

ЭКОЛОГИЯ МОРЯ



13
—
1983

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ В ЭКОЛОГИИ МОРСКОГО ФИТОПЛАНКТОНА (ОБЗОР)

Изучение морских природных экосистем в процессе их функционирования неразрывно связано с обработкой и систематизацией большого объема исходной информации. Теоретическое осмысление фактического материала, накопленного в результате эксперимента или наблюдения, предполагает широкое использование в гидробиологических исследованиях многомерных методов статистики [3]. Среди них значительный интерес представляет метод главных компонент (МГК), который является одним из молодых направлений в факторном анализе [12]. Своими истоками метод уходит к началу XX ст. Впервые он был разработан К. Пирсоном в 1901 г. [33]. Теоретические его основы подробно изложены в работах по многомерному статистическому анализу [6, 12, 15, 18]. Длительное время внедрение многомерных методов сдерживалось главным образом трудностью расчетов и интерпретации полученных результатов [22]. Основополагающим вкладом в реализацию этой проблемы явилось, во-первых, активное использование быстродействующих средств вычислительной техники и, во-вторых, осуществление тесного контакта экологов с математиками, при котором глубокое понимание экологических процессов и явлений дополняется знанием сущности применяемых математических методов.

Расширение теоретических основ многофакторных методов и растущие потребности их практического использования способствовали применению в системных исследованиях многокомпонентных моделей, отличающихся между собой типом использования математического аппарата [10]. За последнее десятилетие в гидробиологии заметно увеличилось число научных работ, связанных с применением различных статистических методик, включая МГК. В настоящее время отечественная и переводная литература по этому вопросу представлена довольно широко [5, 8, 13, 19, 23, 24, 26, 27, 30].

Экология морского фитопланктона — сравнительно новая сфера приложения данного метода. Первые попытки привлечь МГК к изучению взаимодействий фитопланктон — среда были предприняты в начале 60-х годов [22]. В последующие десятилетия использование этой техники заметно возросло. Ее стали значительно активнее применять для описания изменчивости численности и видового состава морского фитопланктона под влиянием различных факторов внешней среды [20—22, 25, 31, 32, 34, 38]. Однако, несмотря на положительную оценку метода, дающего возможность одновременно изучать множество различных признаков в системе и строить оптимистические прогнозы о применении МГК, число публикаций в этом направлении остается ограниченным. Представляется целесообразным проанализировать литературные источники, где на конкретных примерах проиллюстрирован опыт практического использования МГК для оценки состояния фитопланктонных сообществ в море.

Суть метода заключается в преобразовании множества исходных признаков в небольшое количество новых переменных — главных компонент, которые содержат значительную часть информации об исследуемой совокупности. Базируется метод на данных о состоянии многомерных систем, которые характеризуются при помощи большого набора тесно коррелируемых между собой признаков. Возникает проблема адекватного отражения

исходных данных в сжатой форме. МГК является таким математическим аппаратом, который позволяет заменить исходные взаимосвязанные признаки некоторой совокупностью некоррелируемых между собой параметров [1, 4].

Метод предусматривает расчеты средних значений для каждого из признаков корреляционной матрицы; уравнений множественной регрессии, построенных на направлении главных компонент; собственных чисел главных компонент, вкладов главных компонент в общую дисперсию; факторных нагрузок главных компонент. Модель МГК использует закон нормального многомерного распределения и строится на предположении о линейных зависимостях между переменными. Согласно работе [4], при большом числе исследуемых объектов (N) и их признаков (n) линейная модель МГК¹ принимает вид

$$y_j = \sum_{r=1}^n a_{jr} f_r, \quad (1)$$

где $r, j = 1, 2, \dots, n$; f_r — r — главная компонента; a_{jr} — масса r компоненты в j переменной; y_j — нормированное значение j -го признака, полученное из модели.

В матричной форме выражение (1) преобразуется:

$$y = AF. \quad (2)$$

Зависимость между главными компонентами и коэффициентами корреляции на основании (1) записывается

$$y_{ji} = a_{j1} f_{1i} + a_{j2} f_{2i} + \dots + a_{jn} f_{ni}, \quad i=1, 2, \dots, N.$$

где y_{ji} — нормированное значение, полученное из эксперимента, j -го признака для i -го уровня; f_{1i} — значение первой главной компоненты для i -го объекта.

