

## БАЗА ДАННЫХ ОЧЕРТАНИЙ СТВОРОК ДИАТОМОВЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

А.М. Лях<sup>1</sup>, С.Г. Лелеков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»,  
РФ, г. Севастополь, пр-т Нахимова, 2

*E-mail: me@antonlyakh.ru*

<sup>2</sup> Севастопольский государственный университет,

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

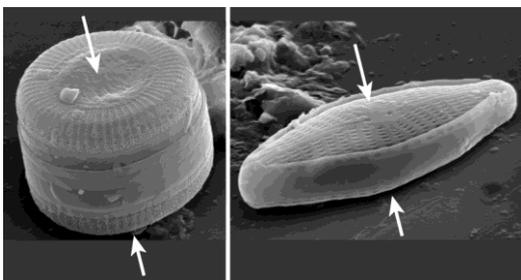
*E-mail: p1859@yandex.ru*

Диатомовые водоросли – широко распространенные микроскопические водные автотрофы, покрытые кремниевым панцирем. Створки диатомовых – это крупные хорошо заметные элементы панциря. Очертания створок используют для решения многих задач: идентификации видов, построения геометрических моделей панцирей, оценки состояния водоемов и в качестве шаблонов для систематизации изображений микроводорослей. Для решения этих задач необходимы образцы характерных форм створок. В работе представлена структура базы данных для хранения очертаний створок диатомовых, рассмотрены способы математического описания контуров створок и приведены сценарии взаимодействия с базой данных. База данных доступна по адресу: [3d-microalgae.org/diatoms/valve-shapes](http://3d-microalgae.org/diatoms/valve-shapes)

**Ключевые слова:** анализ форм, морфологическая изменчивость, тератологические формы, база силуэтов, классификация, визуальный индекс, диатомовые водоросли

Поступила в редакцию: 08.08.2022. После доработки: 05.09.2022.

**Введение.** Диатомовые водоросли – это распространенные микроскопические одноклеточные водные фототрофы, окруженные кремниевым панцирем. Строение панциря диатомовых подобно устройству чашки Петри: он также состоит из двух частей, одна из которых накрывает другую. «Донышки» панциря называют створками (рис. 1).



**Рис. 1.** Кремниевые панцири диатомовых водорослей под электронным микроскопом; стрелки указывают на створки

**Fig. 1.** Diatom siliceous frustules under an electron microscope; arrows point to valves

*Цель работы* заключалась в разработке базы данных для хранения очерта-

ний (форм) створок диатомовых водорослей. *Задачи работы* включали разработку структуры базы данных, способов представления и хранения форм створок и описание сценариев взаимодействия с базой данных.

**Базы контуров биологических объектов** активно используют для обучения систем искусственного интеллекта автоматической классификации, распознаванию и опознанию объектов. Среди этих баз всего лишь несколько содержат контуры частей живых организмов, например отолитов рыб [1] или листьев растений [2]. База с очертаниями створок диатомовых водорослей в настоящее время отсутствует.

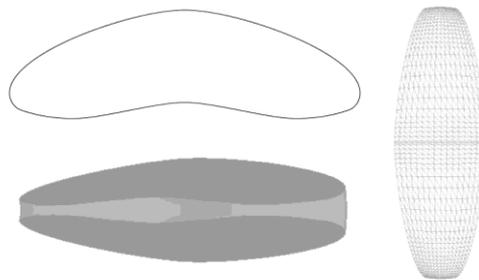
**Для чего используют контуры створок диатомовых.** Очертания створок диатомовых применяют для решения разнообразных задач: таксономической идентификации диатомовых, классификации форм и геометрического моделирования их панцирей, экологического мониторинга водоемов, систематизации изображений микроводорослей.

Так, для корректной таксономической идентификации организмов важно выделить такую совокупность признаков, которая позволит четко разделить множество особей на отдельные таксоны [3]. В диатомологии львиную долю диагностических признаков составляют морфологические особенности створок. Саму форму створок также используют в качестве диагностического признака, однако она относится к слабым признакам. Такой признак сам по себе не позволяет выделить единственный вид или род (за редким исключением видов с уникальными формами), но, в совокупности с другими признаками, может оказать решающее значение на результат.

