных с применением ГМ. Да словарь понятий и терминов, используемых в ГМ. Книга представляет интерес для эволюционистов, систематиков, морфологов, экологов, преподавателей, аспирантов и студентов биологических факультетов университетов.

Табл. 13, Рис. 132, Библиограф. 335 назв.

Ответственный редактор:

доктор биологических наук, профессор А. Г. Васильев

Рецензенты:

доктор биологических наук, профессор В. М. Ефимов

доктор биологических наук, профессор О. А. Жигальский

Монография подготовлена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН, а также при частичной финансовой поддержке Комплексной программы УрО РАН (проект № 18-4-4-28) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-04-01831-а).

© ФГБУН ИЭРиЖ УрО РАН, текст, 2018

© А.Г. Васильев, И.А. Васильева, А.О. Шкурихин
текст, иллюстрации, 2018

© Т-во научных изданий КМК, издание, 2018

ISBN 978-5-6040894-2-2

FEDERAL AGENCY FOR SCIENCE ORGANISATIONS
URAL BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
INSTITUTE OF PLANT AND ANIMAL ECOLOGY

A. G. Vasil'ev, I. A. Vasil'eva, A. O. Shkurikhin

**GEOMETRIC MORPHOMETRICS:
FROM THEORY TO PRACTICE**

KMK Scientific Press
MOSCOW ❖ 2018

Vasil'ev A.G., Vasil'eva I.A., Shkurikhin A.O. Geometric morphometrics: from theory to practice. M.: KMK Scientific Press, 2018. 471 p. Tabl. 13. Ill. 132. Bibl. 335.

The authors represent a review of traditional and modern methods in a science domain known as Geometric Morphometrics (GM). The monograph is intended for biologists wishing to become familiar with GM independently. It comprises of the set of detailed recommendations for beginners how to use the most popular software programs (TPS, IMP, MorphoJ et al.). The original approach named phenogrammetry is developed to use GM in the population phenetics and phenogenetics. The book contains some illustrations of GM-using in practice included the solving problems in animal taxonomy, the morphological mapping onto phylogenies and the testing phylogenetic signal in morphological data in various taxonomic groups. The role of sympatric speciation in evolution is discussed on the example of the Darwin's finches and the African fish-flock *Labeobarbus*. Know-how developing biomonitoring technology for plants and animals by means of GM is presented. The glossary of principal terms, notions and concepts used in GM is provided. The book is addressed to biologist's interested in the evolutionary theory, systematics, morphology, ecology as well as to the lecturers, magisters, aspirants and students of high schools.

EDITOR-IN-CHIEF: PROF. A.G. VASIL'EV

REVIEWERS:

PROF. V.M. EFIMOV

PROF. O.A. ZHIGAL'SKII

The Monograph was performed in the frame work of the State Contract of the Institute of Plant and Animal Ecology, UB RAS and partially supported by the Integrated Program of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (project no. 18-4-4-28) and Russian Foundation for Basic Research (project no. 16-04-01831-a).

ISBN 978-5-6040894-2-2

© A.G.Vasil'ev, I.A.Vasil'eva, A.O.Shkurikhin, 2018

© IPAE, UB RAS, 2018

© KMK Scientific Press, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ (А. Г. Васильев, И. А. Васильева, А. О. Шкурихин) | 5 |
| ВВЕДЕНИЕ (А. Г. Васильев) | 7 |
| Глава 1. СООТНОШЕНИЕ ПОНЯТИЙ ИЗМЕНЧИВОСТЬ И РАЗНООБРАЗИЕ, МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ПРИЗНАК И МОРФОСТРУКТУРА В ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОРФОМЕТРИИ (А. Г. Васильев, И. А. Васильева)..... | 14 |
| 1.1. Изменчивость и разнообразие формы | 14 |
| 1.2. Морфологический признак и морфоструктура..... | 22 |
| 1.3. Фенотип, фенотипическая изменчивость и проблемы классификации | 26 |
| Глава 2. ВВЕДЕНИЕ В ГЕОМЕТРИЧЕСКУЮ МОРФОМЕТРИЮ: ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ (А. Г. Васильев, А. О. Шкурихин)..... | 33 |
| 2.1. История появления геометрической морфометрии | 34 |
| 2.2. Кратко о специфике традиционной и геометрической морфометрии | 43 |
| 2.3. Типы меток-ландмарков (landmarks) и их комбинирование | 46 |
| 2.4. Два этапа оцифровки изображений объектов | 53 |
| 2.5. Размер центроида и использование линейки | 63 |
| 2.6. Методы суперимпозиции, использующие аутлайны и ландмарки | 66 |
| 2.7. Краткий очерк теории формы..... | 71 |
| 2.8. Частные и относительные деформации, энергия искривления и метод тонкопластинных сплайнов | 90 |
| 2.9. Визуализации изменений формы в геометрической морфометрии..... | 105 |
| 2.10. Источники возникновения ошибок в геометрической морфометрии..... | 116 |
| Глава 3. ОБЗОР КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОРФОМЕТРИИ И ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМ (А. Г. Васильев, А. О. Шкурихин) | 124 |
| 3.1. Классический пакет программ TPS (Thin-Plate Spline)..... | 125 |
| 3.2. Программный комплекс IMP (Integrated Morphometrics Package)..... | 173 |
| 3.3. Элементы геометрической морфометрии в программе PAST (PAleontological STatistics) | 192 |
| 3.4. Визуализация изменчивости формы в программе APS (A Procrustes Software) и пакете программ Morphologica ² | 197 |
| 3.5. Пакет программ CLIC (Collecting Landmarks for Identification and Characterization) | 205 |

