



УДК 582.261.1:57.087

А. М. Лях, вед. инж., Ю. Н. Токарев, докт. биол. наук, зав. отд.

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной академии наук Украины,  
Севастополь, Украина

## ОЦЕНКА ОБЪЕМОВ И ПЛОЩАДЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Рассмотрен новый метод точной оценки объемов и площадей поверхности диатомовых водорослей. Используются два типа трехмерных моделей – цилиндрические и каркасные, которые наиболее точно имитируют форму микроводорослей с прямыми и изогнутыми вдоль вертикальной оси панцирями. Объемы и площади моделей рассчитываются автоматически по простым формулам, при помощи разработанной компьютерной программы. Программа позволяет строить трехмерные модели диатомовых на основе очертаний их створок и форм вертикальных осей панцирей. С помощью программы построено несколько тысяч трехмерных моделей микроводорослей рода *Gomphonema* Ehr., и проанализированы различия между параметрами трехмерных моделей и подобных геометрических фигур. Предлагается считать трехмерные модели эталонами, наиболее точно имитирующими форму микроводорослей. Впервые предложено оценивать точность метода истинных объемов по разнице между параметрами подобных геометрических фигур и трехмерных моделей.

**Ключевые слова:** диатомовые микроводоросли, объем и площадь поверхности клетки, трехмерная модель клетки, цилиндрическая и каркасная модели

Диатомовые водоросли – наиболее распространенная и многочисленная группа фитопланктона Мирового океана. Многие диатомовые используются в качестве индикаторов состояния окружающей среды, для чего необходимо располагать данными об их таксономическом составе, численности, биомассе, площади поверхности и морфологических изменениях.

В связи с микроскопическими размерами диатомовых, определение точных значений их объемов и площадей поверхности представляет определенную трудность. Широко распространенный и применяемый для этих целей метод *истинных объемов* [4] во многих случаях не решает поставленной задачи. При использовании метода для имитации формы

микроводорослей и последующих расчетов их морфометрических характеристик применяются простые геометрические тела и их комбинации. Для клеток диатомовых со сложным строением, таких как *Achnanthes longipes* Ag., *Gomphonema acummatum* Ehr., *Rhoicosphenia abbreviata* (Ag.) Lange-Bert. и др., подобный подход дает значительную ошибку, вызванную отличием используемых геометрических фигур от реальной формы микроводорослей.

Для некоторых геометрических примитивов, как *конус эллиптический*, *эллипсоид*, *комбинации эллиптических цилиндров* и т.д., вообще отсутствуют явные расчетные формулы, поэтому их параметры вычисляются приближенно [1, 9, 13]. Часто расчетные формулы бывают очень громоздкими и содержат ошибки.

Таким образом, при использовании геометрических примитивов значения объемов и площадей многих диатомовых могут быть сильно завышенными или же заниженными. Кроме того, не существует четкого критерия оценки точности метода истинных объемов. Оценка производится визуально и не имеет числового эквивалента. Ученый не может узнать, насколько хорошо та или иная подобная геометрическая фигура соответствует форме исследуемой микроводоросли, и не может выбрать лучшую из них.

Цель настоящей работы – описать новый, наиболее точный метод определения объемов и поверхностей диатомовых микроводорослей, основанный на применении трехмерных геометрических моделей клеток, апробировать метод на диатомовых рода *Gomphonema* Ehrh. и выработать критерии оценки точности метода истинных объемов.

**Материал и методы.** Для моделирования большого разнообразия форм панциря диатомовых использовались трехмерные геометрические модели.

$$P_{CTB} = \sum_{i=1}^N |P_i P_{i+1}|,$$

$$A_{CTB} = \frac{1}{2} \left| (x_N + x_1)(y_N - y_1) + \sum_{i=1}^{N-1} (x_i + x_{i+1})(y_i - y_{i+1}) \right|.$$

У многих видов диатомовых панцирь искривлен или закручен вдоль одной или нескольких осей. Для имитации формы таких клеток применялись каркасные геометрические модели.