Классификация организмов по форме подразумевает, что при помощи математических методов контуры организмов преобразуют в наборы чисел, которые сравнивают друг с другом при помощи выбранной функции сходства. После выделяют классы организмов с похожими формами. Чтобы классы совпали с реальными таксонами, необходимо заранее подготовить образцы характерных форм представителей каждого таксона и использовать их при классификации в качестве типовых образцов.

Другая задача, в которой применяются очертания створок, заключается в точной оценке объемов и площадей поверхности оболочек микроводорослей [4, 5]. Для этого используют геометрические модели подобные трехмерной форме микроорганизмов. Классическая модель представляет собой совокупность стандартных геометрических тел: цилиндров, конусов, полусфер, призм [4, 6]. Такая модель плохо аппроксимирует форму, что снижает точность оценки морфометрических параметров. В усовершенствованном методе правильную трехмерную модель панциря диатомовой конструируют из очертаний створок и сечений панциря плоскостями (рис. 2) [5]. Размеры модели подгоняют к размерам моделируемого организма, после полагают, что объем и площадь поверхности модели соответствует таковым значениям микроводоросли. Полученные объемы и площади поверхностей ис-

пользуют для решения ряда гидробиологических, экологических и общебиологических задач. Так как формы створок многих видов диатомовых совпадают, то заранее созданная база типичных очертаний створок ускорит процесс построения моделей и оценки морфометрических параметров.



**Рис. 2.** Контур створки диатомовой использован для создания 3д-модели панциря  
**Fig. 2.** The valve contour of a diatom is used for constructing 3d-model of a frustule

Экологическую оценку состояния водоемов часто выполняют на основе таксономического состава и морфометрических характеристик диатомовых водорослей [7, 8]. При этом рекомендуют оценивать обилие аномальных форм створок диатомовых [9]. Для этого следует знать форму нормальных створок, то есть иметь набор образцов характерных форм.

Наконец, очертания створок применяют для упорядочивания (индексирования) фотографий диатомовых [10]. Для этого каждой сфотографированной створке сопоставляют форму из заданного набора. В результате форма становится шаблоном (визуальным индексом), позволяющим выбрать фотографии похожих на нее створок. Такой индекс позволяет пользователю работать с образом формы, а не с ее описанием.

Все вышеизложенное подчеркивает необходимость создания базы очертаний створок диатомовых микроводорослей.

**Описание плоской формы.** Способы описания плоских форм объектов делятся на качественные и количественные. К качественным относится словесное описание формы. Оно может быть достаточно подробным или излишне кратким. Подробное описание упомина-

ет мельчайшие детали строения границы объекта и призвано вызвать у читающего, по возможности, точный образ формы. Для этого в тексте рекомендуют использовать базовые лингвистические характеристики форм [11], понятные большинству читателей. Краткое описание характеризует форму одним-тремя словами. В кратком описании форму либо сравнивают с общеизвестными аналогами, например, геометрическими фигурами: круглая, овальная, прямоугольная, треугольная, либо описание составляют из терминов, суть которых раскрывается в специализированных словарях, например [12].

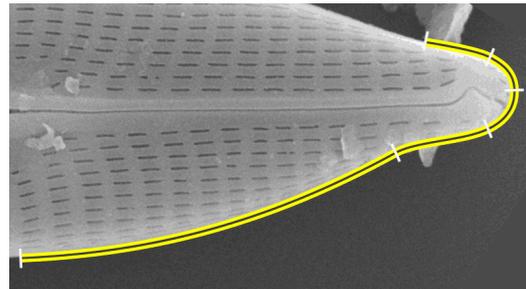
Несмотря на это, словесные описания форм остаются достаточно субъективными. Их сложно сравнить друг с другом, так как всегда есть вероятность неверной трактовки фразы и ошибочных выводов о совпадении отличающихся форм. Поэтому формы стараются описать количественными показателями.

Количественные характеристики форм очень разнообразны [13, 14]. Для количественного анализа форм требуют, чтобы числовые характеристики форм были инвариантными к положению, повороту и размеру исходного объекта. Такие инвариантные характеристики называют *дескрипторами формы* (англ., *shape descriptors*), так как считается, что их значения зависят только от формы объекта [13, 15]. Для вычисления дескриптора формы достаточно иметь оцифрованный (векторный) контур границы объекта. Поэтому в базе данных мы, в первую очередь, храним такие контуры.

