

## Оценка экологической степени риска в изменении содержания незаменимых полиненасыщенных жирных кислот в планктоне озер при глобальном потеплении климата

В. П. СЕМЕНЧЕНКО

Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам  
220072, Беларусь, Минск, ул. Академическая, 27  
E-mail: zoo231@biobel.bas-net.by

### АННОТАЦИЯ

Проведена оценка экологической степени риска в изменении содержания незаменимых полиненасыщенных жирных кислот в планктоне мелководных озер при глобальном потеплении климата. Анализируемыми угрозами в оценке риска кроме температуры были содержание растворенного азота и фосфора, структура фито- и зоопланктона. Основные риски связаны не столько с непосредственным влиянием глобального увеличения температуры, сколько с опосредованными эффектами потепления. На основании проведенного анализа сделан вывод, что критическим звеном в оценке риска является видовая структура фитопланктона, в частности удельная роль синезеленых водорослей.

**Ключевые слова:** оценка риска, полиненасыщенные жирные кислоты, климат, планктон.

Глобальное потепление климата, которое наблюдается в последние десятилетия, затрагивает различные процессы, протекающие в планктонных сообществах озер. По данным экспертов NASA, уже в настоящее время поверхностная температура в озерах увеличивается на 0,45 °C за десять лет, а в некоторых – на 1,0 °C. Из этих расчетов следует, что в ближайшие 10–15 лет в озерах умеренной зоны поверхностная температура может достигнуть 25–26 °C. Согласно данным McCarthy et al. [1], даже небольшое увеличение температуры может негативно влиять на озерные экосистемы. Так, увеличение поверхностной температуры в оз. Байкал на 1,21 °C (начиная с 1946 г.) уже привело к существенным перестройкам в планктонном сообществе и трофических цепях озера [2].

В последнее десятилетие ряд исследований свидетельствует об изменении содержания незаменимых компонентов питания консументов, включая человека, а именно полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) в биоте озер при потеплении климата [3–5]. В связи с этим возникает вопрос об оценке экологического риска в содержании незаменимых ПНЖК в планктоне озер и их дальнейшего переноса по трофической цепи. Данная оценка крайне важна и для здоровья человека, получающего незаменимые ПНЖК с пищей через водные и наземные трофические цепи [6].

При экологической оценке степени риска определяется вероятность того, что неблагоприятные экологические эффекты могут произойти или происходят в результате воздействия одного или нескольких исследуемых факторов. Подходы к экологической оценке степени риска заключаются в получении как

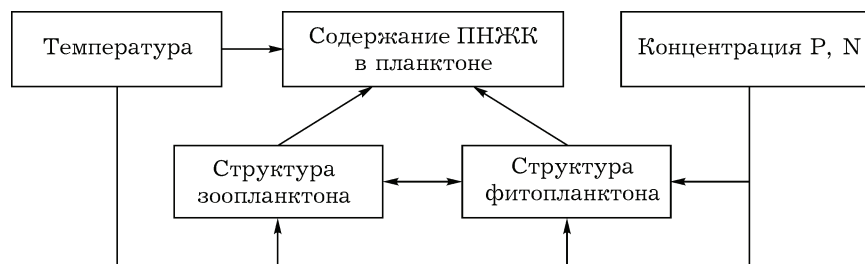


Рис. 1. Общая схема влияния факторов среды на уровень содержания ПНЖК в планктоне озер

количественных, так и качественных оценок. При отсутствии возможности количественного определения рисков качественная оценка представляется лучшим вариантом, чем ее игнорирование [7]. Важными моментами в анализе степени риска являются также разделение общего риска на отдельные составляющие и оценка возможных взаимодействий между ними [8].

**Идентификация угроз.** Мелководные озера и водохранилища в наибольшей степени подвержены влиянию глобального изменения температуры и последующей реакции отдельных сообществ в трофической цепи [9]

Синтез ПНЖК первичными продуцентами – микроводорослями и их перенос по трофическим цепям водоемов определяют общую схему оценки экологического риска, которая может быть представлена следующим образом (рис. 1). Температура как фактор среды выступает в качестве независимой переменной, биогенные элементы (концентрации растворенных форм азота и фосфора), структура фито- и зоопланктона выступают как зависимые переменные от температуры. Кроме того, уровень биогенных элементов контролирует развитие фитопланктона, а структура зоопланктона является зависимой переменной от структуры фитопланктона.