При сечении панциря диатомовой клетки плоскостями, перпендикулярными ее вертикальной оси, образуются фигуры, по форме подобные или точно соответствующие форме створок микроводоросли (рис. 1,а). Соединив образовавшиеся фигуры трехмерной поверхностью, можно построить геометрическую модель панциря клетки, наиболее точно

Геометрическое моделирование диатомовых. Для имитации формы панцирей микроводорослей, которые имели прямые оси симметрии, применялись *цилиндрические модели*. Это цилиндры, основания которых совпадали по форме со створками диатомовых, а боковая поверхность – с их поясками. Объем  $V$  и площадь поверхности  $A$  цилиндрической модели вычислялись по следующим формулам:

$$A_{БОК} = P_{CTB} \cdot h,$$

$$A = A_{БОК} + 2 \cdot A_{CTB},$$

$$V = A_{CTB} \cdot h,$$

где  $h$  – высота клетки;  $A_{БОК}$  – площадь боковой поверхности микроводоросли;  $P_{CTB}$  и  $A_{CTB}$  – периметр и площадь поверхности створки диатомовой, которая аппроксимировалась плоским многоугольником, состоящим из  $N$  вершин  $M = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ . Многоугольник строился по цифровому изображению клетки, после чего его периметр и площадь вычислялись по формулам:

(2)

описывающую ее форму. Так как все сечения панциря подобны друг другу, то для того, чтобы восстановить форму каждого сечения, достаточно построить одно из них, и, далее, соответствующим образом сместив, модифицировав и ориентируя его в пространстве, восстановить остальные. Для этого исходная векторная модель створки микроводоросли последовательно смещалась вдоль вертикальной оси клетки так, что на каждом шаге плоскость створки была перпендикулярна оси микроводоросли, а геометрический центр створки лежал на этой оси (рис. 1,б).

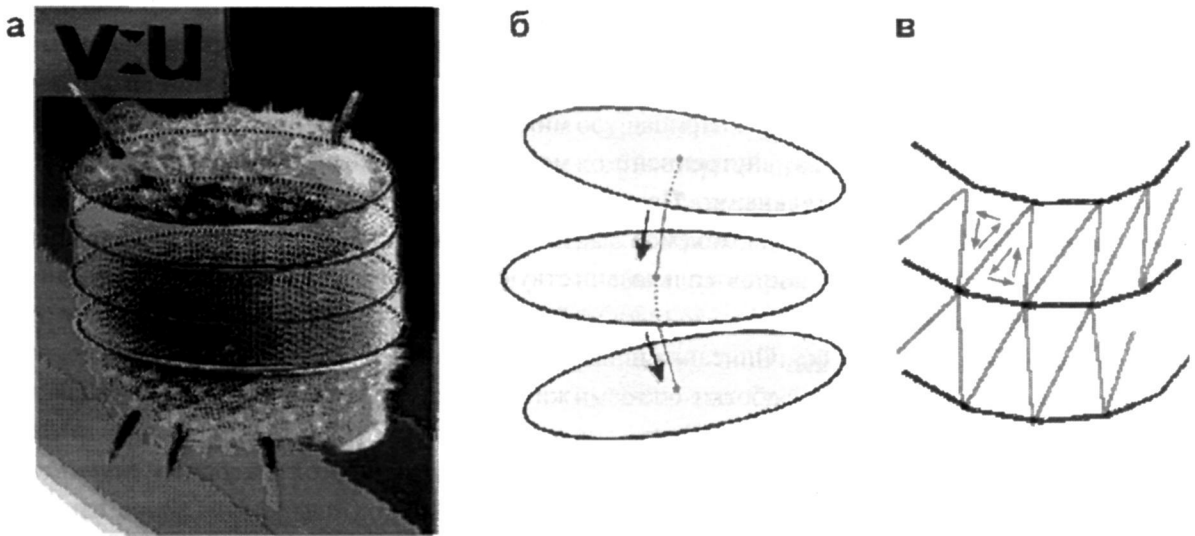


Рис. 1 Построение каркасной модели диатомовой водоросли: а) в сечении панциря микроводоросли образуются фигуры, подобные форме створки (фотография клетки с сайта visualunlimited.com); б) смещением векторного контура вдоль направляющей строится каркас будущей модели; в) каркас обтягивается трехмерной поверхностью, состоящей из ориентированных треугольных граней (направление ориентации граней показано стрелками)

Fig. 1 Creating of a loft diatom model: a) each transect of a diatom theca similar to valve outline; b) the skeleton of a loft model is created by translating the polygons along the axis; c) the skeleton is cover by 3D-surface consisting of oriented triangular faces (arrows show the orientations of faces)

В результате строился каркас будущей геометрической модели, который покрывался трехмерной поверхностью, образуя *каркасную геометрическую модель*. Покрытие каркаса трехмерной поверхностью осуществлялось путем последовательного соединения соседних вершин треугольными гранями. Каждая вершина одного сечения объединялась с соседними вершинами второго сечения двумя треугольниками (рис. 1,в), образуя фрагмент трехмерной поверхности. Данная процедура повторялась для всех вершин каждого сечения.