Для математического описания контура створок мы используем кубические кривые Безье, которые гладко стыкуются друг с другом<sup>1</sup> (рис. 3).

Кривые Безье выбраны из следующих соображений. Во-первых, инструмент для построения кривых Безье есть в векторных редакторах, то есть де факто кривые стали стандартом для построения

векторных линий. Во-вторых, представление контура кривыми Безье компактно, потому что каждую точку кубической кривой Безье можно найти по координатам четырех управляющих вершин. Следовательно, для описания замкнутой линии, состоящей из  $n$  кривых Безье, потребуются координаты всего лишь  $3n$  управляющих вершин. Наконец, кубическая кривая Безье входит в подмножество команд языка масштабируемой векторной графики (рис. свг, англ. *svg – scalable vector graphics*), который является одним из стандартных способов представления плоских векторных объектов. Таким образом, вместо множества координат точек контура мы используем небольшой набор координат вершин кривых Безье, которые кодируем в формате свг и записываем в файл. В результате каждому контуру соответствует отдельный свг-файл.



**Рис. 3.** Контур створки состоит из гладко соединенных кубических кривых Безье  
**Fig. 3.** The valve contour consists of smoothly connected cubic Bezier curves

В базе данных мы также храним числовые дескрипторы формы. В качестве базовых дескрипторов использованы коэффициенты эллиптического преобразования Фурье [15]. Их несложно вычислить, они позволяют строить усредненные формы и достаточно хорошо разделяют отличающиеся формы [16].

Для построения контура створки мы используем фотографии диатомовых водорослей. Из-за индивидуальной изменчивости, влияния окружающей среды и иных причин сфотографированные створки диатомовых чаще всего не выглядят правильно симметричными. Это известный факт, наблюдаемый у всех

<sup>1</sup> При гладком соединении двух кривых Безье образуется кривая без особых точек, имеющая непрерывную производную в каждой точке.

живых организмов: «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» [17, с. 3].

Псевдосимметрия широко распространена в природе. Ее необходимо учитывать при изучении индивидуальной изменчивости или воздействия среды на морфогенез и онтогенез организмов. Однако наша задача заключается в создании контура типовой створки, символизирующую вид определенного класса форм. Поэтому мы не учитываем псевдосимметричные отклонения и строим правильные симметричные створки.

Идеальные створки обладают зеркальной симметрией, центральной симметрией или симметрией вращения – это все элементы группы точечных симметрий [18]. Для построения створок с данными типами симметрий мы оконтуриваем только часть границы изображения диатомовой: половину, четверть или меньшую часть в зависимости от типа симметрии. Построенную кривую мы дублируем, смещаем или вращаем и объединяем в один контур (рис. 4). Результат помещаем в базу данных.

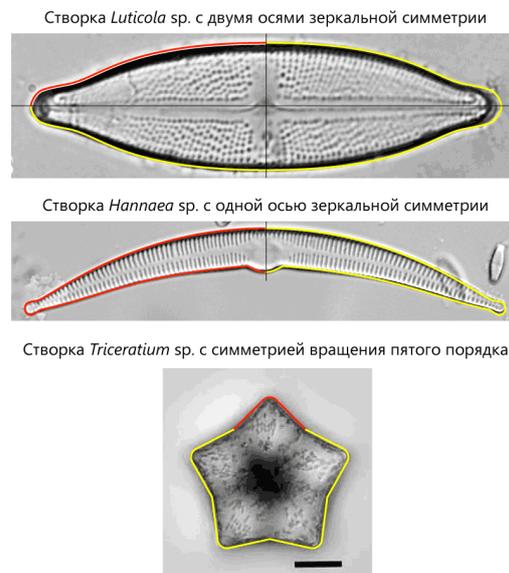
**База данных** состоит из четырех таблиц: контуров, дескрипторов контуров, названий контуров и описаний дескрипторов (рис. 5).

Поля таблицы контуров содержат уникальный идентификатор, название свг-файла с контуром и служебную информацию.

Таблица дескрипторов связывает контуры со значениями дескрипторов. Одному контуру может соответствовать несколько дескрипторов. Значения каждого дескриптора хранит отдельная запись таблицы. Значения записаны в json-структуре, в которой ключом является аббревиатура дескриптора. Расшифровка аббревиатур и описание дескрипторов вынесено в другую таблицу.

