

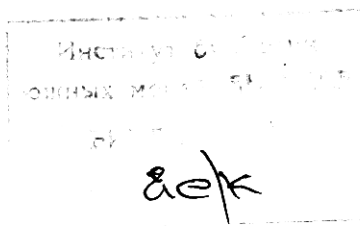
АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ
им. А. О. КОВАЛЕВСКОГО

Экология моря

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ
МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ СБОРНИК

Основан в 1980 г.

Выпуск 6



4. Попов Б. В. Определение параметров многокамерных моделей. — В кн.: Комплексообразование и метаболизм радиоактивных изотопов. Свердловск, 1976, с. 99—108. (Тр. Ин-та экологии растений и животных; Т. 103).
5. Хайлов К. М., Ерохин В. Е. Вопросы утилизации растворенных органических веществ раками *Tigriopus brevicornis* и *Calanus finmarchicus*. — Океанология, 1971, 11, вып. 1, с. 117—126.
6. Холодов В. И. Ассимиляция различных форм пищи морскими ежами *Strongylocentrotus droebachiensis*. — Гидробиол. журн., 1975, 11, вып. 6, с. 41—46.
7. Чмыр В. Д., Шадрин Н. В. Перспективы применения радиоуглеродного метода для определения продукции и обмена зоопланктона в условиях естественной популяции. — Биология моря, Киев, 1976, вып. 39, с. 25—38.
8. Conover R. J., Francis V. The use of radioactive isotopes to measure the transfer of materials in aquatic food chains. — Mar. Biol., 1973, 18, N 4, p. 272—283.
9. Ferguson J. C. An autoradiographic study of the utilization of free exogenous amino acids by starfishes. — Biol. Bull., 1967, 133, N 2, p. 317—329.

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

Поступила в редколлегию
02.10.79

V. I. KHOLODOV

STUDIES IN CARBON FLOWS THROUGH THE TIGRIOPUS BREVICORNIS ORGANISMS BY THE METHODS OF MATHEMATICAL PLANNING OF EXPERIMENTS

Summary

The paper deals with the determination of flow characteristics for ^{14}C contained in solid form of food — multicellular alga enteromorpha and in its dissolved form — glycine and passing through the body of *tigriopus* inhabiting supralittoral baths of the Barents Sea coast. It is established that the intensity of glycine is 10 times as low as that for enteromorpha carbon. The mass of metabolic pool accumulating enteromorpha carbon is 14 times as high as that of metabolic pool of glycine carbon. More detailed studies in the dependence of carbon uptake intensity on the substrate nature are fulfilled by means of four types of substrates with varying temperature, salinity and quality of unlabelled enteromorpha placed into an experimental vessel.

The parameters of the process of carbon elimination from the *tigriopus* body may be employed for determining their metabolism and productivity. For this purpose it is necessary to select beforehand an adequate food substrate and to reveal the factors affecting the intensity of carbon removal as well as the energy exchange and *tigriopus* production.

УДК 595.3:577.11:519.2(26)123

В. Н. ЕГОРОВ, В. Н. ИВАНОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КИНЕТИКИ ОБМЕНА ЦИНКА-65 И МАРГАНЦА-54 У МОРСКИХ РАКООБРАЗНЫХ ПРИ НЕПИЩЕВОМ ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ

Непищевой путь поступления и выведения химических веществ у морских организмов играет важную роль в биогеохимических циклах элементов в морской среде. Некоторые авторы отводят ему преобладающее значение (по сравнению с пищевым) в биогенной миграции тяжелых металлов микроэлементов или их радионуклидов [2, 5]. Существует, однако, и противоположная точка зрения [3, 4].

Количественное описание кинетики обмена химических элементов, поступающих в гидробионты непосредственно из воды, позволит оценить поток элемента через отдельные организмы, популяции, биогеоценозы, которые лишь косвенно регулируются трофическими взаимо-

отношениями в морских экосистемах. Среди морских ракообразных — животные различных трофических уровней. Изучая на представителях этого класса закономерности непищевого поступления и выведения элементов, можно выявить общие для различных видов кинетические зависимости концентрирования и потери металлов (радионуклидов). Использование математических моделей в изучении кинетики обмена предъявляет обоснованные требования к точности экспериментальных данных, и при постоянной проверке адекватности моделей результатам опытов можно рационально планировать эксперименты.