Вариабельность является причиной разброса показаний признака от объекта к объекту относительно математического ожидания. Полная дисперсия статистического признака выражается через дисперсию главных компонент:

$$\sigma_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{ji}^2. \quad (3)$$

Так как дисперсии нормированных величин равны единице и главные компоненты ортогональны, то выражение принимает вид

$$\sigma_j = a_{j1}^2 + a_{j2}^2 + \dots + a_{jn}^2 = 1.$$

Дисперсия является характеристикой изменчивости случайных величин, ее отклонений от среднего значения. Полный вклад в дисперсию всех признаков определяет ту долю общей дисперсии, которую данная главная компонента объясняет. Этот вклад вычисляется по формуле

$$V_j = \sum_{r=1}^n a_{jr}^2, \quad (4)$$

где j — индекс признака; r — индекс главной компоненты.

МГК совмещает принципы корреляционного, дисперсионного и регрессивного анализов, что преимущественно выделяет его среди перечисленных методик. Корреляционная матрица является исходной для построения главных компонент. Коэффициенты корреляции указывают на тесную стохастическую связь между каждой парой признаков, но не раскрывают причинно-следственной зависимости между ними. Эту зависимость помогает раскрыть анализ соотношений массовых нагрузок главных компонент, которые характеризуют внутреннюю структуру процессов и явлений, что дает ключ к более детальной интерпретации взаимосвязей в системе [1, 6]. Описание ее в сжатом виде достигается выделением небольшого числа главных

¹ Математическая модель МГК представлена сокращенно, подробное ее описание приведено в работах [6, 18].

компонент, в которых заключена основная информация об изменчивости признаков в системе. О значимости главных компонент судят по величине их вклада в общую дисперсию. В анализе главных компонент используются элементы кластерной техники. Сгущение точек на плоскости (в пространстве) главных компонент способствует выделению наиболее информативных признаков в системе. В данной модели наряду со статистическими приемами используются элементы матричной алгебры, что ставит МГК в ряд комбинированных методов, применение которых в экологическом моделировании признано достаточно эффективным [2].

Однако наряду с перечисленными преимуществами необходимо помнить, что данный метод — чисто эмпирический. Он позволяет выдвигать гипотезы, касающиеся изучаемых взаимосвязей, на основании результатов обработки большого числа данных. Этот метод помогает сформулировать самые общие заключения о направлениях, в которых нужно вести дальнейшие непосредственные экспериментальные исследования [12]. Поэтому МГК можно использовать при определении первых приближенных характеристик закономерностей, лежащих в основе явлений.

Поскольку метод позволяет описывать изменчивые и разнородные по своей природе фитопланктонные сообщества небольшим числом обобщенных показателей, были предприняты попытки применить МГК для решения некоторых задач в экологии морского фитопланктона.

Отбор оптимального числа признаков исключением из них самых несущественных при построении эмпирических моделей планктонных экосистем. Построение эмпирических моделей связано с выбором наиболее информативных показателей. МГК был применен при построении моделей морской планктонной экосистемы, где ее редуцирование проводилось исключением несущественных признаков [13, 37]. В теории планирования эксперимента использование МГК известно на этапе уточнения задачи исследования [11], который включает в себя проведение серии элиминирующих и отсеивающих экспериментов для выявления наиболее существенных и исключения мешающих факторов. Совместное использование современной многомерной статистики типа МГК и методов планирования эксперимента позволяет эффективно выделять оптимальное число признаков для описания систем и их классификации.

Изучение пространственно-временных закономерностей динамики численности и видового состава фитопланктона. Для оценки состояния морских планктонных экосистем представляется важным определить влияние различных факторов среды на пространственно-временную динамику фитопланктона. В данном случае исследователи сталкиваются со статистической обработкой довольно объемной информации, которая включает в себя большое число видов фитопланктона и множество факторов, определяющих изменение видового состава. Применение традиционных в биологии методов попарного сравнения признаков не является достаточно эффективным средством. Кроме того, проблема во многом усложняется необходимостью учитывать большое число видов, которое превосходит возможности вычислительных машин [11]. Поэтому при решении задач районирования и классификации фитопланктона важно воспользоваться такими объективными математическими методами, которые обладают способностью описывать экосистемы значительно меньшим числом обобщенных показателей.