Таким образом, при экологической оценке степени риска необходимо учитывать не только прямое воздействие температуры, но и косвенные эффекты, которые могут иметь каскадный характер.

Рассмотрим возможные угрозы для оценки экологического риска снижения концентраций ПНЖК в планктоне озер при повышении температуры.

**Прямое влияние температуры на содержание ПНЖК.** Одним из основных факторов

среды, определяющих синтез ПНЖК микроводорослями и их накопление зоопланктоном, является температура воды. Предполагается, что вероятное потепление климата может привести к снижению продукции ПНЖК в водных экосистемах [4].

Проведенные нами исследования содержания ПНЖК в планктоне озер с различным температурным режимом показали, что существует связь между температурой воды и содержанием незаменимых полиненасыщенных кислот в зоопланктоне (рис. 2). При увеличении температуры на 3 °С содержание незаменимых ПНЖК в зоопланктоне озер уменьшается приблизительно в 3 раза. Такое значительное снижение вызвано не только увеличением температуры, но, как будет показано ниже, и изменением структуры зоопланктона.

**Влияние биогенных элементов на содержание ПНЖК** происходит не прямым, а косвенным образом, через фитопланктон. Содержание растворенных форм азота и фосфора в водной толще контролирует развитие видов фитопланктона – основных источников эйкозапентаеновой (ЭПК) и докозагексаеновой (ДГК) кислот. Исследования, выполнен-

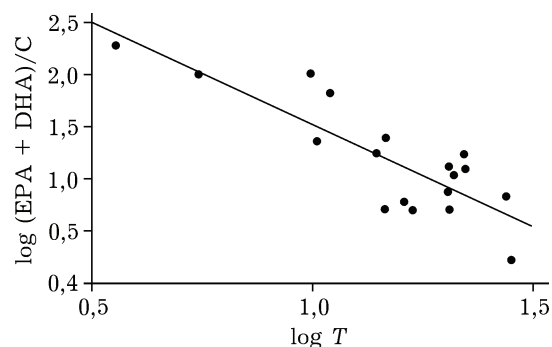


Рис. 2. Связь между содержанием незаменимых полиненасыщенных жирных кислот в зоопланктоне с температурой воды в озерах [11]

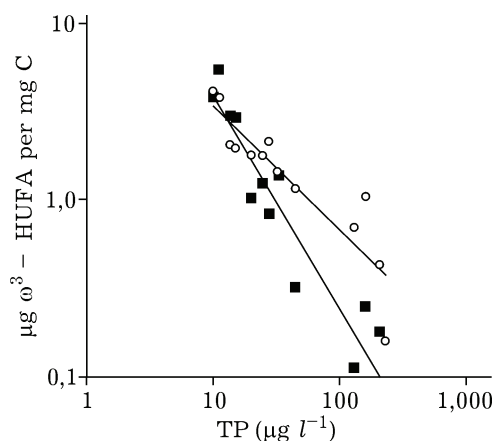


Рис. 3. Связь между содержанием полиненасыщенных жирных кислот с количеством общего фосфора в сестоне озер [12]

ные на различных озерах, показали, что увеличение температуры приводит к возрастанию концентрации растворенного фосфора [10–12], что должно отражаться на структуре фитопланктонного сообщества.

Muller-Navarra et al. [13] показали, что содержание ЭПК и ДГК в сестоне резко уменьшается с увеличением концентрации общего фосфора в озерах, т. е. с уровнем трофности озера (рис. 3). Кроме того, по данным авторов, получена сильная связь между содержанием ЭПК и ДГК и видовым составом фитопланктона. В частности, при доминировании синезеленых водорослей происходило значительное снижение содержания ЭПК и ДГК в сестоне.

Таким образом, при возрастании температуры в озерах происходит увеличение концентраций растворенных азота и фосфора, что, в свою очередь, ведет к изменению трофического статуса водоемов и снижению ПНЖК в сестоне. Данный процесс может значительно ускориться с увеличением антропогенной нагрузки на водоемы.

**Влияние структуры фитопланктона на содержание ПНЖК.** Возможны два сценария изменения структуры фитопланктона при возрастании температуры.

