

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА СКОРОСТЬ ПОГРУЖЕНИЯ НЕКРОЗООПЛАНКТОНА

О.А. Черепанов, Е.В. Павлова

Институт биологии южных морей НАНУ,
г. Севастополь, ул. Нахимова 2,
E-mail: ibss@ibss.iuf.net

*Влияние турбулентности на скорость погружения некростоопланктона исследовалось на математической модели. Скорость диссипации кинетической энергии турбулентности ε варьировалась в пределах 10^{-4} – 10^{-9} м² с⁻³. Параметры мертвых особей в основном соответствуют типичным копеподам севавтопольских бухт *Acartia* sp. Результат существенно зависит от способности тел к возврату в вертикальное положение при погружении. При $\varepsilon=10^{-7}$ – 10^{-9} м² с⁻³, характерных значениях во время отбора проб, тела неспособные к восстановлению вертикальной ориентации снижают скорость не более чем на 30%, а способные – не выше 10% по сравнению со скоростью погружения в среде без турбулентности. С учетом способности тел копепод восстанавливать вертикальную ориентацию во время погружения, можно с уверенностью сравнивать данные по некростоопланктону, полученные в достаточно широком диапазоне погодных условий.*

Введение. Интерес к оценке численности мертвых особей (некростоопланктон) во всем зоопланктоне проявился давно [1]. Важность дифференциации зоопланктона на живую и мертвую фракции при изучении биопродуктивности и круговорота веществ в морских акваториях была неоднократно показана при работе в шельфовых районах, открытых частях моря и прудов [2 – 9].

Существует два способа лова некростоопланктона. Первый – при помощи седиментационных ловушек, второй – обловом сетью Джели толщи воды с некоторой глубины Н до поверхности. В последнем случае, можно показать, что плотность численности некростоопланктона некоторой популяции в слое лова, равна

$$x = \frac{mX}{G}, \quad (1)$$

где m – удельный коэффициент смертности; X – плотность численности живых организмов в слое; G – функция, учитываю-

щая элиминацию некростоопланктона из слоя лова. Она описывается выражением

$$G = 1 / \int_0^H p(z) \frac{H-z}{v(z)} dz \quad (2)$$

Здесь $p(z) = X(z) / \int_0^H X(z) dz$ – распределение живых особей по глубине; $X(z)$ – плотность численности живых особей на глубине z ; $v(z)$ – средняя скорость погружения мертвых особей с глубины z до H . В частном случае, при равномерном распределении численности живых особей и отсутствии пикноклина в слое лова $G=2v/H$, где v – скорость погружения мертвых особей.

Из уравнения (1) можно рассчитать коэффициент смертности для некоторой популяции или таксономической группы. Он отражает совместное действие естественной гибели, недостатка пищи (конкуренции), возможное влияние паразитов, гидрологических условий и всего комплекса загрязнений. Поэтому данные о некростоопланктоне, в совокупности с ограниченным количеством дополнительных измерений, позволяющим дифференцировать компоненты смертности, дают возможность объективно оценивать влияние всего комплекса изменений в среде и загрязнений на живые организмы и на этом основании судить о степени загрязненности различных районов.

Чтобы рассчитать из уравнения (1) коэффициент смертности, необходимо знать, согласно выражению (2), среднюю скорость погружения мертвых особей с глубины z до H . Имеется уравнение, позволяющее достаточно точно рассчитывать скорость погружения некростоопланктона в среде без турбулентности [10]. Причем, если тело вытянуто, то особи погружаются вертикально из-за морфологических особенностей организмов. Большинство особей некростоопланктона имеют форму близкую к сфероиду, с отношением длины тела (L_p) к его ширине (d), лежащем в пределах 2 – 10. Скорость погружения, как будет показано ниже, при отклонении большой оси тела от вертикали на 90° уменьшается в L_p/d раз, т.е. в 2 – 10 раз. Если турбулентность способна влиять на ориентацию тела при погружении, то пренебрежение ее влиянием приведет к существенной погрешности в оценке удельной смертности. Учитывая, что ловы зоопланк-

тона (живых и мертвых) производятся в течение сезона, при различных уровнях турбулентности, исследование влияния турбулентности становится тем более актуальной.

Влияние турбулентности на скорость погружения некрзоопланктона исследуется на математической модели. Она состоит, во-первых, из уравнения скорости погружения некрзоопланктона, учитывающего возможное влияние турбулентности. Во-вторых, модели турбулентности среды и, в-третьих, уравнений, описывающих влияние турбулентности на ориентацию тела погружающегося мертвого организма.