К таким относится МГК, который позволяет выделять доминирующие виды и факторы, существенно влияющие на изменение структуры фитопланктонных сообществ. Примером использования этого подхода явилось изучение в прибрежной части южной Калифорнии пространственных изменений 60 видов фитопланктона [36]. С этой целью на нескольких горизонтах эвфотической зоны отбирали пробы вдоль побережья и в открытом море. Было выделено две главные компоненты, суммарная доля которых составила 72% общей дисперсии. Анализ массовых нагрузок первой главной компоненты показал, что в пробах, взятых вдоль побережья из слоя максимального содержания хлорофилла, наблюдались значительные различия в видовом составе. Наиболее часто встречались кокколитофориды и динофлагеллаты.

Вторая компонента описывала поверхностные слои и частично слои с максимальным содержанием хлорофилла акваторий, значительно удаленных от побережья. Численность и видовой состав фитопланктона в этих пробах воды различались незначительно, а доминировали несколько видов диатомей и пигментированная цилиата *Mesodinium rubrum*. Таким образом, с помощью МГК установлено, что в направлении от берега видовой состав планктонных водорослей менялся более резко, чем вдоль побережья. По сравнению с поверхностным слоем, слой с максимальным содержанием хлорофилла по видовому составу был значительно разнообразнее, и по всем станциям в пределах этого слоя индексы видового разнообразия существенных различий не имели.

Для изучения динамики фитопланктона под воздействием гидрографических условий представляют интерес исследования, проводимые в районе Калифорнийского побережья в весенний сезон [26]. Гидрография этого района такова: подъем вод у берегов Калифорнии наблюдается круглый год. Его интенсивность зависит от силы преобладающих ветров. Исследователи поставили перед собой задачу: выяснить, как меняется видовой состав фитопланктонного сообщества в зависимости от подъема вод, обогащенных биогенными элементами. Компонентному анализу было подвергнуто 180 различных видов морских планктонных водорослей, в результате чего было выделено три главные компоненты, которые объясняли 44% изменчивости изучаемой экосистемы. Основная интерпретация нагрузок главных компонент велась с помощью элементов кластерной техники, использование которой предусматривает данный метод.

Расположение точек в пространстве трех главных компонент позволило более подробно разграничить периоды, в которых изменения гидрографических условий вызывало значительное изменение качественного состава фитопланктона. Установлено, что в условиях пониженного содержания в воде биогенных элементов и солености преобладали динофлагелляты. Диатомовые доминировали в период, когда в воде наблюдались высокие концентрации биогенов и повышенная соленость. Применение МГК в данной работе позволило проследить смену видового состава фитопланктона под влиянием изменений температуры, солености и концентрации биогенных элементов в воде. Кроме того, МГК позволил сделать вывод о том, что качественный состав фитопланктона может быть достаточно хорошим индикатором изменений гидрографических параметров.

В пресноводных исследованиях для анализа 111 видов фитопланктона также был использован анализ главных компонент [21]. Одновременно изучали девять физико-химических показателей. В результате были четко разграничены два периода сезонной динамики фитопланктона (зима и лето), устойчивые по видовому составу и разделенные переходными периодами весной и осенью, — когда резко менялся видовой состав.

Особый интерес представляют работы, в которых весеннее цветение диатомовых изучали с учетом характеристик физиологического состояния: фотосинтеза, дыхания и скорости деления клеток [35]. Компонентный анализ позволил выявить функциональную роль отдельных популяций водорослей на различных стадиях цветения.

В Севастопольской бухте для анализа взаимоотношений фитопланктон — среда определяли: численность и биомассу фитопланктона, содержание фосфора в клетке, а также наличие в среде питательных веществ [13]. Из совокупности признаков с помощью МГК было выделено минимальное число факторов, влияющих на изменение численности биомассы фитопланктона. Огражены статическая и динамическая стороны функционирования фитопланктонных сообществ в зависимости от удельного содержания хлорофилла «а» и фосфора в клетке на объем воды или на единицу биомассы.

МГК применялся при изучении влияния некоторых абиотических факторов на уровень первичной продукции в районах Саргассова моря [9]. Компонентный анализ показал, что в изучаемой экосистеме наиболее сильно проявились следующие факторы: температура и освещенность, тогда как

условия минерального питания на процесс образования органического вещества существенно не влияли.