Типичным примером является массовое развитие синезеленых водорослей при высоких летних температурах, особенно в мелководных озерах и водохранилищах. Для большинства пресноводных синезеленых водорослей температурный оптимум составля-

ет 28–30 °С. Например, оптимальная температура для роста и фотосинтеза широко распространенного вида *Microcystis aeruginosa* (Kutzing) в оз. Мендота была 25 °С [14], а в эвтрофном мелководном оз. Фуруике (Япония) – от 24,7 до 33,9 °С [15]. Такие высокие летние температуры все чаще наблюдаются в мелководных озерах и водохранилищах умеренных широт. Кроме того, в экспериментах, проведенных в замкнутых объемах, установлено, что цветение воды, вызванное *Microcystis*, приводило к резкому повышению скорости извлечения растворенного фосфора из донных отложений [16].

Многолетние исследования, проведенные на мелководном оз. Лукомльском – водоем-охладителе тепловой электростанции – демонстрируют закономерное увеличение биомассы фитопланктона в основном за счет пиррофитовых и синезеленых водорослей при увеличении концентраций растворенных фосфатов [17]. При этом максимальные значения концентраций растворенных фосфатов и азота, как и биомассы синезеленых водорослей, наблюдались в годы с жарким сухим летом.

Возможен и иной сценарий развития фитопланктона при повышении температуры. Так, в экспериментах с мезокосмами, несмотря на увеличение содержания растворенных фосфатов, происходило снижение биомассы фитопланктона за счет развития макрофитов [10].

Проведенные нами многолетние исследования на глубоководном оз. Дрисвяты – водоем-охладителе Игналинской АЭС – показали, что подогрев воды вызвал массовое развитие погруженных макрофитов, главным образом рдестов, и увеличение прозрачности воды.

Реализация того или иного сценария развития фитопланктона при увеличении температуры воды, видимо, будет определяться скоростью поступления биогенных элементов из донных отложений и водосбора, а также глубиной водоема.

Таким образом, если принять, что возрастание температуры приводит к увеличению концентрации растворенных фосфора и азота, то это будет способствовать развитию синезеленых водорослей. Данный сценарий наиболее вероятен для мелководных озер и

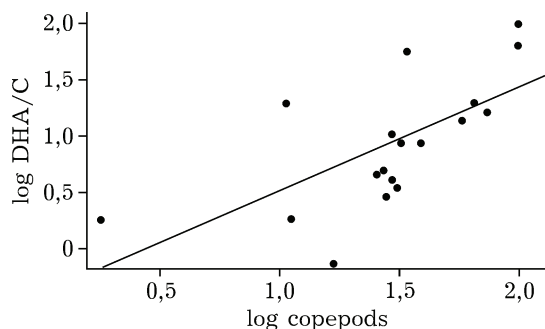


Рис. 4. Зависимость десятичного логарифма концентрации ДГК в биомассе зоопланктона в расчете на единицу массы органического углерода (ДГК/С,  $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$ ) от доли копепод в биомассе планктонного сообщества (%) в озерах [11]

водохранилищ, поэтому следует ожидать снижения содержания ЭПК и ДГК в фитопланктоне, так как синезеленые водоросли не содержат жирных кислот с углеродными цепями более 18 атомов [18].

**Влияние структуры зоопланктона на содержание ПНЖК.** Изменение в структуре зоопланктона пресных вод в связи с содержанием ПНЖК связано в основном с соотношением биомассы кладоцер и копепод, так как по данным ряда авторов содержание ПНЖК в телах копепод выше, чем в телах кладоцер, в особенности докозагексаеновой кислоты [18, 19]. По нашим данным, изменение содержания ДГК в sestone озер положительно связано с увеличением доли копепод в биомассе зоопланктона (рис. 4) [5].

Имеется ряд данных, показывающих увеличение доли Cladocera и снижение – Copepoda при увеличении температуры [2, 3, 19]. В оз. Lago Maggiore в период его мезотрофного состояния удельная роль копепод в зоопланктоне снизилась на 10 % при повышении летней температуры на 10 °С [21].