Уравнение скорости погружения некрзоопланктона в турбулентной среде. Аппроксимируем организм длиной L_p , сфероидом с меньшим радиусом равным «а» и относительным удлинением r_a , равным отношению максимального радиуса к минимальному. Тогда, объем тела [2]

$$V = \frac{4}{3} \pi r_a a^3 \quad (3)$$

Для большинства копепод, с длиной тела не превышающей примерно 2 мм, зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от числа Рейнольдса описывается простым соотношением $\xi = C/Re$, где C – коэффициент пропорциональности.

Учитывая эти допущения и используя формулу расчета скорости погружения в среде без турбулентности [10, уравнение 4.24], получим формулу расчета скорости погружения (v) сфероидного тела при отклонении его большой оси от направления погружения на угол α

$$v = \frac{4gV}{\pi C v b_\alpha} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right) \quad (4)$$

где g – ускорение силы тяжести; ρ_0 и ρ – плотности среды и организма, соответственно; v – коэффициент кинематической вязкости; b_α – величина большой полуоси эллипсоида лобового сопротивления, рассчитываемая по формуле

$$b_\alpha = a r_a \sqrt{\frac{1}{(\sin^2 \alpha + r_a^2 \cos^2 \alpha)}} \quad (5)$$

В отсутствие турбулентности, мертвые особи зоопланктона погружаются с незначительными отклонениями большой оси тела от вертикали [10]. В турбулентной среде угол α возможно варьирует во времени (t) и поэтому средняя скорость погружения за период T , с учетом (5), будет

$$v = \frac{4gV}{\pi C v a} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right) Q_{\alpha r} \quad (6)$$

где $Q_{\alpha r}$ – множитель, учитывающий относительное удлинение тела и изменение его ориентации под влиянием среды

$$Q_{\alpha r} = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{\left(\frac{\sin^2 \alpha}{r_a^2} + \cos^2 \alpha \right)} dt \quad (7)$$

Описание турбулентности. Турбулентные пульсации характеризуются 4-мя параметрами: градиентом скорости пульсаций (γ), размером (L), длительностью существования (τ) и частотой появления (f).

Основная масса планктонных организмов имеют размер меньше наименьшего размера турбулентных вихрей $L_m = 2\pi L_v$,

где $L_v = (v^3 / \varepsilon)^{1/4}$ – масштаб Колмогорова, ε – средняя скорость диссипации кинетической энергии турбулентности на единицу массы морской воды [11, 12]. Значение ε в океане лежит в пределах 10^{-10} – 10^{-3} $m^2 \cdot c^{-3}$. Максимальное значение ε в верхнем перемешанном слое открытого океана равно 10^{-5} $m^2 \cdot c^{-3}$, а в прибрежной зоне в каналах с приливами – 10^{-2} $m^2 \cdot c^{-3}$ [13]. В районе со слабыми течениями и наличии небольших ветровых волн на горизонте 2 м $\varepsilon = 5.2 \cdot 10^{-7}$ $m^2 \cdot c^{-3}$, а на глубине 15 м $\varepsilon = 1.1 \cdot 10^{-7}$ $m^2 \cdot c^{-3}$ [14]. При характерных значениях v и ε ($v = 10^{-6}$ $m^2 \cdot c^{-1}$ и $10^{-9} < \varepsilon < 10^{-6}$ $m^2 \cdot c^{-3}$) значения наименьших размеров турбулентных вихрей лежат в пределах 0,5 – 5 см [12].

Согласно [11], на расстояниях меньше L_m , турбулентность проявляется как течение с постоянным градиентом скорости (сдвигом) $\gamma = dU/dL$, так что с увеличением дистанции L от центра потока, скорость U возрастает приблизительно линейно. Направление сдвигового течения изменяется случайно и равновероятно во всех направлениях.

Величина градиента скорости также случайно варьирует во времени в границах, определяемых универсальным спектром [11], из аппроксимации которого в области $L_v - 2\pi L_v$, имеем

$$\gamma^2 = 2.84 \cdot 10^{-4} \frac{\varepsilon}{v} \left(\frac{L}{L_v} \right)^{2.29} \quad (8)$$

где L – размер турбулентности.

Предполагая, что $\tau \sim \gamma^2$ (т.к. рассматриваемые масштабы принадлежат вязкостно-му интервалу турбулентности) и используя соотношение между L_v и длительностью существования турбулентности этого масштаба [14], получим

$$\tau = \tau_v \left(\frac{L}{L_v} \right)^{3.29} \quad (9)$$

где $\tau_v = \sqrt{v/\varepsilon}$ – длительность существования турбулентности размера L_v .

Так как универсальный спектр описывает распределение нормированной плотности сдвиговой кинетической энергии, то длительность существования (τ) и вероятность появления (f) турбулентности с размером L , должны быть связаны соотношением $\tau \cdot f = 1$.