Каркасные модели относятся к классу *сетчатых трехмерных моделей (mesh 3D-models)*, состоящих из большого числа плоских треугольных ориентированных граней. Для каждой грани задавался порядок обхода ее вершин, по которому можно было определить ее внешнюю и внутреннюю стороны. Объем  $V$  и площадь поверхности  $A$  сетчатой модели вычислялись следующим образом:

$$\begin{aligned} A &= \sum_i A_i, \\ V &= \sum_i V_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $A_i$  – площадь  $i$ -ой грани;  $V_i$  – объем треугольной пирамиды, основанием которой служила  $i$  грань, и вершина которой находилась в точке начала координат. Объем треугольной пирамиды вычислялся как одна шестая смешанного произведения образующих ее векторов:

$$V_i = \frac{1}{6} (\overline{P_{i_k}}, \overline{P_{i_{k+1}}}, \overline{P_{i_{k+2}}}), \quad (4)$$

где координаты каждого вектора  $\overline{P_{i_k}} = (x_{i_k}, y_{i_k}, z_{i_k})$  совпадали с координатами образующих грань вершин. Смешанное произведение – это скалярная величина, обладающая знаком, который зависит от порядка следова-

ния векторов, т. е. от ориентации грани. Когда грань из начала координат видна наружной стороной, смешанной произведение, а, следовательно, и объем пирамиды, будут отрицательными, а когда грань видна внутренней стороной – они будут положительными. При суммировании всех элементарных объемов лишние части отсекаются, и останется только объем трехмерного тела.

Программное обеспечение. Описанный метод послужил основой для разработки специального программного обеспечения. Моделирование панциря диатомовых с помощью компьютерной программы состоит из четырех шагов: *оцифровка и измерение клетки, выбор геометрической модели, подгонка размеров модели под размеры створки, вычисление параметров модели и дальнейшее моделирование.*

Построение геометрических моделей микроводорослей, а также расчет их параметров осуществляются на основе линейных размеров клеток, поэтому на первом шаге необходимо измерить реальную микроводоросль и, при возможности, получить ее цифровую фотографию.

На втором шаге осуществляется выбор створки, соответствующей изучаемому виду микроводоросли. При всем разнообразии диатомовых, количество различных типов створок, по подсчетам [11], равно 84. Оцифровав все возможные контуры створок и поместив их в базу данных (БД), можно существенно сократить время создания геометрических моделей диатомовых. Подобная база уже создается, и содержит около 30 оцифрованных контура створок. Для выбора из базы подходящей створки используются два подхода. В первом случае выбор производится по *таксономическому названию* микроводоросли, во втором осуществляется путем *визуального сопоставления* изображения микроводоросли с изображениями, хранящимися в БД. Второй подход менее трудоемок, так как процедура таксономической идентификации вида длительная, требует знаний эксперта-таксономиста. В даль-

нейшем возможна реализация третьего *автоматизированного подхода*, основанного на алгоритмах цифровой обработки изображений микроводоросли и последующих расчетах морфометрических параметров контура [6]. Кроме створки, для каркасной модели необходимо указать направляющую кривую, соответствующую форме вертикальной оси панциря. Разработанная программа позволит строить произвольные направляющие, а также содержит процедуру для генерации направляющей, совпадающую с вертикальной осью *клиновидных панцирей* клеток из родов *Eunotia* Ehr., *Licmophora* Ag., *Gomphonema* Ehr. и т.п.

На третьем шаге работы с программой размеры створки и направляющей подгоняются под размеры микроводоросли. Подгонка может выполняться *автоматически*, путем изменения размеров исходной фигуры так, чтобы они соответствовали заданным числовым значениям, или вручную, посредством масштабирования контура створки при помощи курсора «мыши», чтобы он совпал с контуром изображения. На этом же этапе строится геометрическая модель клетки.