Цель настоящей работы — проверить применимость камерных моделей для математического описания кинетики обмена ракообразными меченых микроэлементов.

Материал и методика. Эксперименты проводились с различными видами зоопланктона экваториальной зоны Атлантики и черноморскими *Idotea*. Животных отлавливали гипонейстонной сетью, сетью Джеди (зоопланктон) или собирали в зарослях цистозир (идотей). Опыты ставили при температурах воды в аквариумах, равных температуре среды (18—24°C). В специальных экспериментах температура воды регулировалась. Для мечения животных использовали хлористые соли цинка-65 и марганца-54, марки «циклотронный, без носителя». Объем рабочих растворов — 0,8—1 л, радиоактивность 1—6·10⁻⁶ Ки/л. Изменение концентрации цинка-65 и марганца-54 в течение опыта контролировали путем отбора и просчета проб (по 5 на каждую временную точку).

Для снижения вариабельности экспериментальных данных проводили прижизненное радиометрирование животных, осреднение результатов проводили лишь внутри групп животных, масса которых различалась не более чем на 20%. При постановке опытов с мелким зоопланктоном на каждую пробу приходилось 5—30 экз. Радиометрические измерения проводили на установках, состоящих из датчика «Воря» с кристаллом NaI(Tl) 63×63 мм и пересчетного прибора ПП-09 или анализатора АИ-128. Погрешность радиометрии не превышала 5%.

По результатам предварительных экспериментов осуществлялось математическое планирование опытов. Объем выборок подбирался таким образом, чтобы ширина доверительного интервала среднего, определяемого с уровнем значимости $\alpha=0,05$ (предполагалось, что в выборках результаты распределены нормально), не превышала 20% его величины. Расшифровка γ -спектров при совместном использовании цинка-65 и марганца-54, обработка результатов опытов и математическое моделирование осуществлялись на ЭВМ.

Результаты и обсуждение. Результаты опытов по выведению цинка-65 и марганца-54 (рис. 1, б, 2, б) свидетельствуют о том, что процесс этот сложный, экспериментальные точки, приведенные на графике в логарифмическом масштабе по оси ординат, не ложатся на прямую. Следовательно, кинетика накопления радионуклидов цинка и марганца в наших опытах не описывается экспонентой.

Применим для аппроксимации экспериментальных данных двух-экспоненциальную функцию

$$C_T/C_0 = a_1 e^{-p_1 t} + a_2 e^{-p_2 t}, \quad (1)$$

где C_T/C_0 — отношение концентраций радионуклида в гидробионте в текущий момент времени опыта по выведению к его концентрации в начальный момент; a_1 и a_2 — предэкспоненциальные множители, не имеющие размерности ($a_1 + a_2 = 1$); p_1 , p_2 — постоянные скорости ($1/t$ — время), рассчитываемые через периоды полужизни экспонент τ ($p_i = 0,693\tau_i$).

Аппроксимация данных функцией (1) равносильна применению двухкамерной модели обмена, дифференциальная форма записи которой при пренебрежении распадом изотопа (что справедливо для ре-

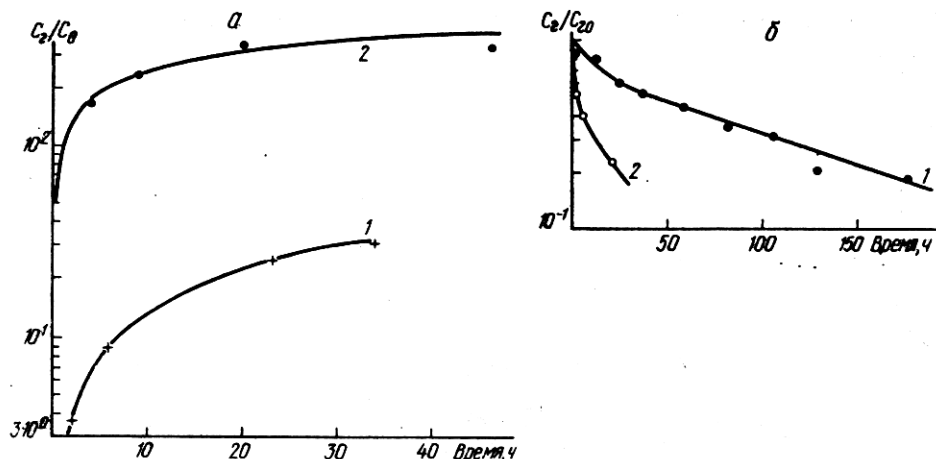


Рис. 1. Накопление (а) и выведение (б) цинка-65 *G. medusarum* (1) и *C. mastigophorus* (2). Концентрация радиоактивного цинка: C_0 — в водной среде; C_r — в гидробионте в текущий момент времени; C_{r0} — в начальной точке опыта по выведению.