Влияние турбулентности на погружающийся некрозоопланктон. Предполагается, что во время погружения мертвая особь длиной L_p проходит через сдвиговые течения масштабов $L_v \div 2\pi L_v$, существующих во всей толще воды. Эта ситуация соответствует верхнему перемешанному слою, в котором турбулентность генерируется ветровым волнением. На ориентацию тела во время погружения оказывают сдвиговые течения масштаба большего, чем длина особи. $L > L_p$. Турбулентные вихри масштабов больших, чем $2\pi L_v$ в модели не учитываются. Они рассматриваются как изотропная пульсационная составляющая адвективного течения. В виду изотропности, эти пульсации не влияют на среднюю скорость погружения. Время (τ_r) нахождения в сдвиговом течении масштаба L , равно

$$\tau_r = \min \left\{ \tau, \frac{L}{v} \right\} \quad (10)$$

где v – скорость погружения тела.

Движение сфероида в сдвиговом течении подчиняется колебательным траекториям, так называемым орбитам Джеффри [12], с периодом (T), зависящим от r_a и градиента скорости

$$T = \frac{2\pi}{\gamma} (r_a + r_a^{-1}) \quad (11)$$

Моделирование механизмов стабилизации погружающихся тел в вертикальное положение. Стабилизация погружающихся тел в вертикальном положении определяется множеством причин [10]. Например, несовпадением точек приложения архимедовых сил и сил тяжести, расправленными антеннами и т.д. Поэтому было принято следующее формальное описание процесса стабилизации

$$\frac{d\alpha}{dt} = -k_\psi \rho V r_a \sin(\alpha) \quad (12)$$

где k_ψ – коэффициент пропорциональности. Изменение угла α не турбулентностью учитывалось переходом вращения тела на другую орбиту Джеффри.

Результаты. Результаты расчетов на модели при различных свойствах погружающихся тел и уровнях турбулентности представлены в табл. 1 (особи не способны к возврату в вертикальное положение) и 2 (способны к возврату). Здесь, L_z , d_z , и ρ_z – длина, ширина и плотность тела; v_0 – скорость погружения в среде без турбулентности; $C_{ret} = k_\psi \rho V r_a$ – максимальная скорость возврата в вертикальное положение ($\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$); а в таблицах даны отношения скоростей погружения с турбулентностью и без нее (v_T/v_0). Параметры особей в основном соответствуют свойствам *Acartia clausi*, постоянно присутствующей в пробах зоопланктона отобранных в севастопольских бухтах. Коэффициент k_ψ рассчитывался из условия, что особь длиной 1.3 мм, шириной 0.35 мм и плотностью 1.045 г см^{-3} , находящаяся первоначально в горизонтальном положении возвращается в вертикальное за 100 с. В отсутствие турбулентности погружение стабилизируется после 5-10 см пути [10]. В нашем случае, полная стабилизация наступает после 15 см погружения, так что реально значения v_T/v_0 , приведенные в табл. 2, будут еще выше.

Степень влияния турбулентности на скорость погружения определяют два фактора: длина погружающихся особей и их скорость погружения. Первых фактор ограничивает масштаб турбулентных вихрей, способных оказать воздействие на ориента-

цию особи. Второй – увеличивает время взаимодействия турбулентного вихря с телом. Результаты, приведенные в табл. 1, являются прекрасной иллюстрацией вышесказанного.

Таблица 1 – Влияние турбулентности на скорость погружения тел, не способных к возврату в вертикальное положение

L_z , мм	1.30	1.30	1.30	0.40	0.80	1.30	1.30	1.30	1.30
d_z , мм	0.35	0.35	0.35	0.11	0.22	0.35	0.65	0.35	0.217
ρ_z , г см ⁻³	1.030	1.045	1.060	1.045	1.045	1.045	1.045	1.045	1.045
v_{0z} , см с ⁻¹	0.087	0.154	0.223	0.015	0.058	0.154	0.286	0.154	0.095
ε , м ² с ⁻³									
1.00E-09	0.98	1.00	1.00	0.74	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00E-08	0.80	0.95	0.99	0.74	0.79	0.94	0.99	0.95	0.89
1.00E-07	0.73	0.79	0.84	0.70	0.74	0.78	0.87	0.79	0.75
1.00E-06	0.71	0.74	0.76	0.72	0.72	0.75	0.83	0.75	0.72
1.00E-05	0.72	0.72	0.74	0.72	0.72	0.73	0.79	0.71	0.71
1.00E-04	0.72	0.73	0.73	0.72	0.71	0.75	0.83	0.72	0.71

Способность особей к стабилизации ориентации тела при погружении в вертикальном положении значительно снижает влияние турбулентности (табл.2). Это и не удивительно, так в данном случае уменьшается количество турбулентных вихрей способных преодолеть тенденцию возврата в вер-

тикальное положение. Кроме того, крупные особи достаточно редко встречаются с возмущениями, меняющими их ориентацию, и поэтому способность возврата в вертикальное положение ускоряет их скорость погружения.