На заключительном этапе рассчитываются объем и площадь поверхности геометрической модели по формулам (3). Построенная модель может использоваться для последующего моделирования других видов микроводорослей, имеющих схожее морфологическое строение. В этом случае к модели применяется один из методов пространственных деформаций [5]. Например, для моделирования панциря микроводорослей рода *Achnanthes* Bory de St.-Vincent, изогнутого вдоль продольной оси [2], строится цилиндрическая модель клетки с прямым панцирем, которая при помощи деформации свободной формы [5, 10] преобразуется в модель с изогнутым панцирем.

Данные о форме и размерах. В качестве иллюстративного материала для моделирования формы створок и панцирей диатомовых использовались фотографии с веб-сайтов

keisou.hp.infoseek.co.jp, diatom.acnatsci.org и craticula.ncl.ac.uk, а также фотографии и рисунки, опубликованные в [2, 12].

Для апробации предложенного метода были созданы каркасные модели девяти видов диатомовых из рода *Gomphonema*: *G. acuminatum* Ehr., *G. angustatum* (Kutz) Rabh., *G. augur* (Ehr.) Lamge-Bert., *G. clavatum* Ehr., *G. globiferum* Meister, *G. gracile* Ehr., *G. parvulum* (Kutz) Kutz, *G. quadripunctatum* (Ost.) Wisl., *G. truncatum* Ehr. Для каждого вида было построено 1056 каркасных модели, размеры которых изменялись с шагом 1 мкм в пределах 5 – 15 мкм по ширине, 30 – 45 мкм по длине и 5 – 10 мкм по высоте. Створки некоторых видов, например *G. truncatum*, могут принимать различную форму (рис. 2). В подобных случаях для одного вида строилось несколько типов каркасных моделей, различающихся формами створок.

Объемы и площади поверхности моделей рассчитывались по выражениям (3). Полученные значения сравнивались с характеристиками подобных геометрических тел, рекомендованных для данных микроводорослей в качестве подобных фигур [8, 9, 13]. Построение

цилиндрических и каркасных моделей, расчет их объемов и площадей поверхности, а также параметров подобных геометрических тел осуществлялись при помощи разработанной компьютерной программы.

**Результаты и обсуждение.** Диатомовые микроводоросли покрыты прочным кремниевым панцирем, который состоит из двух половинок плотно надвинутых одна на другую. Панцирь типичной диатомовой водоросли имеет три плоскости и оси симметрии. Многие диатомовые симметричны только относительно одной или двух плоскостей, или вообще ассиметричны. Панцирь микроводорослей может быть изогнут или закручен вдоль одной или нескольких осей [3, 12]. Панцирь микроводорослей рода *Gomphonema* моносимметричен и похож на клин. Головной конец панциря более широкий, базальный – более узкий [2, 3, 12]. По фотографиям, путем измерения клеток, изображенных со стороны пояска, определено отношение между высотой головного и базального концов микроводорослей – 2 – 2.5.