Нами проведены исследования видового состава и численности рачкового зоопланктона в летний период (июль) в 22 озерах Беларуси, которые характеризовались различным уровнем трофности. Установлено, что наблюдается достоверная ( $P < 0,05$ ) отрицательная корреляция между соотношением численности кладоцер и копепод и прозрачностью воды в озерах (рис. 5).

При увеличении температуры в составе зоопланктона озер преимущество в развитии получают мелкие виды ракообразных, кото-

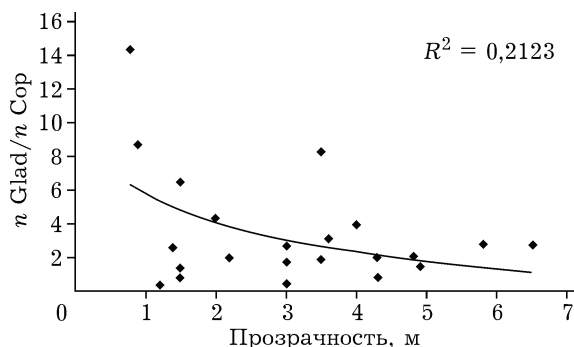


Рис. 5. Изменение соотношения между численностью кладоцер и копепод с прозрачностью воды в летний период (июль) в озерах ( $n = 22$ ) разного трофического статуса

рые не могут эффективно контролировать развитие фитопланктона, в результате чего возникает каскадный эффект в цепи фитопланктон – зоопланктон – рыбы [22]. Проведенный нами анализ данных по зоопланктону озер различного трофического статуса показал, что существует достоверная ( $P < 0,05$ ) отрицательная корреляция удельной численности мелких видов кладоцер (*Bosmina longirostris* (O. F. Müller, 1785), *Ceriodaphnia reticulata* Jurine, 1820, *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller 1785)) с увеличением прозрачности воды в озерах (рис. 6).

Таким образом, изменение как видовой, так и размерной структуры зоопланктона при возрастании температуры и параллельном эвтрофировании озер может приводить к снижению ПНЖК.

Следующим шагом при оценке степени риска был сравнительный качественный анализ мощности воздействия факторов на со-

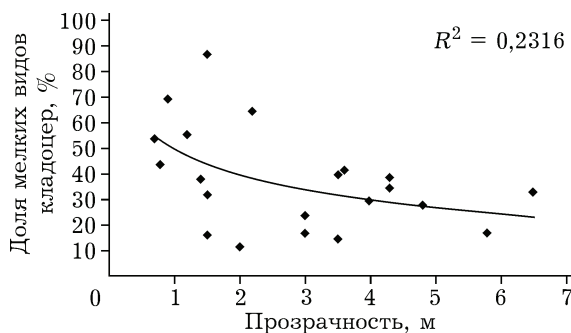


Рис. 6. Изменение удельной численности мелких видов кладоцер (доля от Cladocera + Copepoda, %) с прозрачностью воды в летний период (июль) в озерах ( $n = 22$ ) разного трофического статуса

держание ПНЖК, т. е. их ранжирование. Как уже указывалось, существует опосредованное влияние температуры на величину риска. В связи с этим качественная оценка мощности производилась с учетом того, насколько анализируемый фактор связан с другими переменными.

Как следует из рис. 1 и приведенных выше данных, при повышении температуры две переменные – структура фито- и зоопланктона являются критическими угрозами. Однако структура зоопланктона связана с такой фитофланктона. Отсюда следует, что состав фитофланктонного сообщества, в частности удельная роль синезеленых водорослей, является основным фактором, воздействующим на содержание ПНЖК в sestone мелководных озер и водохранилищ. Величина риска должна также увеличиваться в сукцессионном ряду озер вследствие изменения состава фито- и зоопланктонного сообщества.

Как отмечает Jeppesen [9], основные риски для озер, вызванные глобальным потеплением, связаны с возможным массовым развитием синезеленых водорослей. Эти риски связаны и с антропогенным поступлением биогенных элементов в экосистемы озер.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ возможных рисков снижения содержания незаменимых полиненасыщенных жирных кислот в планктоне озер и последующего экспорта в наземные экосистемы показывает, что они связаны не столько с прямым глобальным увеличением температуры, сколько с опосредованными эффектами этого увеличения. Поскольку наряду с глобальным увеличением температуры происходит антропогенное эвтрофирование озер, эти риски могут значительно возрасти, особенно для мелководных озер и водохранилищ. В связи с этим необходима разработка системы оценки рисков для управления водными экосистемами в условиях глобального потепления, которая должна включать оценку риска эвтрофирования за счет внешней и внутренней биогенной нагрузки.