Некоторые формы створок диатомовых имеют собственные названия: верев-

теновидная, булавовидная [12]. Они вынесены в отдельную таблицу.



**Рис. 4.** Для создания симметричного контура, мы обводим только часть границы створки (красную), затем из нее строим полный контур (желтый)

**Fig. 4.** To create a symmetrical contour, we outline only part of the valve edge (red), then use it to construct a full contour (yellow)

Как видно, структура БД не привязана только к формам диатомовых водорослей и может хранить описания контуров любых объектов.

Кроме упомянутых таблиц БД также включает таблицу с идентификаторами внешних ресурсов, которые содержат фотографии и сведения о фотографиях диатомовых водорослей, и таблицу с группами похожих форм.

**Внешние связи.** База данных состоит не из абстрактных геометрических фигур, а из идеализированных очертаний реальных створок диатомовых. Каждое очертание створки построено по фотографии диатомовой. Фотографии хранит внешняя база изображений [10], с которой связана база форм.

База изображений является комплексным информационным объектом, который связывает изображения с источниками изображений и названиями таксонов (видов). Она включает как неопубликованные фотографии, так и фотографии, опубликованные в статьях и монографиях.

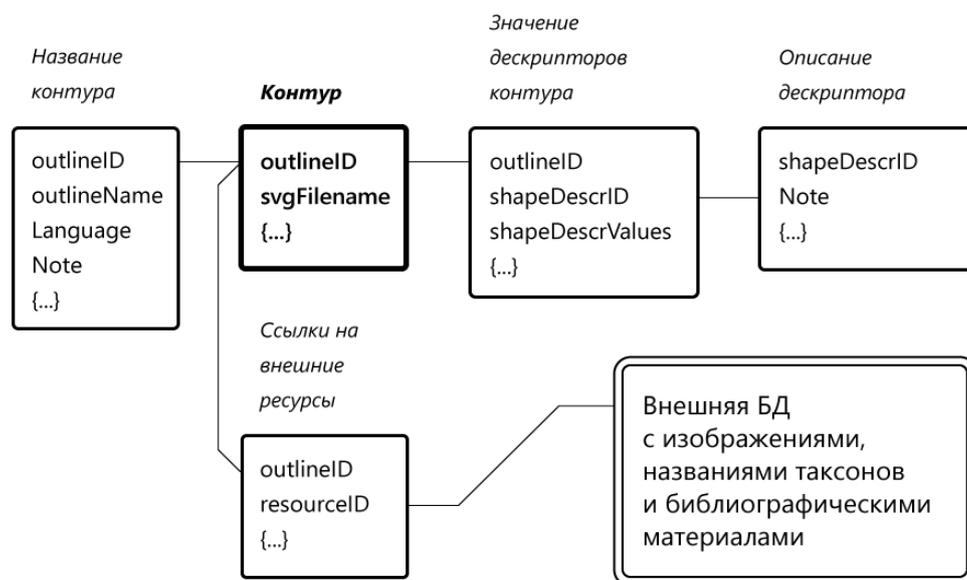


Рис. 5. Структура базы очертаний створок диатомовых  
 Fig. 5. The structure of the database with diatom valve outlines

Для неопубликованных фотографий известны имена исследователей и контактная информация, для вторых – выходные данные публикаций и номера иллюстраций. Эти сведения характеризуют источник изображений. Для части фотографий также известны видовые названия диатомовых. Таким образом внешняя база данных каждому оцифрованному контуру сопоставляет изображение диатомовой, сведения об источнике изображения и, в некоторых случаях, название вида.

В качестве базы изображений мы используем данные *Архипа* – библиотеки опубликованных изображений микроводорослей (3d-microalgae.org/archip). Архип хранит опубликованные фотографии, которые соотнесены с названиями видов и выходными данными публикаций, и предоставляет дистанционный доступ к собранному материалу [19].

**Дистанционный доступ** к базе данных контуров обеспечивает специальный интерфейс. Он позволяет получить сведения о форме по ее уникальному идентификатору или названию, если у формы есть название. Сведения включают описание кривой, ограничивающей створку, и дополнительные данные. В зависимости от запроса, результирующая кривая будет представлена:

- последовательностью координат управляющих вершин кубических кривых Безье, закодированных в формате svg в команде path;
- последовательностью координат точек, полученных путем дискретизации кривых Безье с помощью алгоритма адаптивного разбиения [20];
- значениями первых гармоник эллиптического преобразования Фурье, которые не зависят от положения, размера и поворота формы [16].