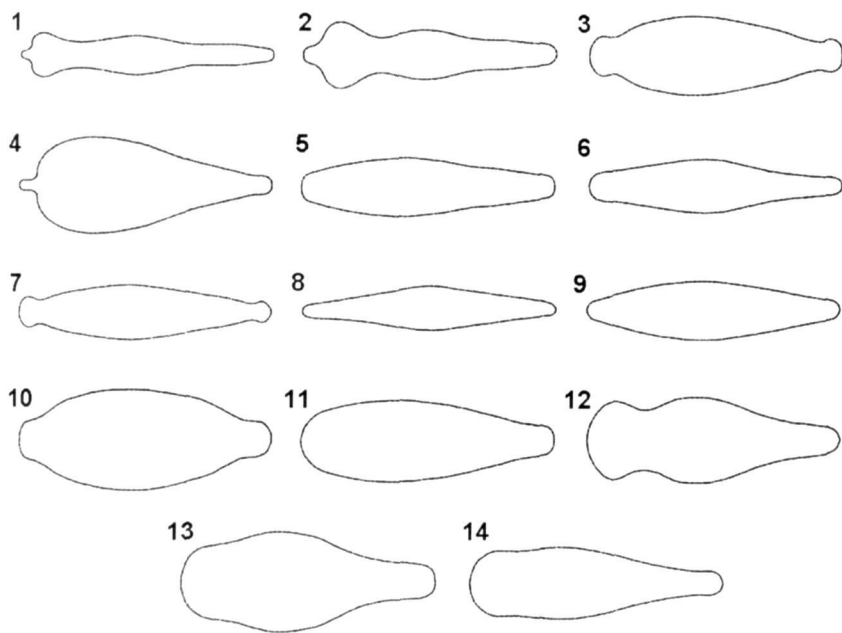


Рис. 2 Оцифрованные контуры створок диатомовых рода *Gomphonema*, используемые для построения каркасных моделей: 1, 2 – *G. acuminatum*; 3 – *G. angustatum*; 4 – *G. augur*; 5, 6 – *G. clavatum*; 7 – *G. globiferum*; 8 – *G. gracile*; 9, 10 – *G. parvulum*; 11 – *G. quadripunctatum*; 12, 13, 14 – *G. truncatum*

Fig. 2 Digitized outlines of diatom valves (genus *Gomphonema*) used for creating loft models: 1, 2 – *G. acuminatum*; 3 – *G. angustatum*; 4 – *G. augur*; 5, 6 – *G. clavatum*; 7 – *G. globiferum*; 8 – *G. gracile*; 9, 10 – *G. parvulum*; 11 – *G. quadripunctatum*; 12, 13, 14 – *G. truncatum*

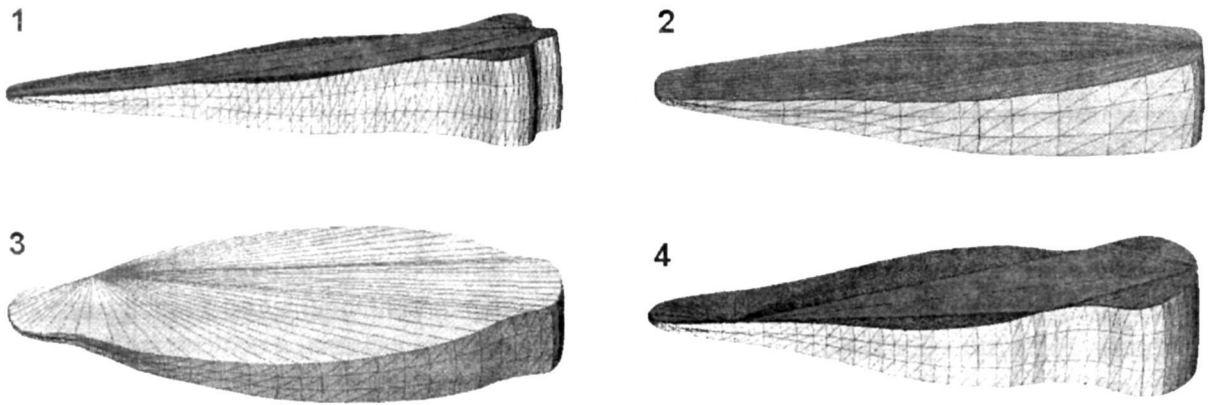


Рис. 3 Трехмерные модели диатомовых: 1 – *Gomphonema acuminatum*; 2 – *G. clavatum*; 3 – *G. parvulum*; 4 – *G. truncatum*

Fig. 3 Three-dimensional diatoms models: 1 – *Gomphonema acuminatum*; 2 – *G. clavatum*; 3 – *G. parvulum*; 4 – *G. truncatum*

Виды рода *Gomphonema* отличаются разнообразными по форме створками, которые трудно описать геометрическими фигурами. Многие виды микроводорослей отличаются друг от друга не столько формой панциря, сколько его текстурой. Поэтому используемые створки (рис. 2) описывают форму большинства видов микроводорослей рода *Gomphonema*.

Объемы и поверхности построенных каркасных моделей (рис. 3) сравнивались с параметрами подобных геометрических фигур. В методе истинных объемов для данного рода микроводорослей в качестве подобных фигур рекомендуют использовать *клин*, *пирамиду* и *усеченную пирамиду с квадратными основаниями* [8, 9].

Первые две фигуры имеют заостренный конец, который соответствует базальному концу микроводоросли. Для усеченной пирамиды требовалось определить ширину базального конца клетки. Для этого измерялась ширина панцирей и базальных концов микроводорослей определенного вида, и определялось соотношение между ними, которое использовалось при последующих расчетах.

Для клеток рода *Gomphonema* предложено [9] использовать геометрическое тело, называемое *гомфонемоид* (*gomphonemoid*). В

своей работе авторы привели формулу расчета объема гомфонемоида, зависящую от четырех параметров.