Определение влияния различных гидролого-гидрохимических характеристик, включая факторы загрязнения, на изменение структурных и функциональных показателей. МГК применяется при выявлении совместного действия различных факторов среды на качественный и количественный составы фитопланктона в районе побережья северо-западной Африки [25]. Метод позволил выделить эвтрофикацию вод, вызванную влиянием берегового стока. С применением МГК в поверхностном слое Ливерпульского залива изучали температуру, соленость, прозрачность и содержание биогенных элементов [28]. В гидрографии залива для декабря — января были выделены общие черты, обусловленные взаимодействием морских и пресных вод. Было также установлено, что жизнедеятельность планктонных организмов в этот период мало зависела от содержания биогенных элементов в воде.

Такие работы проведены в летний период [29]. Метод использовался как средство распознавания различных типов вод Западной части Ирландского моря. Помимо перечисленных физико-химических параметров анализировалось изменение содержания хлорофилла «а» в воде. В результате были выделены три главные компоненты, суммарная доля которых в изменчивости изучаемой экосистемы составляла 94%. Анализ компонент четко разграничил акватории, существенно отличающиеся по своим физико-химическим и биологическим параметрам, а также дал возможность выбрать наиболее чувствительные характеристики для распознавания типа вод.

С помощью компонентного анализа обработаны данные круглогодичной гидрохимической съемки в Каспийском море [16]. Обобщены результаты по пяти горизонтам на нескольких широтных разрезах. Анализ значительного объема данных (683 пробы) о температуре, солености, щелочности, содержании O_2 и концентрации биогенных элементов в воде требовал применения методов сжатия информации. Применение МГК помогло выявить наиболее важные факторы, формирующие гидролого-гидрохимический режим по сезонам: зимой — вертикальная циркуляция, фото- и хемосинтез; весной — материковый сток, фотосинтез и регенерация биогенных элементов; летом — испарения, фотосинтез и регенерация биогенных элементов; осенью — материковый сток, фотосинтез и растворение карбонатов.

МГК используют при определении степени загрязнения водоемов [9]. С помощью чисто гидробиологических методов решение проблемы эвтрофикации бывает затруднительным из-за большого разброса случайных величин для множества рассматриваемых параметров. В связи с этим сочетание гидробиологических методов с многомерными статистическими оказалось эффективным в определении зон, за пределами которых загрязнение не влияет на состав фитопланктона.

Таким образом, при комплексном изучении водоемов статистический МГК является важным вспомогательным средством для соединения разнородных сведений в целостную систему, отдельные элементы которой описываются выразительными средствами различных наук: гидрофизики, гидрохимии, гидробиологии и др.

Долгосрочное прогнозирование воздействия различных факторов среды на изменение численности и видового состава фитопланктона. Известно применение компонентного анализа при выявлении характера цикличности многолетних изменений численности и биомассы фитопланктона [7, 21]. Такие работы немногочисленны, однако они представляют несомненный интерес для установления общности процессов управления в сложных биологических системах. Проведение многолетних наблюдений с использованием МГК открывает широкие возможности для моделирования планктонных экосистем и прогнозирования воздействий факторов внешней среды на качественные и количественные изменения фитопланктона в морских и пресноводных бассейнах.

Следовательно, проведение компонентного анализа дало возможность глубже понять основные концепции метода и оценить его роль в научных исследованиях при изучении объективно существующих закономерностей

пространственно-временной изменчивости морского фитопланктона. Знакомство с содержанием и результатами перечисленных работ показало, что использование МГК в экологии морского фитопланктона помогает решать задачи динамики сложных, с изменяющейся структурой систем, имеющих, как правило, стохастический характер. Данный метод наиболее применим на ранних стадиях исследования, где научный поиск только начинается, а также там, где трудно проводить эксперименты для оценки выдвинутых гипотез. МГК, обладая способностью сжатия объемной исходной информации до небольшого числа некоррелируемых между собой показателей, помогает оценить влияние различных факторов среды на состояние фитопланктона в море. В результате использования МГК были получены ценные сведения о пространственно-временной динамике и структуре фитопланктонных сообществ в море, что подтверждает важность применения этого метода в экологии фитопланктона.