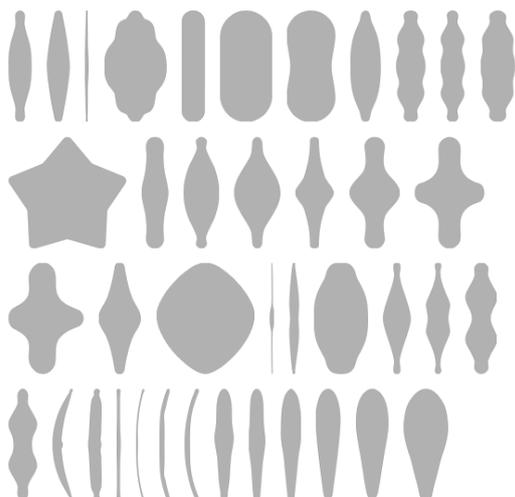
Помимо одной формы, система может вернуть перечень всех форм.

Расширенный запрос к базе данных также вернет:

- ссылку на ресурс с изображением створки диатомовой, на основе которого построен контур;
- список видов диатомовых, формы створок которых похожи на заданную форму.

Для выполнения расширенного запроса система обращается к внешней базе данных, а также использует таблицу с группами похожих форм.

**Похожие формы.** В процессе наполнения базы возникает ситуация, когда новая форма похожа на уже имеющиеся (рис. 6).



**Рис. 6.** Формы многих створок похожи  
**Fig. 6.** The shapes of many valves are similar

В этом случае мы все равно сохраняем ее в базе данных, так как любая форма несет информацию о морфологической или онтогенетической изменчивости вида организма. Если эта форма похожа на другие, то это значит, что такой-то вид в процессе развития принимает форму, которая встречается у других видов. Это необходимо знать для понимания закономерностей адаптаций организмов к схожим условиям обитания, корректной идентификации видов, построения пространств форм (морфопро-странств) и решения иных задач.

С другой стороны похожие формы затрудняют построение визуального индекса изображений, так как в этом случае непонятно, какую из форм использовать в качестве типового образца<sup>2</sup>. Для решения этой проблемы необходим алгоритм кластеризации форм по степени схожести и выбора характерного экземпляра из каждого кластера. На данный момент такой алгоритм не реализован. Но он может функционировать наподобие известных алгоритмов классификации следующим образом: при помещении формы в базу данных алгоритм вы-

числяет ее числовые дескрипторы, далее с помощью функции схожести оценивает сходство дескрипторов с элементами имеющихся классов и выбирает наиболее похожий класс, либо создает новый. Характерный экземпляр каждого класса алгоритм выбирает похожим образом, но среди элементов класса, либо его может указать администратор базы данных.

**Пример использования базы данных.** *Визуальный индекс изображений.* В процессе работы на сканирующем электронном микроскопе один из авторов собрал большую коллекцию фотографий диатомовых микроводорослей, которые необходимо упорядочить. «Один из эффективных приемов [упорядочивания] большого числа объектов заключается в делении объектов на группы и последующей замене группы на единственный объект ..., позволяющим выбрать все объекты этой группы» [10, с. 39]. Типовые образцы контуров створок помогают частично решить данную задачу.

Для этого был написан скрипт, который перебирает фотографии из указанного источника (таблицы БД или каталога файловой системы), по одной показывает пользователю и предлагает соотнести изображение створки с одним из шаблонов. Выбор шаблона генерирует json-файл, с записью о том, что изображенная створка попадает в указанный класс форм. В конечном итоге каждое изображение пользователь относит к определенному классу и эти сведения сохраняются в json-файлах.

*Визуальный определитель диатомовых.* Изображения створок привязаны к конкретным видам диатомовых. Поэтому выбор образа формы и последующий отбор створок с подобной формой приводит к отбору видов, представители которых имеют указанную форму. Описанный процесс есть не что иное, как типичный шаг работы таксономического определителя [3], в котором форма створки выполняет роль морфологического признака, варианты которого прописаны в базе данных. Таким образом, таблица с очертаниями створок в данном контексте выступает в качестве элемента базы данных интерактивного определителя

<sup>2</sup> Такие же трудности возникают у систематиков при выделении типовых экземпляров видов организмов: голотипов, лектотипов, паратипов, только при этом исследователи учитывают не одну форму, а совокупность признаков.