зультатов опытов с цинком-65 и марганцем-54) и значительном превышении радиоактивного пула среды над пулом гидробионта имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dC_1}{dt} &= p_1(C_b B_1 - C_1); \\ \frac{dC_2}{dt} &= p_2(C_b B_2 - C_2), \end{aligned} \quad (2)$$

где C_b и C_1, C_2 — концентрация радионуклида в воде (имп/мин·мг) в первой и второй территориально неразделенных камерах гидробионта, $C_1 + C_2 = C_r$ — концентрация радионуклида в гидробионте (имп/мин × мг); B_1, B_2 — относительные объемы камер гидробионта (безразмерные величины), равные отношению концентраций радионуклида в камерах и среде в стационарном состоянии. Если пул элемента в гидробионте мал, то решение уравнений (2) имеет вид

$$C_2(t) = C_{b0} K_c + (C_{10} - C_{b0} B_1) e^{-p_1 t} + (C_{20} - C_{b0} B_2) e^{-p_2 t}, \quad (3)$$

где K_c — статический или предельный коэффициент накопления радионуклида гидробионтом, $K_c = B_1 + B_2$; C_{b0}, C_{10}, C_{20} — начальные условия — концентрация радионуклида в водной среде и камерах гидробионта.

Применим зависимости (1) и (3) для определения параметров модели (2) по результатам экспериментальных наблюдений.

Аппроксимация данных зависимостью (1) позволяет определить параметры модели (2) p_1 и p_2 . Соотношение (3) при использовании значений C_{b0}, C_{10} и C_{20} , соответствующих экспериментальным данным по выведению радионуклида гидробионтом, приводится к зависимости вида (1), и параметры B_1 и B_2 выражаются через установленные аппроксимацией величины p_1 и p_2 и a_1 и a_2 следующим образом:

$$B_1 = \frac{a_1 K(t_1)}{1 - e^{-p_1 t_1}}; \quad B_2 = \frac{a_2 K(t_1)}{1 - e^{-p_2 t_1}}, \quad (4)$$

где $K(t_1)$ — коэффициент накопления в точке t_1 предварительного опыта по накоплению, являющийся начальным моментом опыта по выведению радионуклида гидробионтом.

Таким образом, используя результаты опыта по выведению и зная величину коэффициента накопления $K(t_1)$, достигнутую за время t_1

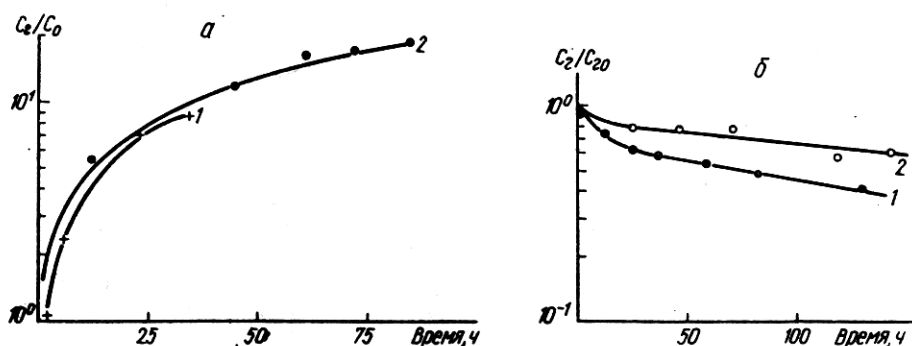


Рис. 2. Накопление (а) и выведение (б) марганца-54 *G. medusarum* (190 мг) (1) и *Megalopa sp.* (5,5 мг) (2). Концентрация радиоактивного марганца: C_0 — в водной среде; C_g — в гидробионте в текущий момент времени; C_{g0} — в начальной точке опыта по выведению.