1. Андрукович П. Ф. Применение метода главных компонент в практических исследованиях. — М.: Изд-во МГУ, 1973. — 123 с.
2. Беляев В. И. Применение комбинированного метода математического моделирования экологических систем для оценки их потенциальной продуктивности. — В кн.: Междунар. симпоз. по пробл. мат. моделирования процессов взаимодействия человек, активности и окружающей среды (Телави, 1978 г.). М.: Наука, 1979, т. 1, с. 56—71.
3. Грязнов А. К. Понятие многомерных методов и их методологическое значение. — Методол. вопр. науки, 1978, № 8, с. 74—83.
4. Дубров А. М. Обработка статистических данных методом главных компонент. — М.: Статистика, 1978. — 134 с.
5. Калугина-Гутник А. А., Холодов В. И., Иванова И. К. Морфологическая характеристика роста проростков *Ulva rigida* Ag. в различные сезоны года в Севастопольской бухте. — Экология моря, 1980, вып. 1, с. 47—58.
6. Кендал М. Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. — М.: Наука, 1976. — 736 с.
7. Кожова О. М., Шастина Н. А., Мельник Н. Г. Статистические методы оценки состояния водных экосистем. — Гидробиол. журн., 1979, 15, № 3, с. 3—13.
8. Кошелев Ю. Н., Литвинов П. И. Об использовании некоторых статистических моделей при изучении морского обитания. — Биология моря, Киев, 1979, вып. 48, с. 41—45.
9. Крупаткина Д. К., Рузова А. И. Анализ влияния абиотических факторов среды на первичную продукцию методом главных компонент. — Экология моря, 1982, вып. 11, с. 1—5.
10. Курченко Н. А. Математические модели процессов первичного продуцирования в водоеме (обзор). — Гидробиол. журн., 1979, 15, № 3, с. 24—33.
11. Лисенков Н. А. Математические методы планирования многофакторных медико-биологических экспериментов. — М.: Медицина, 1979. — 343 с.
12. Окунь Я. Факторный анализ: Пер. с пол. — М.: Статистика, 1974. — 199 с.
13. Парчевский В. П., Бурлакова З. П., Крупаткина Д. К., Кирикова М. В. Многомерный анализ взаимоотношений фитопланктон — среда в Севастопольской бухте. — Экология моря, 1980, вып. 1, с. 21—27.
14. Песенко Ю. А. Концепция видового разнообразия и индексы, его измеряющие. — Журн. общ. биологии, 1978, 39, № 3, с. 380—393.
15. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применение. — М.: Наука, 1968. — 548 с.
16. Семенов Ю. Д. Факторный анализ общего природного процесса, формирующего гидролого-гидрохимический режим восточной части среднего и южного Каспия. — Изв. АН СССР. Сер. биол. науки, 1978, № 4, с. 85—92.
17. Уильямсон М. Анализ биологических популяций. — М.: Мир, 1975. — 268 с.
18. Харман Г. Современный факторный анализ. — М.: Статистика, 1968. — 486 с.
19. Холодов В. И. Энергетический баланс морского ежа *Strongylocentrotus droebachiensis* (O. F. Muller), использующего разные формы пищи. — Биология моря, Киев, 1980, вып. 44, с. 74—86.
20. Allen T. F. H., Koonce J. F. Multivariate approaches to algal stratagems and tactics in systems analysis of phytoplankton. — Ecology, 1973, 54, N 6, p. 1234—1246.
21. Bartell S. M., Allen T. F. H., Koonce J. F. An assessment of principal component analysis for description of phytoplankton periodicity in Lake Wingra. — Phycologia, 1978, 17, N 1, p. 1—11.
22. Cassie R. M. Multivariate analysis in the interpretation of numerical plankton data. — New. Zentl. J. Sci., 1963, 6, p. 36—59.
23. Colebrook J. M. Continuous plankton records zooplankton and environment North-East Atlantic and North-Sea. — Oceanol. acta, 1978, N 1, p. 9—13.
24. Dessier A., Zaurec A. Le cycle annuel du zooplankton a Pointe-Noire (RP Congo): Description mathematique. — Oceanol. acta, 1978, N 3, p. 285—304.
25. Estrada M. Mesoscale Heterogeneities of the phytoplankton: Distribution in the Upwelling Region of N. W. Africa. — In: Upwelling ecosystems. London: Springer, 1978, p. 15—23.
26. Estrada M., Blasco D. Two phases of the phytoplankton community in the Baja California upwelling. — Limnol. and Oceanogr., 1979, 24, N 6, p. 1065—1080.

