

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ПЛАНКТОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ
МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ПРОЦЕСС ПОТРЕБЛЕНИЯ
БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФИТОПЛАНКТНОМ И ИНТЕНСИВНОСТЬ
ВЫЕДАНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА И ДЕТРИТА ЗООПЛАНКТНОМ**

Подгорный К.А., Дмитриева О.А.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Калининград, Россия
kapborok@mail.ru

Аннотация: в данной работе рассмотрены некоторые подходы к моделированию влияния мелкомасштабного турбулентного обмена в водной среде на скорости биогидрохимических процессов потребления биогенных элементов фитопланктоном и интенсивность потребления фитопланктона и планктонного детрита зоопланктонными организмами.

В процессах функционирования водных экосистем важную роль играют процессы турбулентного обмена (ТО). Мелкомасштабная турбулентность существенным образом влияет на скорости биогидрохимических процессов и в частности – на процесс потребления биогенных элементов клетками фитопланктона, интенсивность выедания фитопланктона и детрита зоопланктоном.

Рассматривается планктонная пищевая цепь, в которой описывается временная динамика концентраций биогенных элементов (N), n размерных классов (групп) (РК или РГ) фитопланктона ($P_i, i = \overline{1, n}$), m РГ зоопланктона ($Z_j, j = \overline{1, m}$) и планктонного детрита (D). Биогенные элементы расходуются на рост каждого из n рассматриваемых РК фитопланктона, что при модельном описании может быть задано суммой

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{N}{e_i(V_i^p) + N} \cdot \phi(P_i, V_i^p, T_w, I_w) \right). \quad (1)$$

В каждом слагаемом (1) множитель $N/(e_i(V_i^p) + N)$ задает биогенное лимитирование роста, а множитель $\phi(P_i, V_i^p, T_w, I_w)$ учитывает текущие концентрации P_i фитопланктона в каждом РК, объемы V_i^p клеток i -ой РГ фитопланктона ($i = \overline{1, n}$), а также задает лимитирование роста фитопланктона, которое обусловлено изменением температурных и световых условий в воде. В формуле (1) $e_i(V_i^p)$ – константа полунасыщения для i -го РК фитопланктона.

Если $N \gg e_i(V_i^p)$ ($i = \overline{1, n}$), то при прочих равных условиях скорость V_i потребления биогенных веществ (БВ) будет стремиться к V_i^{max} – максимальной скорости роста для i -го РК фитопланктона. Величины V_i^{max} не зависят от интенсивности ТО в водной среде, поскольку их значения определяются физиологическими свойствами клеток фитопланктона (Armstrong, 2008; Fiksen et al., 2014; Lindemann et al., 2016). При достаточно высоких концентрациях N в водной среде скорость их потребления клетками фитопланктона будет ограничиваться скоростью трансмембранного переноса соответствующими ферментными системами, а не интенсивностью потока биогенных элементов по направлению к клетке. Поэтому в такой ситуации ТО не оказывает влияния на величину V_i .

Если $N \ll e_i(V_i^p)$ ($i = \overline{1, n}$), то при прочих равных условиях $V_i \approx V_i^{max} N / e_i(V_i^p) = \alpha_i N$, где $\alpha_i = V_i^{max} / e_i(V_i^p)$ – сродство по ресурсу (resource affinity) для каждого из n РК фитопланктона. Таким образом, при относительно низком содержании БВ в водной среде

скорость их потребления клетками фитопланктона растет пропорционально возрастанию концентрации N с коэффициентом пропорциональности, равным α_i – сродству по ресурсу ($i = \overline{1, n}$). В этом случае для всех (кроме самых мелких) клеток фитопланктона скорость потребления ими БВ будет зависеть от интенсивности диффузионного потока питательных веществ из водной среды по направлению к клетке. Интенсивность мелкомасштабной турбулентности увеличивает этот диффузионный поток и, соответственно, происходит увеличение сродства по ресурсу α_i ($i = \overline{1, n}$). Поскольку величины V_i^{max} не зависят от интенсивности ТО в водной среде, то возрастание α_i может иметь место только при уменьшении соответствующих значений констант полунасыщения $e_i(V_i^p)$ для i -го РК фитопланктона.

Для параметризации влияния мелкомасштабной турбулентности на интенсивность потребления БВ фитопланктоном вместо констант полунасыщения $e_i(V_i^p)$ для i -го РК фитопланктона будем рассматривать скорректированные – «турбулентные» константы полунасыщения $e_i^T(V_i^p)$ (Barton et al., 2014):

$$e_i^T(V_i^p) = e_i(V_i^p) / Sh_i, \quad (i = \overline{1, n}), \quad (2)$$

где Sh_i – безразмерное число Шервуда для i -го РК фитопланктона, которое представляет собой отношение полного потока БВ, достигающих поверхности клетки i -го РК в подвижной водной среде, к потоку вещества, обусловленного только процессом молекулярного диффузионного переноса. В соответствии с формулой (2), при увеличении интенсивности турбулентного обмена в водной среде будет возрастать число Sh_i и, соответственно, уменьшаться константа полунасыщения, что, в свою очередь, при прочих равных условиях будет приводить к возрастанию сродства по ресурсу α_i для каждого из n РК фитопланктона.

Скорость изменения концентрации зоопланктона определяется процессами его роста за счет питания фитопланктонными организмами разных РК и планктонным детритом. Она рассчитывается в зависимости от максимальной скорости роста j -го РК зоопланктона $\lambda_j(V_j^z)$ ($j = \overline{1, m}$) и константы полунасыщения $\mu_j(V_j^z)$. Для параметризации влияния ТО на интенсивность потребления фитопланктона и планктонного детрита зоопланктонными организмами вместо констант полунасыщения $\mu_j(V_j^z)$ для каждого из РК зоопланктона следует рассматривать скорректированные – «турбулентные» константы полунасыщения $\mu_j^T(V_j^z)$:

$$\mu_j^T(V_j^z) = \mu_j(V_j^z) / \xi_j, \quad (j = \overline{1, m}). \quad (3)$$

В формуле (3) ξ_j – безразмерный параметр, который представляет собой отношение объема освещенной в единицу времени воды при питании зоопланктона j -го РК в условиях турбулентного перемешивания к объему освещенной за тот же период времени воды при питании зоопланктона в условиях отсутствия турбулентного перемешивания.

Литература

- Armstrong R.A. Nutrient uptake rate as a function of cell size and surface transporter density: A Michaelis-like approximation to the model of Pasciak and Gavis // Deep-Sea Res. I. 2008. V. 55. P. 1311–1317.
- Fiksen Ø., Follows M.J., Aksnes D.L. Trait-based models of nutrient uptake in microbes extend the Michaelis-Menten framework // Limnol. Oceanogr. 2013. V. 58. P. 193–202.
- Lindemann C., Fiksen Ø., Andersen K.H., Aksnes D.L. Scaling laws in phytoplankton nutrient uptake affinity // Frontiers in Marine Science. 2016. V. 3. P. 1–6.
- Barton A.D., Ward B.A., Williams R.G., Follows M.J. The impact of fine-scale turbulence on phytoplankton community structure // Limnol. Oceanogr.: Fluids and Environments. 2014. V. 4. P. 34–49.