предварительного опыта по накоплению, можно определить параметры модели B_1 , B_2 и p_1 , p_2 по результатам наблюдений. Проверку адекватности модели можно устанавливать сравнением рассчитанной по формуле (3) кривой накопления (при $C_{b0}=C_b(0)$; $C_{10}=0$; $C_{20}=0$) с экспериментальными наблюдениями накопления радионуклида гидробионтом во всех временных точках. Выполнение указанной вычислительной процедуры применительно к результатам опытов, приведенных на рис. 1 и 2, позволило определить параметры модели обмена цинка-65 и марганца-54, соответствующие параметрам наших экспериментальных животных (таблица).

Кривые, аппроксимирующие результаты опытов по выведению радионуклидов цинка и марганца, приведены на рис. 1, б и 2, б, а зависимости кинетики накопления, рассчитанные по уравнению (3), нанесены на рис. 1, а и 2, а сплошными линиями. Теоретические кривые накопления достаточно хорошо согласуются с результатами наблюдений, что позволяет принять гипотезу об адекватности описания двухкамерными моделями кинетики обмена цинка-65 и марганца-54 изученными видами. Таким образом, кинетику накопления и выведения цинка и марганца ракообразными можно интерпретировать как результат обмена каждого радионуклида двумя фондами со скоростями метаболических реакций первого порядка. Полученные результаты не означают, что у изученных нами видов существуют только по два фонда, обменивающих цинк-65 и марганец-54, но позволяют утверждать, что, если совокупность процессов обмена каждого из радионуклидов разбить на две группы, протекающие с разной интенсивностью; то кинетика процесса, определяемого расчетным путем, не будет отличаться от наблюдаемой при оговоренных выше условиях экспериментов.

Применение камерной модели позволяет установить предельные коэффициенты накопления и скорости обмена радионуклидов гидробионтами, а также условия постановки экспериментов для их определения. Статический коэффициент накопления *G. medusarum* цинка-65 составляет 108, а марганца-54 — 46,7; цинка-65 *S. mastigophorus* — 449; марганца-54 *Megalopa sp.* — 93,6. Скорости обмена указанных радионуклидов у этих животных соответственно равны 1,75; 4,34; 85,1; и 0,65 1/ч. Они рассчитывались как сумма величин $B_1p_1+B_2p_2$, которая

Параметры модели кинетики обмена ^{65}Zn и ^{54}Mn ракообразными

Объект	^{65}Zn				^{54}Mn			
	B_1	B_2	P_1	P_2	B_1	B_2	P_1	P_2
<i>G. medusarum</i>	11,0	97	0,09130	0,00775	43,8	2,9	0,09900	0,00415
<i>C. mastigophorus</i>	115,5	273,5	0,43300	0,03330	—	—	—	—
<i>Megalopa</i> sp.	—	—	—	—	3,3	90,3	0,13860	0,00215

равна значению производной выражения (3) при $t=0$. Следует отметить, что возможно также непосредственное определение скорости обмена численным дифференцированием по точкам экспериментальных наблюдений накопления (начиная с начального момента времени) и выведения, если в опыте по предварительному накоплению радионуклида гидробионтом концентрирование доведено до предельного уровня. Оценки интенсивности обмена по результатам опытов, с отличающимися от указанных условиями, могут обладать весьма высокой погрешностью. Так, например, на рис. 2, б кривая выведения марганца-54 *G. medusarum* расположена значительно круче, чем кривая выведения этого радионуклида мегалопами, что создает иллюзию большей скорости обмена радиомарганца у *G. medusarum*, хотя в действительности мегалопы обменивают марганец-54 более интенсивно.

Данные рис. 1, а и 2, а свидетельствуют о том, что чем меньше масса особей, тем выше уровни концентрирования ими каждого из радионуклидов, как показывают расчеты, тем выше и скорости обмена животными радиоактивных цинка и марганца. Аналогичные закономерности проявляются и среди особей разной массы других видов ракообразных [1]. Например, коэффициенты накопления цинка-65 различных размерных групп идолями тем выше, чем меньше масса их особей (рис. 3). Следова-

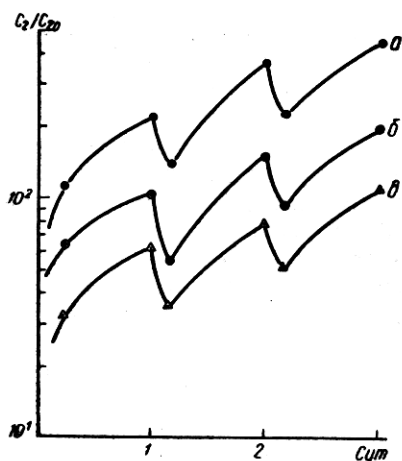


Рис. 3. Накопление цинка-65 *I. baltica* при температуре среды 19°C: а — масса особей 10—13 мг; б — 43—60 мг; в — 120—145 мг; C_r и C_{r0} — концентрация радиоактивного цинка в гидробионте и в воде.