Приближенные формулы для расчета объема и площади поверхности гомфонемоида, использующие три параметра [13]:

$$V \approx \frac{l \cdot w}{4} \cdot \left[ l + \left( \frac{\pi}{4} - 1 \right) \cdot w \right] \cdot \arcsin \left( \frac{h}{2l} \right), \quad (6)$$

$$A \approx \frac{w}{2} \cdot \left( 2l + \pi \cdot l \cdot \arcsin \left( \frac{h}{2l} \right) + \left( \frac{\pi}{2} - 2 \right) \cdot w \right),$$

где  $l$  – длина,  $w$  – ширина,  $h$  – высота панциря клетки.

При сравнении объемов и площадей поверхности гомфонемоидов, полученных по формулам (6), с характеристиками каркасных моделей было обнаружено, что объем гомфонемоида в среднем в 2.5 раза, а площадь поверхности в среднем в 1.7 раза отличаются от аналогичных значений каркасных моделей.

Для проверки были построены трехмерные модели гомфонемоидов, и по формулам (3) вычислены их объемы и площади поверхности.

Табл. 1 Абсолютные процентные отклонения объемов и площадей поверхностей подобных геометрических фигур от объемов и площадей поверхностей каркасных моделей диатомовых рода *Gomphonema*. Латинскими цифрами обозначены: I – пирамида с прямоугольником в основании, II – клин, III – усеченная пирамида с прямоугольником в основании, IV – трехмерный гомфонемоид. Жирным шрифтом выделены минимальные для данного вида отклонения

Table 1 Absolute percent differences between volumes and surface areas of similar geometric models and volumes and surface areas of 3D loft models of diatoms from genus *Gomphonema*. Latin digits mean: I – pyramid with rectangular base, II – wedge, III – truncate pyramid with rectangular base, IV – 3D gomphonemoid. For each species minimal differences are marked in bold face.

Вид	Отклонения объемов, %				Отклонения площадей поверхности, %			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
<i>G. acuminatum</i>	23.5	14.8	13.0	<b>6.0</b>	54.8	21.9	<b>7.0</b>	<b>8.1</b>
<i>G. acuminatum</i>	17.2	24.1	22.8	<b>2.0</b>	62.4	28.8	13.3	<b>2.9</b>
<i>G. angustatum</i>	32.2	<b>2.7</b>	7.6	16.7	46.5	16.1	<b>6.9</b>	12.4
<i>G. augur</i>	28.0	7.9	<b>3.5</b>	11.6	53.4	21.6	<b>2.2</b>	8.3
<i>G. clavatum</i>	33.9	<b>3.3</b>	<b>2.7</b>	18.8	45.0	14.9	<b>3.9</b>	13.3
<i>G. clavatum</i>	28.6	<b>7.1</b>	<b>7.8</b>	12.3	51.2	20.4	<b>7.3</b>	9.1
<i>G. globiferum</i>	29.8	<b>5.2</b>	9.9	13.8	48.5	17.7	<b>7.4</b>	11.2
<i>G. gracile</i>	21.5	17.8	14.0	<b>3.5</b>	58.5	25.7	9.1	<b>5.3</b>
<i>G. parvulum</i>	31.1	<b>3.2</b>	<b>4.1</b>	15.5	48.6	17.8	<b>5.0</b>	11.2
<i>G. parvulum</i>	32.9	<b>2.9</b>	<b>3.5</b>	17.6	46.4	16.0	<b>4.8</b>	12.5
<i>G. quadripunctatum</i>	36.6	<b>4.8</b>	<b>3.6</b>	22.0	42.5	13.0	<b>2.0</b>	14.8
<i>G. truncatum</i>	32.5	<b>2.8</b>	<b>2.9</b>	17.1	46.8	16.4	<b>2.9</b>	12.2
<i>G. truncatum</i>	30.5	<b>4.3</b>	<b>4.6</b>	14.6	50.1	19.6	<b>6.2</b>	9.8
<i>G. truncatum</i>	34.4	<b>3.4</b>	<b>3.3</b>	19.4	46.0	15.7	<b>3.0</b>	12.7

Оказалось, что формулы (6) сильно занижают характеристики геометрических фигур, поэтому для последующих расчетов использовались трехмерные гомфонемоиды генерируемые программой.

