

## ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ПЛАНКТОНА: ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ, ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Медвинский А.Б.<sup>1</sup>, Адамович Б.В.<sup>2</sup>, Алиев Р.Р.<sup>1</sup>, Лукьянова Е.В.<sup>2</sup>, Михеева Т.М.<sup>2</sup>,  
Никитина Л.В.<sup>2</sup>, Нуриева Н.И.<sup>1</sup>, Русаков А.В.<sup>1</sup>, Жукова Т.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино, Россия*  
[emedvinsky@iteb.ru](mailto:emedvinsky@iteb.ru)

<sup>2</sup>*Биологический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Белоруссия*  
[belaqalab@gmail.com](mailto:belaqalab@gmail.com)

<sup>3</sup>*Нарочанская биологическая станция, Белорусский государственный университет, Нарочь, Белоруссия*  
[tvzhukova@tut.by](mailto:tvzhukova@tut.by)

**Аннотация:** продемонстрирована хаотическая природа колебаний обилия бактериального планктона в Нарочанских озёрах. Показано, что эти колебания синхронизованы с колебаниями температуры. Показано, что хаотические колебания обилия фитопланктона в оз. Нарочь и оз. Мястро не синхронизованы с температурой, в отличие от колебаний обилия фитопланктона в оз. Баторино. Обсуждаются механизмы, обуславливающие наличие или отсутствие синхронизации.

### 1. Введение

Предсказание состояния динамической системы предполагает оценку характера динамики этой системы в будущем на основании анализа временного ряда, полученного в результате проведенных ранее измерений или в ходе математического моделирования. Для того, чтобы такое предсказание было возможным, временной ряд должен характеризоваться некоторой повторяемостью (рекуррентностью).

С применением численного рекуррентного анализа (Marwan et al., 2007) было показано, что динамика популяций фитопланктона Нарочанских озёр является хаотической и такой характер этой динамики обуславливается межвидовыми взаимодействиями между популяциями, принадлежащими к разным трофическим уровням (Medvinsky et al., 2015). Этот факт не означает, однако, что внешняя среда не оказывает воздействие на динамику планктона. Действительно, любая популяция подвержена влиянию не только трофических взаимодействий внутри сообщества, к которому эта популяция принадлежит, но также – влиянию факторов внешней среды, в первую очередь – температуры (Royama, 1992). Возникает вопрос: каков относительный вклад межвидовых трофических взаимодействий и факторов внешней среды в характер и предсказуемость популяционной динамики? Современные методы анализа временных рядов позволяют приблизиться к ответу на этот вопрос. В данной работе мы представляем результаты анализа динамики популяций бактериопланктона и фитопланктона Нарочанских озёр. Описания применявшихся в работе методов исследования даны в работах (Kuramoto, 1984; Mormann et al., 2000; Medvinsky et al., 2015).

### 2. Результаты и выводы

С применением численного рекуррентного анализа (Marwan et al., 2007) нами показано, что динамика бактериопланктона в каждом из Нарочанских озёр носит хаотический характер. Оценки горизонта предсказуемости (Кравцов, 1997) бактериопланктонной динамики дали следующие результаты: 4.8 мес. для малого плёса оз. Нарочь, 4.6 мес. для большого плёса оз. Нарочь, 4.7 мес. для оз. Мястро и 3.4 мес. для оз. Баторино. Численные значения горизонта предсказуемости хаотической динамики фитопланктонных популяций Нарочанских озёр приведены в работе (Medvinsky et al., 2015).

Хаотичность флуктуаций популяционного обилия может быть как имманентным свойством популяционной динамики, так и результатом внешних влияний. Для того, чтобы оценить роль среды обитания на динамику планктона, мы провели численные оценки величины  $PLI$  (Kuramoto, 1984), индекса, характеризующего степень синхронизации динамики планктона и колебаний температуры воды в Нарочанских озёрах.

В результате показано, что хаотические бактериопланктонные осцилляции синхронизованы с колебаниями температуры ( $PLI = 0.57$  для малого плёса оз. Нарочь, оз. Мястро и оз. Баторино и  $PLI = 0.41$  для большого плёса оз. Нарочь; отметим, что эти значения  $PLI$  лежат вне распределений  $PLI$  для соответствующих суррогатных временных рядов, а следовательно, бактериопланктонные осцилляции действительно в некоторой степени, задаваемой величиной  $PLI$ , синхронизованы по фазе с колебаниями температуры). В то же время, хаотические (Medvinsky et al., 2015) колебания биомассы фитопланктона в оз. Нарочь и оз. Мястро, как оказалось, не синхронизируются с колебаниями температуры – в отличие от хаотических фитопланктонных осцилляций в оз. Баторино.

Предложены механизмы ответственные за фазовую синхронизацию колебаний температуры и обилия планктона: (а) влияние трофических взаимодействий фитопланктон-зоопланктон и бактериопланктон-зоопланктон, зависящих от уровня трофности водоёма, а также (б) влияние (измеренных ранее в ходе многолетнего мониторинга) отношений концентраций азота и фосфора в Нарочанских озёрах.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант №17-04-00048).*

## Литература

- Кравцов Ю.А. Фундаментальные и практические пределы предсказуемости // Пределы предсказуемости. Ред. Кравцов Ю.А. М.: ЦентрКом, 1997. С. 170-200.
- Kuramoto Y. Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence. Berlin: Springer, 1984. 156p.
- Marwan N., Romano M.C., Thiel M., Kurths J. Recurrence plots for the analysis of complex systems // Phys. Rep. 2007. V. 438. P.237-329.
- Medvinsky A.B., Adamovich B.V., Chakraborty A., Lukyanova E.V., Mikheyeva T.M., Nurieva N.I., Radchikova N.P., Rusakov A.V., Zhukova T.V. Chaos far away from the edge of chaos: A recurrence quantification analysis of plankton time series // Ecol. Compl. 2015. V. 23. P. 61-67.
- Mormann F., Lehnertz K., David P., Elger C.E. Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients // Physics D. 2000. V. 144. P. 358-369.
- Royama T. Analytical Population Dynamics. London: Chapman & Hall, 1992. 371p.