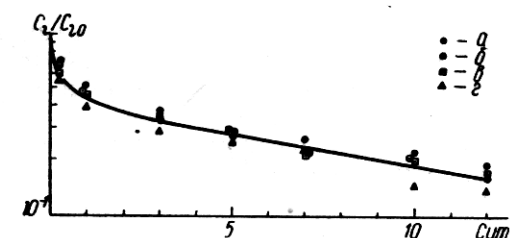


Рис. 4. Выведение цинка-65 *I. baltica* массой 10—13 мг (а), 43—60 мг (б), 120—145 мг (в) при температуре среды 19°C и 43—60 мг (з) при температуре 12°C:

C_r , C_{r0} — концентрации радионуклида в животных в текущий момент времени и в начальной точке опыта по выведению.

тельно, параметры модели (2) для разных размерных групп одного вида животных не одинаковы и с ростом особей изменяются.

Рассмотрим характер этих изменений и возможные их причины. На рис. 4 показана кинетика выведения цинка-65 разными размерными группами идолей после накопления этого радионуклида в течение 3 сут (кинетика накопления цинка-65 этими животными иллюстрируется рис. 3). Точки а—б рис. 4 отражают кинетику выведения радиоактивного цинка животными массой 10—13, 43—60 и 120—145 мг при

температуре окружающей среды 19°C, z — выведение цинка-65 животными массой 43—60 мг при температуре 12°C. Из рисунка видно, что кинетика выведения цинка-65 разными размерными группами идолей совпадает и не зависит от изменения температуры с 12 по 19°C. Переходя к интерпретации этих данных с точки зрения решения проблем моделирования, можно заметить, что они аппроксимируются зависимостью вида (1) с одними и теми же значениями p_1 , p_2 и a_1 , a_2 .

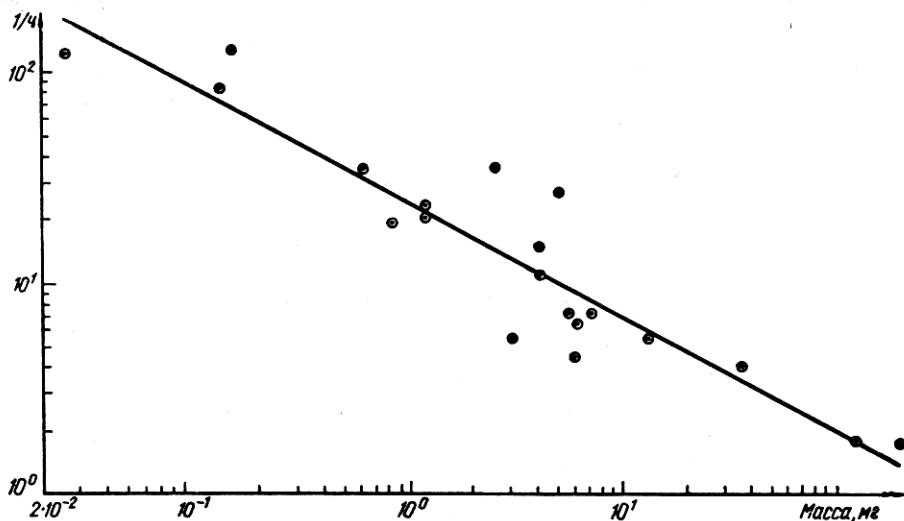


Рис. 5. Зависимость между скоростями обмена ($1/4$) цинка-65 ракообразными и массой особей.

Используя соотношение (3) применительно к описанию кинетики накопления с последующим выведением радионуклида гидробионтом, легко показать, что равенство a_1 и a_2 при аппроксимации результатов наблюдений означает постоянство отношения B_1/B_2 . Следовательно, кинетика обмена цинка-65 идолями разных размерных групп может быть отражена камерной моделью с неизменяющимися показателями скоростей обмена камер p_1 и p_2 и с пропорциональным изменением их объемов (B_1 и B_2).