теля. Естественно, что подобный определитель должен учитывать многие другие признаки диатомовых.

**Выводы.** Впервые разработана база данных для хранения очертаний створок диатомовых микроводорослей. Структура базы не привязана только к формам створок, а может хранить контуры любых биологических объектов.

Контур – это замкнутая плоская кривая, которая построена из кубических кривых Безье гладко сопряженных друг с другом. Кривая описана на языке масштабируемой векторной графики (svg) в виде последовательности координат управляющих вершин кривых Безье. Такой формат позволяет работать с контуром в любом редакторе векторной графики, визуализировать контур на веб-страницах и беспрепятственно обмениваться контурами с другими системами.

Контурные передают идеализированные симметричные очертания створок диатомовых, построенные по фотографиям реальных микроводорослей. Такое представление позволяет исключить индивидуальную псевдосимметрию форм организмов и сосредоточиться на характерной форме представителей морфогруппы.

Помимо контурной кривой, база данных хранит числовое описание контура в виде вектора инвариантных дескрипторов. В качестве последних использованы коэффициенты эллиптического преобразования Фурье. Такое представление дает возможность выполнять анализ и классификацию форм при помощи разнообразных математических методов.

Разработанный интерфейс позволяет извлечь из базы данных описание конкретной формы створки, перечень всех форм, сведения об источниках фотографий, использованных для построения контуров, и о видовых названиях диатомовых с указанной формой створок.

База очертаний створок диатомовых открыта и общедоступна по адресу: [3d-microalgae.org/diatoms/valve-shapes](http://3d-microalgae.org/diatoms/valve-shapes)

*Работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ № 121030100028-0 «Закономерности формирования и антропогенная транс-*

*формация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tray E., Leadbetter A., Meaney W., Conway A., Kelly C., Maoileidigh N. O., de Eyto E., Moran S., Brophy D. An open-source database system model and collections management system for fish scale and otolith archives // *Ecological Informatics*. 2020. Vol. 59. 101115.
2. Ledford H. Massive database of 182,000 leaves is helping predict plants' family trees // *Nature*. 2017. Vol. 547. P. 147.
3. Лелеков С.Г., Лях А.М. Метод выбора последовательности признаков в таксономических экспертных системах // *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017: сб. статей по материалам науч.-практ. конф. с междунар. участием. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 759–763.*
4. Брянцева Ю.В., Лях А.М., Сергеева А.В. Расчет объемов и площадей поверхности одноклеточных водорослей Черного моря. Севастополь: НАН Украины. Институт биологии южных морей. 2005. 25 с.
5. Лях А.М. Компьютерная программа 3D-Microalgae для вычисления объема и площади поверхности оболочки микроводорослей // *Современная фитоморфология*. 2012. Т. 1. С. 89–91.
6. Sacca A. Methods for the estimation of the biovolume of microorganisms: a critical review // *Limnology and Oceanography: Methods*. 2017. Vol. 15. P. 337–348.
7. Бухтиярова Л.Н. Bacillariophyta в мониторинге речных экосистем. Современное состояние и перспективы использования // *Альгология*. 1999. Т. 9, № 3. С. 89–103.
8. Wu N., Dong X., Liu Y., Wang C., Batstrup-Pedersen A., Riis T. Using river microalgae as indicators for freshwater biomonitoring: review of published research and future directions // *Ecological Indicators*. 2017. Vol. 81. P. 124–131.
9. Falasco E., Ector L., Wetzel C.E., Badino G., Bona F. Looking back, looking forward: a review of the new literature on

diatom teratological forms (2010–2020) // *Hydrobiologia*. 2021. Vol. 848, № 8. P. 1675–1753.

10. *Лях А.М.* База данных библиотеки цифровых изображений живых организмов // Электронные информационные системы. 2021. № 3 (30). С. 33–42.

11. *Гилярова К.А.* Языковая концептуализация формы физических объектов: автореф. дис. ... канд. филол. наук. М.: МГУ, 2002. 26 с.