27. *Fasham M. J. R.* A comparison of nonmetric multidimensional scaling principal components and reciprocal averaging for the ordination of simulated coenoclines and coenoplanes.— *Ecology*, 1977, 58, N 3, p. 551—561.
28. *Foster P., Hunt D. T. E., Pugh K. B. et al.* A seasonal study of the distributions of surface state variables in Liverpool Bay. I. Winter date.— *J. Exp. Mar. Biol. and Ecol.*, 1977, 26, N 3, p. 303—313.
29. *Foster P., Savidge G., Foster G. M. et al.* Multivariate analysis of surface water characteristics in the western Irish Sea.— *J. Exp. Mar. Biol. and Ecol.*, 1976, 25, N 2, p. 171—185.
30. *Kawabata Z., Kurichara Y.* Computer simulations — hips between the total system and subsystem in the early stages of succession of the aquatic microcosm.— *Sci. Repts Tohoku Univ.*, Ser. 4, 1978, 37, p. 179—204.
31. *Levandowsky M.* An ordination of phytoplankton populations in ponds of varying salinity and temperature.— *Ecology*, 1972, 53, N 2, p. 398—406.
32. *Margalef R.* Perspectives in ecological theory — Chicago : Univ. Chicago press, 1968, p. 112.
33. *Pearson K.* On lines and planes of closest fit of points in space.— *Phil. Mag.*, 1901, 2, N 6, p. 105—120.
34. *Pinel-Alloul B., Legendre P., Magnin E.* Zooplankton limnétique de 46 lacs et 17 rivières du territoire de la baie de James.— *Can. J. Zool.*, 1979, 57, N 8, p. 1693—1709.
35. *Platt T. D. V., Subba R.* Energy flow and species diversity in a marine phytoplankton bloom.— *Nature*, 1970, 227, p. 1059—1060.
36. *Reid F. M. H., Stewart E., Eppley R. W., Goodman D.* Spatial distribution of phytoplankton species in chlorophyll maximum layers off Southern California.— *Limnol. and Oceanogr.*, 1978, 23, p. 195—205.
37. *Ulanowicz R. E., Flemer D. A., Heinle D. R., Huff R. T.* The empirical modelling of an ecosystem.— *Ecol. Modell.*, 1978, 4, N 1, p. 29—40.
38. *Williams W. T., Lambert J. M.* Multivariate methods in plant ecology. I Association analysis in plant communities.— *J. Ecol.*, 27, N 1, p. 83—101.

Институт биологии южных морей
им. А. О. Ковалевского АН УССР

Поступила в редколлегию
09.11.81

A. I. RUZOVA, D. K. KRUPATKINA

EMPLOYMENT OF THE PRINCIPAL COMPONENT METHOD IN ECOLOGY OF MARINE PHYTOPLANKTON (A REVIEW)

Summary

Research in the field of marine phytoplankton ecology with application of the method of principal components is analyzed. The method is shown applicable for a concise description of dynamics of complex (with variable structure) ecosystems of stochastic character. Problems for whose solution the method of principal components was applied are as follows: selection of the optimal number of characters when designing empiric models of planktonic ecosystems; study of the environmental effect on changes in structural and functional phytoplankton groupings; analysis of results of observations for long-term prediction of alterations in marine phytoplankton associations.

УДК 541.1:578.087.1:577.472(07)

В. И. БЕЛОИВАНЕНКО, С. М. ИГНАТЬЕВ,
Ю. С. ЧУРИЛОВ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ВОДНЫХ ОРГАНИЗМОВ

В некоторых областях современной биологии, в частности в физиологии, экологии и биогидродинамике, возникает необходимость получения объективных данных о площади поверхности тела организма или его отдельных частей. Эта величина необходима для понимания различных вопросов взаимодействия организма с окружающей средой [14—17] и выявления закономерностей осмотического проникновения растворенных в воде веществ [4], а также для расчета гидродинамических характеристик [2, 3, 13, 22]. Особую трудность представляет измерение площади поверхности организмов малых размеров со сложным рельефом и конфигурацией тела. Существующие методы недостаточно точны, трудоемки и не всегда применимы. Известны следующие способы решения поставленной задачи, которые применяются или могут применяться в биологии.