При сравнении объемов и площадей различных моделей, значения объемов и площадей каркасных моделей считались эталонными. Для остальных геометрических тел вычислялись абсолютные отклонения от эталонных значений выраженные в процентах. Результаты сравнения представлены в табл. 1.

Из анализа табл. 1 следует, что ни одно из подобных геометрических тел не дает минимальной погрешности для всех рассмотренных видов микроводорослей, поэтому ни одно из рассмотренных тел не может использоваться в качестве единственной подобной фигуры для всех диатомовых рода *Gomphonema*.

Пирамида с квадратным основанием не может применяться в качестве аппроксимирующей фигуры, так как ее объем отличается от эталона на 17 – 36%, а площадь поверхности – на 42 – 62%.

Объемы и площади поверхности клеток *G. augur*, *G. clavatum*, *G. parvulum*, *G. quadripunctatum* и *G. truncatum* хорошо аппроксимировались параметрами усеченной пирамиды с квадратным основанием (отклонение – 3 – 6 %). Гомфонемоид хорошо аппроксимировал форму панцирей только двух рассмотренных видов *G. acuminatum* и *G. gracile* (точность аппроксимации объема – 2 – 6 %, площади поверхности – 3 – 8 %), которые внешне на него не похожи.

Объем и поверхность построенных геометрических моделей сильно зависят от площади и периметра исходных створок. При сопоставлении контуров створок данных видов

микроводорослей с контуром гомфонемоида видно, что при незначительном взаимном перекрытии этих фигур площади и периметры их непересекающихся частей практически совпадают, чем и определяется высокая точность аппроксимации геометрических моделей.

Следует заметить, что программой строились трехмерные модели гомфонемонидов, так как формулы (6), предложенные в литературе, не позволили получить необходимые значения.

Приведенные в табл. 1 значения могут отличаться от действительных, так как построение каркасных моделей осуществлялось на основе небольшого числа фотографий диатомовых, на которых не отражены полностью все тонкости морфологической изменчивости створок в процессе жизненного цикла вида.

Кроме того, программой генерировались все створки из перечисленного выше размерного диапазона, и некоторые из них имели аномальную форму, когда пропорциональные соотношения между элементами створки были не соблюдены. Такие створки также учитывались в расчетах и вносили определенный вклад в результирующее отклонение.

Если при использовании метода истинных объемов незначительные изменения в морфологии панциря клеток могут привести к заметным отклонениям их формы от формы подобных фигур и соответствующим погрешностям в расчетах объемов и площадей поверхности, то при использовании предложенного метода возможна имитация всех морфологических особенностей строения панцирей микроводорослей, что существенно повышает качество результатов.

**Выводы.** 1. Метод трехмерного геометрического моделирования позволяет строить модели панцирей любого вида диатомовых, для чего необходимо знать форму створок микроводорослей и соотношение между осями симметрии панцирей клеток. 2. Алгоритм расчета объемов и площадей поверхности трехмерных моделей основан на простых математических формулах и реализован в виде программного модуля. Используя данный алгоритм, можно избежать существенных ошибок в формулах расчета параметров геометрических фигур. 3. Каркасные модели диатомовых точно имитируют форму их створок и панцирей, поэтому их можно считать наиболее точными моделями клеток, а объем и площадь поверхности моделей принимать за эталонные значения. 4. Метод трехмерного геометрического моделирования является альтернативой методу истинных объемов. По значению отклонений объемов и площадей поверхности подобных фигур от параметров трехмерных моделей можно оценить точность аппроксимации микроводорослей геометрическими телами. 5. Для некоторых видов диатомовых точный расчет их объемов и площадей поверхности возможен только при использовании трехмерных геометрических моделей. 6. Разработанное программное обеспечение и база данных с векторными контурами створок позволяют быстро строить модели диатомовых микроводорослей и рассчитывать их морфометрические параметры.

**Благодарности.** Авторы благодарят к. б. н. Е. Л. Неврову и Е. Ю. Георгиеву за предоставленный материал, консультации по морфологии диатомовых и важные замечания при подготовке статьи к печати.