12. *Гололобова М.А., Гогорев Р.М., Лях А.М., Дорофеюк Н.И.* Основные формы створок диатомовых водорослей: терминология. I. Формы створок, симметричные относительно апикальной оси, и формы с радиальной симметрией // *Новости систематики низших растений*. 2022. Т. 56, № 1. С. 29–54.

13. *Flusser J., Suk T., Zitova B.* Moments and moment invariants in pattern recognition. Wiley, 2009. 296 p.

14. *Waldchen J., Mader P.* Plant species identification using computer vision techniques: a systematic literature review // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2017. Vol. 25. P. 507–543.

15. *Haines J., Crampton J.S.* Improvements to the method of Fourier shape anal-

ysis as applied in morphometric studies // *Palaeontology*. 2000. Vol. 43. № 4. P. 765–783.

16. *Лях А.М.* Анализ биологических форм на основе согласованных коэффициентов эллиптического преобразования Фурье // *Наука Юга России*. 2019. Т. 15, № 4. С. 63–70.

17. *Нижегородцев А.А.* Псевдосимметрия растительных объектов как биоиндикационный показатель: теоретическое обоснование, автоматизация оценки, апробация: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2010. 24 с.

18. *Гелашвили Д.Б., Чупрунов Е.В., Марычев М.О., Сомов Н.В., Широков А.И., Нижегородцев А.А.* Приложение теории групп к описанию псевдосимметрии биологических объектов // *Журнал общей биологии*. 2010. Т. 71, № 6. С. 497–513.

19. *Лях А.М.* Архив опубликованных фотографий диатомовых микроводорослей // *Вопросы современной альгологии*. 2022. № 1 (28). С. 86–93.

20. *Шеманарев М.* Адаптивное разбиение кривых Безье. – URL: <https://rsdn.org/article/multimedia/bezier.xml> (дата обращения: 01.09.2022).

## THE DATABASE OF THE DIATOM VALVE OUTLINES

**A.M. Lyakh<sup>1</sup>, S.G. Lelekov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, RF, Sevastopol, Nakhimov Av., 2

<sup>2</sup>Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

Diatoms are widespread microscopic aquatic autotrophs covered by a siliceous frustule. The diatom valves are large conspicuous elements of frustule. The valve outlines are used for solving different tasks, such as species identification, construction of frustule geometric models, assessment of the status of water bodies, and as templates for microalgae images systematization. To solve these tasks, the samples of characteristic valve shapes are needed. In the paper we present the structure of the database for keeping diatom valve outlines and give the scenarios for interaction with the database. The database is available at: [3d-microalgae.org/diatoms/valve-shapes](http://3d-microalgae.org/diatoms/valve-shapes)

**Ключевые слова:** shape analysis, morphological variability, teratological shapes, silhouettes database, classification, visual index, diatoms.

## REFERENCES

1. *Tray E., Leadbetter A., Meaney W., Conway A., Kelly C., Maoileidigh N.O., de Eyto E., Moran S., and Brophy D.* An open-source database model and collections management system for fish scale and otolith archives. *Ecological Informatics*, 2020, Vol. 59, 101115.