Для установления характера зависимостей объемов обменных фондов как функций от массы особей обратимся к расчетным данным скоростей обмена цинка-65 ракообразными, иллюстрируемым рис. 5. На рисунке показано изменение рассчитанных по результатам наблюдений скоростей обмена радиоактивного цинка зоопланктонными представителями ракообразных разных таксономических групп Атлантического океана (в том числе и идолями). Из рисунка видно, что точки на графике удовлетворительно ложатся на прямую, отложенную в логарифмическом масштабе по осям координат, что свидетельствует о степенном виде зависимости между скоростью обмена, равной $B_1 p_1 + B_2 p_2$, и массой гидробионта. Учитывая постоянство отношения B_1/B_2 и p_1 , p_2 , можно показать, что величины обменных фондов цинка-65 в гидробионте с его массой связаны также степенной зависимостью.

Аналогичные выводы нами получены и при моделировании кинетики обмена ракообразными марганца-54. Таким образом, кинетика обмена цинка-65 и марганца-54 ракообразными удовлетворительно описывается двухкамерной математической моделью. Объемы камер находятся в степенной зависимости от массы особей.

1. Иванов В. Н. Накопление ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{106}Ru , ^{144}Ce океаническим зоопланктоном. — В кн.: Хеморадиоэкология пелагиали и бентали. Киев: Наук. думка, 1974, с. 211—247.
2. Марчуленене Д. П., Поликарпов Г. Г. О роли воды и корма в поступлении некоторых радионуклидов в организм прудовиков. — Экология, 1976, 2, с. 91—94.
3. Lowman F. J., Rice T. R., Richards F. A. Accumulation and redistribution of radionuclides by marine organisms. — In: Radioactivity in the marine environment. Washington: NAS, 1971, p. 161—200.
4. Murray C. N., Renfro W. Uptake of plutonium from seawater and sediment by a marine polychaete worm. — J. Oceanogr. Soc., Jap., 1976, 32, N 6, 249—252.
5. Polikarpov G. G. Radioecology of aquatic organisms. — New York; Reinhold, 1966.— 314 p.
6. Rizić I. Two compartment model of radionuclides accumulation into marine organisms. I. Accumulation from a medium of constant activity. — Mar. ecol., 1972, 15, N 2, p. 105—112.

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

Поступила в редколлегию
22.05.79

V. N. EGOROV, V. N. IVANOV

A MATHEMATICAL DESCRIPTION OF ZINC-65 AND MANGANESE-54 METABOLISM KINETICS IN MARINE CRUSTACEA WITH AN UNALIMENTARY WAY OF RADIONUCLIDES UPTAKE

Summary

A comparison of experimental and simulation results shows that kinetics of zinc-65 and manganese-54 metabolism in marine crustacea with an unalimentary uptake of radionuclides is described by two-chamber mathematical models. The capacity of two chambers exchanging radionuclide are in the exponential dependence on the mass of specimens. Zinc-65 and manganese-54 exchange the chambers at the rates of the first order metabolic reactions.

УДК 591.524.12+591.13

Т. М. КОВАЛЕВА

К ВОПРОСУ О ПИТАНИИ САМЦОВ ЧЕРНОМОРСКОГО PSEUDOCALANUS ELONGATUS (БОЕСК.)

Существенная роль в трансформации вещества и энергии в Черном море принадлежит веслоногим ракообразным, одним из которых является *Pseudocalanus elongatus*. Это, с одной стороны, потребитель фитопланктона, с другой — важный пищевой объект для многих рыб и их молоди. Самцов обычно бывает меньше, чем самок, но иногда их численность превосходит численность самок в 5—10 раз. Следовательно, самцы составляют существенную часть популяции *P. elongatus* и рациона планктоноядных рыб. Кроме того, калорийность самцов несколько выше, благодаря большим, чем у самок (в 3—5 раз), запасам жира (наши расчеты по данным С. Г. Африковой).

Эти обстоятельства обуславливают необходимость всестороннего изучения *P. elongatus*, в том числе питания как одной из важнейших сторон их жизнедеятельности. Однако в литературе имеются немногочисленные данные о питании только самок этого вида [1—4, 6, 7]. Что же касается самцов, принято считать, что они не питаются. Так, на основании полевых наблюдений Ю. А. Загородняя [4] пришла к выводу, что самцы не потребляют оформленной пищи. В лабораторных условиях питания также не было обнаружено [1]. Однако можно полагать, что исследования на фиксированном материале не всегда