1. *Брянцева Ю. В., Лях А. М., Сергеева А. В.* Расчет объемов и площадей поверхности одноклеточных водорослей Черного моря. – Севастополь, 2005. – 25 с. (Препр. / НАН Украины. Институт биологии южных морей).
2. *Гуляков Н. Е., Загороднец О. А., Герасимюк В. П.* Атлас диатомовых водорослей бентоса северо-западной части Черного моря и прилегающих водоемов // К.: Наук. думка, 1992. – 112 с.
3. *Диатомовый анализ* / Под ред. А.Н. Криштофовича. – М.: Госгеолиздат, 1949. – Кн.1: Общая и палеоботаническая характеристика диатомовых водорослей. – 240 с.
4. *Киселев И. А.* Методы исследования планктона // Жизнь пресных вод СССР. – М.–Л., 1956. – 4, №1. – 234 с.
5. *Лях А. М.* Деформации пространства и их применение для моделирования формы клеток фитопланктона // Уч. зап. Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Математика. Механика. Информатика и Кибернетика». – Симферополь: Таврический национальный университет, 2005. – 17(56), №1. – С. 47 – 58.
6. *Маньковская Е. В., Лях А. М.* Автоматизация процесса распознавания диатомовых микроводорослей по их цифровым изображениям // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь, МГИ. – 2005. – (в печати).
7. *Современные методы количественной оценки распределения морского планктона.* – М.: Наука, 1985. – 280 с.
8. *Biovolumes of algal taxa in samples collected by the USGS NAWQA program.* – <http://diatom.acnatsci.org/mawqa/>
9. *Hillebrand H., Durselen C.-D., Kirschtel D. et al.* Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae // *Journal of Phycology.* – 1999. – 35. – P. 403 – 424.
10. *Lyakh A. M.* The free form deformation of phytoplankton models // *Lecture notes in computer science.* – 2002. – 2331. – P. 194 – 201.
11. *Pappas J. L.* Geometry and topology of diatom shape and surface morphogenesis. Potential applications in nanotechnology. – Michigan, University of Michigan, 2004. – 34 p.
12. *Sims P. A.* An atlas of British diatoms. – Bristol: Biopress Ltd., 1996. – 602 p.
13. *Sun J., Liu D.* Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton // *J. of Plankton Research.* – 2003. – 25, №11. – P. 1331 – 1346.

Поступила 12 декабря 2005 г.

**Оцінка обсягів і площ поверхні діатомових водоростей за допомогою тривимірних моделей. А. М. Лях, Ю. М. Токарєв.** Розглянутий новий метод точної оцінки обсягів та площ поверхні діатомових водоростей. Використаються два типи тривимірних моделей – циліндричні та каркасні, які найбільш точно імітують форму микроводоростей із прямими та вигнутими уздовж вертикальної осі панцирами. Обсяги та площі моделей розраховуються автоматично за допомогою розробленої комп'ютерної програми. Програма дозволяє будувати тривимірні моделі діатомових на основі обрисів їхніх стулок і форм вертикальних осей панцирів. За допомогою програми побудовано кілька тисяч тривимірних моделей микроводоростей роду *Gomphonema* Ehr., і проаналізовані розходження між параметрами тривимірних моделей та подібних геометричних фігур. Пропонується вважати тривимірні моделі еталонами, що найбільш точно імітують форму микроводоростей. Уперше запропоновано оцінювати точність методу дійсних обсягів по різниці між параметрами подібних геометричних фігур і тривимірних моделей.

**Ключові слова:** діатомові микроводорості, обсяг і площа поверхні клітки, тривимірна модель клітки, циліндрична та каркасна модель

**Calculation of biovolumes and surface areas of diatoms microalgae using three-dimensional geometric models. A. M. Lyakh, Yu. N. Tokarev.** The new method for accurate calculation biovolumes and surface areas of diatoms, based on tree-dimensional geometric models, is considered. Two types of models – cylindrical and loft – are used. Each of them the most accurate approximate shapes of diatom microalgae. Volumes and surface areas of the models are automatic calculated by computer program. The program allows creating 3D-models of diatoms using outlines of their valves and shapes of their theca vertical axis. Some thousands 3D-models of diatoms from genus *Gomphonema* are created. Differences between volumes and areas of 3D-models and similar geometric primitives are analyzed. For the first time it is proposed to consider 3D-models as etalons that the most accurate approximate shapes of microalgae, and to estimate the precision of the traditional method of similar geometric models by differences mentioned above.

**Keywords:** diatoms, biovolume and surface area, three-dimensional cell model, cylindrical and loft models