2. *Ledford H.* Massive database of 182,000 leaves is helping predict plants' family trees. *Nature*, 2017, Vol. 547, pp. 147.
3. *Lelekov S.G. and Lyakh A.M.* Metod vybora posledovatelnosti priznakov v taksonomicheskikh ekspertnykh sistemakh (The method for selecting a sequence of characters in taxonomic expert systems). *Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost – 2017*. Collection of articles based on the materials of the scientific-practical conference with international participation. Sevastopol: SevGU, 2017, pp. 759–763.
4. *Bryantseva Yu.V., Lyakh A.M., and Sergeeva A.V.* Raschet obyemov i ploschadey poverkhnosti odnokletochnykh vodorosley Chernogo morya (Calculation of biovolumes and surface areas of Black Sea microalgae). Sevastopol: NAS of Ukraine. Institute of Biology of the Southern Seas, 2005, 25 p.
5. *Lyakh A.M.* Kompyuternaya programma 3D-Microalgae dlya vychisleniya obyema i ploschadi poverkhnosti obolochki mikrovdorosley (3D-Microalgae software used for the estimation of microalgae biovolumes and surface areas). *Sovremennaya Fitomorfologiya*, 2012, Vol. 1, pp. 89–91.
6. *Sacca A.* Methods for the estimation of the biovolume of microorganisms: a critical review. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2017, Vol. 15, pp. 337–348.
7. *Bukhtiyarova L.N.* Bacillariophyta v monitoringe rechnykh ekosistem. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy ispolzovaniya (Bacillariophyta in biomonitoring of river ecosystems. Modern situation and perspectives of application). *Algologiya*, 1999, Vol. 9, No. 3, pp. 89–103.
8. *Wu N., Dong X., Liu Y., Wang C., Battrup-Pedersen A., and Riis T.* Using river microalgae as indicators for freshwater biomonitoring: review of published research and future directions. *Ecological Indicators*, 2017, Vol. 81, pp. 124–131.
9. *Falasco E., Ector L., Wetzel C.E., Badino G., and Bona F.* Looking back, looking forward: a review of the new literature on diatom teratological forms (2010–2020). *Hydrobiologia*, 2021, Vol. 848, No. 8, pp. 1675–1753.
10. *Lyakh A.M.* Baza dannykh biblioteki tsifrovyykh izobrazheny zhivykh organizmov (Living organisms digital image library database). *Electronic Information Systems*, 2021, No. 3 (30), pp. 33–42.
11. *Gilyarova K.A.* Yazykovaya kontseptualizatsiya formy fizicheskikh obyektov: Avtoref. diss. kand. filol. nauk (Linguistic conceptualization of the form of physical objects. Cand. philol. sci. thesis abstract). Moscow: MGU, 2002, 26 p.
12. *Gololobova M.A., Gogorev R.M., Lyakh A.M., and Dorofeyuk N.I.* Osnovnye formy stvorok diatomovykh vodorosley: terminologiya. I. Formy stvorok, simmetrichnye otноситelno apikalnoy osi, i formy s radialnoy simmetriey (The main valve shapes of diatoms: terminology. I. Valve shapes symmetrical to the apical axis and valve shapes with radial symmetry). *Novosti sistematiki nizshikh rasteny*, 2022, Vol. 56, No. 1, pp. 29–54.
13. *Flusser J., Suk T., and Zitova B.* Moments and moment invariants in pattern recognition. Willey, 2009, 296 p.
14. *Waldchen J. and Mader P.* Plant species identification using computer vision techniques: a systematic literature review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017, Vol. 25, pp. 507–543.
15. *Haines J. and Crampton J.S.* Improvements to the method of Fourier shape analysis as applied in morphometric studies. *Palaeontology*, 2000, Vol. 43, No. 4, pp. 765–783.
16. *Lyakh A.M.* Analiz biologicheskikh form na osnove soglasovannykh koeffitsientov ellipticheskogo preobrazovaniya Furye (Analysis of biological shapes on the basis of coordinated coefficients of elliptic Fourier transformation). *Nauka Yuga Rossii*, 2019, Vol. 15, No. 4, pp. 63–70.
17. *Nizhegorodtsev A.A.* Pseudosimetriya rastitelnykh obyektov kak bioindikatsionny pokazatel: teoreticheskoe obosnovanie, avtomatizatsiya otsenok, aprobatsiya: Avtoref. diss. kand. biol. nauk (Pseudosymmetry of plant objects as a bioindicator: theoretical justification, automation of estimations, validation. Cand. biol. sci. thesis abstract). Nizhny Novgorod, 2010, 24 p.
18. *Gelashvili D.B., Chupruno E.V., Marychev M.O., Somov N.V., Shirokov A.I., and Nizhegorodtsev A.A.* Prilozhenie teorii grupp k opisaniyu pseudosimetrii biologicheskikh obyektov (Application of the group theory to description of biological objects pseudosymmetry). *Zhurnal Obshey Biologiyi*, 2010, Vol. 71, No. 6, pp. 497–513.
19. *Lyakh A.M.* Arkhiv opublikovannykh fotografy diatomovykh mikrovdorosley (An archive of the published photographs of diatoms). *Voprosy sovremennoy algologii*, 2022, No. 1 (28), pp. 86–93.
20. <https://rsdn.org/article/multimedia/bezier.xml> (September 1<sup>st</sup>, 2022).