| | |
|---|-----|
| 3.6. Оценка флуктуирующей асимметрии формы биологических объектов с помощью программы SAGE (Symmetry and Asymmetry in Geometric Data) | 208 |
| 3.7. Возможности программы MorphoJ | 213 |
| Глава 4. R-ПРОГРАММЫ ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОРФОМЕТРИИ (А. Г. Васильев, Т. С. Ослина) | 232 |
| Глава 5. ФЕНОГРАММЕТРИЯ – НОВЫЙ МЕТОД ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФЕНЕТИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗМЕНЧИВОСТИ ДИСКРЕТНЫХ МОРФОСТРУКТУР (А. Г. Васильев, И. А. Васильева) | 253 |
| Глава 6. НОВЫЕ ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ СИСТЕМАТИКИ И ЭВОЛЮЦИОННОЙ ЭКОЛОГИИ МЕТОДАМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОРФОМЕТРИИ: МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ ФИЛОГЕНИЙ (А. Г. Васильев, И. А. Васильева) | 290 |
| 6.1. Изменчивость формы головы и клюва у галапагосских Дарвиновых вьюрков и морфологическое картирование разных версий их молекулярных филогений | 297 |
| 6.2. Анализ разнообразия формы тела и головы симпатрических эквидов рыб в составе флота <i>Labeobarbus</i> оз. Тана в Эфиопии: геометрическая морфометрия | 326 |
| Глава 7. ПРИНЦИПЫ, МЕТОДЫ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОПУЛЯЦИОННОГО И ЦЕНОТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОРФОМЕТРИИ (А. Г. Васильев, И. А. Васильева) | 360 |
| 7.1. Изменчивость размеров, формы и структуры листьев берёзы повислой в зоне воздействия Средне-Уральского медеплавильного завода: технология мониторинга | 364 |
| 7.2. Популяционно-ценотический мониторинг состояния форпостных группировок растений и животных | 392 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ (А. Г. Васильев, И. А. Васильева, А. О. Шкурихин) | 406 |
| СЛОВАРЬ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ И ТЕРМИНОВ (И. А. Васильева, А. Г. Васильев) | 419 |
| БЛАГОДАРНОСТИ | 433 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 434 |
| УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ | 453 |
| ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ | 459 |
| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | 466 |

| | |
|---|-----|
| 3.6. Оценка флуктуирующей асимметрии формы биологических объектов с помощью программы SAGE (Symmetry and Asymmetry in Geometric Data) | 208 |
| 3.7. Возможности программы MorphoJ | 213 |
| Глава 4. R-ПРОГРАММЫ ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОРФОМЕТРИИ (А. Г. Васильев, Т. С. Ослина) | 232 |
| Глава 5. ФЕНОГРАММЕТРИЯ – НОВЫЙ МЕТОД ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФЕНЕТИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗМЕНЧИВОСТИ ДИСКРЕТНЫХ МОРФОСТРУКТУР (А. Г. Васильев, И. А. Васильева) | 253 |
| Глава 6. НОВЫЕ ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ СИСТЕМАТИКИ И ЭВОЛЮЦИОННОЙ ЭКОЛОГИИ МЕТОДАМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОРФОМЕТРИИ: МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ ФИЛОГЕНИЙ (А. Г. Васильев, И. А. Васильева) | 290 |
| 6.1. Изменчивость формы головы и клюва у галапагосских Дарвиновых вьюрков и морфологическое картирование разных версий их молекулярных филогений | 297 |
| 6.2. Анализ разнообразия формы тела и головы симпатрических эквидов рыб в составе флота <i>Labeobarbus</i> оз. Тана в Эфиопии: геометрическая морфометрия | 326 |
| Глава 7. ПРИНЦИПЫ, МЕТОДЫ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОПУЛЯЦИОННОГО И ЦЕНОТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОРФОМЕТРИИ (А. Г. Васильев, И. А. Васильева) | 360 |
| 7.1. Изменчивость размеров, формы и структуры листьев берёзы повислой в зоне воздействия Средне-Уральского медеплавильного завода: технология мониторинга | 364 |
| 7.2. Популяционно-ценотический мониторинг состояния форпостных группировок растений и животных | 392 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ (А. Г. Васильев, И. А. Васильева, А. О. Шкурехин) | 406 |
| СЛОВАРЬ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ И ТЕРМИНОВ (И. А. Васильева, А. Г. Васильев) | 419 |
| БЛАГОДАРНОСТИ | 433 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 434 |
| УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ | 453 |
| ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ | 459 |
| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | 466 |