Таблица 2 - Влияние турбулентности на скорость погружения тел, способных к возврату в вертикальное положение

L_z , мм	1.30	1.30	1.30	0.40	0.80	1.30	1.30	1.30	1.30
d_z , мм	0.35	0.35	0.35	0.11	0.22	0.35	0.65	0.35	0.217
ρ_z , г см ⁻³	1.030	1.045	1.060	1.045	1.045	1.045	1.045	1.045	1.045
C_{ret}	0.0480	0.0485	0.0494	0.0014	0.0113	0.0485	0.0901	0.0485	0.0301
v_{0z} , см с ⁻¹	0.087	0.154	0.223	0.015	0.058	0.154	0.286	0.154	0.095
ε , м ² с ⁻³									
1.00E-09	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00E-08	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00E-07	1.00	1.00	1.00	0.94	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00E-06	0.99	0.99	0.99	0.85	0.97	0.99	1.00	0.99	0.99
1.00E-05	0.98	0.98	0.99	0.78	0.93	0.98	1.00	0.98	0.96
1.00E-04	0.99	0.99	0.99	0.75	0.89	0.98	1.00	0.98	0.97

В основном работа выполнялась для ответа на один вопрос: «Необходимо ли учитывать турбулентность при оценке скорости погружения некрозоопланктона?». Для моментов отбора проб в севастопольских бухтах можно принять, что $\varepsilon < (1-5) \cdot 10^{-7}$ м² с⁻³ [14]. С учетом способности копепод к возврату в вертикальное положение, при уровне турбулентности соответствующем приведенному диапазону скоростей дисси-

пации кинетической энергии турбулентности, ее влияние не превышает 10%. Поэтому можно с уверенностью сравнивать данные, полученные в достаточно широком диапазоне погодных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.А. Кастальская – Карзинкина. Методика определения живых и отмерших

компонентов планктона на фиксированном материале // Труды лимнологич. станции в Косине. – 1935. – № 19. – С. 91–100.

2. В.А. Водяницкий. О проблеме биологической продуктивности водоемов и в частности Черного моря // Тр. Севастоп. биол. ст. АН СССР. – 1954. – № 8. – С. 347–424.

3. Л.М. Зелезинская. О количественных показателях смертности черноморского планктона на мелководье // Зоологич. журн. – 1966. – Т. 45, № 8. – С. 1251–1253.

4. И. А. Киселев. Планктон морей и континентальных вод. – М.: Наука, 1969. – Т. I. – 430 с.

5. Т.С. Петипа, Е.В. Павлова, Г.Н. Миронов. Структура пищевых сетей, передача и использование вещества и энергии в планктонных сообществах Черного моря // Биология моря. – Киев: Наукова думка, 1970. – Вып. 19. – С.3–43.

6. Э. А. Шушкина, Ю.И. Сорокин, Л.П.Лебедева и др. Продукционно - деструкционные характеристики планктонного сообщества в северо-восточной части Черного моря в течении сезона 1978 г. // Сезонные изменения черноморского планктона. – М.:Наука, 1983. – С. 178–202.

7. Л.Г. Коваль. Зоо- и некрозоопланктон Черного моря. – Киев.: Наук. думка – 1984. – 127 с.

8. Т.С. Петипа, Павлова Е.В. Смертность зоопланктона в Севастопольской бухте // Доповіді Національної Академії наук України. – 1995. – №. 6. – С. 146 – 148.

9. О.П. Дубовская, М.И. Гладышев, В.Г. Губанов. Сезонная динамика численности живых и мертвых особей зоопланктона в небольшом пруду и некоторые варианты оценки смертности // Журн. Общей биологии. – 1999. – Т. 60, № 5. – С. 543–565.

10. В.Н. Степанов, Л.С. Светличный. Исследования гидромеханических характеристик планктонных копепод. – Киев: Наукова думка, 1981. – 126 с.

11. J.R.N. Lasier, K.H.Mann. Turbulence and the diffusive layers around small organisms // Deep – Sea Res. – 1989. – 36, N 11. – С. 1721 – 1733.

12. M. Pahlow, U.Riebesell, D.A.Wolf-Gladrow. Impact of cell shape and chain formation on nutrient acquisition by marine diatoms // Limnol. Oceanogr. – 1997. – 42, N 8. – С. 1660 –1672.

13. J. Shimeta, P.A.Jumars, E.J.Lessard. Influences of turbulence on suspension feeding by planktonic protozoa; experiments in laminar shear fields // Limnol. Oceanogr. – 1995. – 40, N 5. – С. 845 – 859.

14. А.С. Монин, Р.В. Озмидов. Океанская турбулентность. – Л.: Гидрометеиздат, 1981.– 320 с.