CONTENTS

| | |
|--|-----|
| FOREWORD (A. G. Vasil'ev, I. A. Vasil'eva, A. O. Schkurikhin)..... | 5 |
| INTRODUCTION (A. G. Vasil'ev)..... | 7 |
| Chapter 1. THE RELATIONSHIPS BETWEEN CONCEPTS OF VARIABILITY AND DIVERSITY, AND BETWEEN MORPHOLOGICAL CHARACTER AND MORPHOSTRUCTURE IN GEOMETRIC MORPHOMETRICS (A. G. Vasil'ev, I. A. Vasil'eva) | 14 |
| 1.1. Variability and diversity of shape..... | 14 |
| 1.2. Morphological character and morphostructure | 22 |
| 1.3. Phenotype, phenotypic variability and problems of classification | 26 |
| Chapter 2. INTRODUCTION TO GEOMETRIC MORPHOMETRICS: BASIC PRINCIPLES AND APPROACHES (A. G. Vasil'ev, A. O. Schkurikhin)..... | 33 |
| 2.1. The history of geometric morphometrics appearance | 34 |
| 2.2. Short outline of traditional and geometric morphometrics specificity | 43 |
| 2.3. Landmark types and their combining | 46 |
| 2.4. Two stages in images digitizing | 53 |
| 2.5. Centroid size and ruler usage | 63 |
| 2.6. Superimposition methods using outlines and landmarks..... | 66 |
| 2.7. About the shape theory | 71 |
| 2.8. Partial and relative warps, bending energy and the method of thin-plates splines..... | 90 |
| 2.9. Visualizations of shape changes in geometric morphometrics | 105 |
| 2.10. Sources of measurement errors in geometric morphometrics..... | 116 |
| Chapter 3. OVERVIEW OF SOFTWARE PROGRAMS USING IN GEOMETRIC MORPHOMETRICS AND COMMON SUGGESTIONS FOR USERS (A. G. Vasil'ev, A. O. Schkurikhin)..... | 124 |
| 3.1. TPS (Thin-Plate Spline) – classic program package | 125 |
| 3.2. IMP – Integrated Morphometrics Package..... | 175 |
| 3.3. The elements of geometric morphometrics in PAST (PAleontological STatistics) | 195 |
| 3.4. Visualization of shape variability in APS (A Procrustes Software) and Morphologica ² | 197 |
| 3.5. CLIC (Collecting Landmarks for Identification and Characterization) | 205 |

| | |
|--|-----|
| 3.6. Estimation of fluctuating asymmetry in shape of biological units by means of SAGE (Symmetry and Asymmetry in Geometric Data)..... | 208 |
| 3.7. User's options of MorphoJ program | 213 |
| Chapter 4. R–PROGRAMS FOR GEOMETRIC MORPHOMETRICS (A. G. Vasil'ev, T. S. Oslina) | 232 |
| Chapter 5. PHENOGRAMMETRY AS A NEW METHOD OF GEOMETRIC PHENETICS TO ANALYSE DISCRETE VARIATIONS OF MORPHOSTRUCTURES (A. G. Vasil'ev, I. A. Vasil'eva)..... | 253 |
| Chapter 6. NEW WAYS TO DECIDE PROBLEMS IN SYSTEMATICS AND EVOLUTIONARY ECOLOGY BY GEOMETRIC MORPHOMETRICS METHODS: MAPPING MORPHOMETRIC DATA ONTO A PHYLOGENY (A. G. Vasil'ev, I. A. Vasil'eva) | 290 |
| 6.1. Shape variations of head and beak in the Galapagos finches and mapping morphometric data onto different versions their phylogeny | 297 |
| 6.2. Disparity analysis of body and head shapes in the sympatric ecospecies of fishes of <i>Labeobarbus</i> flock from Tana Lake in Ethiopia: geometric morphometrics | 326 |
| Chapter 7. PRINCIPLES, METHODS AND NEW TECHNOLOGIES OF POPULATION AND COENOTIC MONITORING IN PLANTS AND ANIMALS USING GEOMETRIC MORPHOMETRICS (A. G. Vasil'ev, I. A. Vasil'eva)..... | 360 |
| 7.1. Variations in size, shape and structure of leaves in Weeping Birch (<i>Betula pendula</i> Roth.) from the impact zone of the Middle-Ural copper plant: biomonitoring technology | 364 |
| 7.2. Population and coenotic monitoring of outpost groups states in plants and animals | 392 |
| CONCLUSION (A. G. Vasil'ev, I. A. Vasil'eva, A. O. Schkurikhin) | 406 |
| GLOSSARY OF PRINCIPAL TERMS (I. A. Vasil'eva, A. G. Vasil'ev)..... | 419 |
| ACKNOWLEDGEMENTS..... | 433 |
| REFERENCES | 434 |
| AUTHOR INDEX | 453 |
| SUBJECT INDEX | 459 |
| AUTHORS..... | 466 |