Работа поддержана проектом № 65 Сибирского отделения Российской академии наук и проектом № Б09СО-008 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Schneider P., Hook S. J. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985 // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37, N 24. P. L22405.
2. McCarthy J. J., Canziani O. F., Leary N. A., Dokken D. J., White K. S. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, IPCC. Cambridge University Press, UK, 2001.
3. Moore M. V., Hampton S. E., Izmet's'eva L. R., Silov E. A., Peshkova E. V., Pavlov B. K. *Climate Change and the World's Sacred Sea – Lake Baikal, Siberia* // *BioScience*. 2009. Vol. 59. P. 405–417.
4. Maazouzi C., Masson G., Izquierdo M. S., Pihan G. C. Midsummer heat wave effects on lacustrine plankton: Variation of assemblage structure and fatty acid composition // *J. Thermal Biology*. 2008. Vol. 33, N 5. P. 287–296.
5. Gladyshev M. I., Arts M. T., Sushchik N. N. Preliminary estimates of the export of omega-3 highly unsaturated fatty acids (EPA + DHA) from aquatic to terrestrial ecosystems // *Lipids in aquatic ecosystems*. New York: Springer, 2009. P. 179–209.
6. Gladyshev M. I., Semchenko V. P., Dubovskaya O. P., Fefilova E. B., Makhutova O. N., Buseva Zh. F., Sushchik N. N., Baturina M. A., Razlutskiy V. I., Lepskaya E. V., Kalacheva G. S. Effect of Water Temperature on the Content of Essential Polyunsaturated Fatty Acids in Freshwater Zooplankton // *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2011. Vol. 437. P. 57–59.
7. Arts M., Ackman R. G., Holub B. J. Essential fatty acids in aquatic ecosystems: a crucial link between diet and human health and evolution // *Can. J. Fish. Aqu.* 2001. Vol. 58. P. 122–137.
8. Anonymous. *Guidelines for Ecological Risk Assessment* // Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1998. Risk Assessment Forum, EPA/630/R095/002F
9. Shlyakhter A., Valverde L. G., Wilson A. Jr. R. Integrated risk analysis of global climate change // *Chemosphere*. 1995. Vol. 30, N 8. P. 1585–1618.
10. Jeppesen E. Eutrophication and global warming – the key environmental issues for small lakes and ponds in the next 25 years // *Environmental Future of Aquatic Ecosystems*. Switzerland: ETH Zurich, 2003.
11. Feuchtmayr H., Moran R., Hatton K., Connor L., Heyes T., Moss B., Harvey I., Atkinson D. Global warming and eutrophication: effects on water chemistry and autotrophic communities in experimental hypertrophic shallow lake mesocosms // *J. Applied Ecology*. 2009. Vol. 46. P. 713–723.
12. Matzinger A., Schmid M., Veljanoska-Sarafiloska E., Patceva S., Guseska D., Wagner B., Muller B., Sturm M., Wuest A. Eutrophication of ancient Lake Ohrid: Global warming amplifies detrimental effects of increased nutrient inputs // *Limnol. Oceanogr.* 2007. Vol. 52, N 1. P. 338–353.
13. Muller-Navarra D. C., Brett M. T., Park S., Chandra S., Ballantyne A. P., Zorita E. & Goldman C. R. Unsaturated fatty acid content in seston and tropho-dynamic coupling in lakes // *Nature*. 2004. Vol. 427. P. 69–72.
14. Ecker M. D., Janssen A. *Statistical Analysis of Water Quality Data from Lake Casey and Silver Lake / UNI Summer Lakes Study Report*, 2000. P. 1–6.

15. Konopka A., Brock T. D. Effect of Temperature on Blue-Green Algae (Cyanobacteria) in Lake Mendota // *Applied and Environmental Microbiology*. 1978. Vol. 36, N 4. P. 572–576.
16. Hiroyuki I., Kwang-Hyeon C., Maiko K., Shin-Ichi N. Temperature-dependent dominance of *Microcystis* (Cyanophyceae) species: *M. aeruginosa* and *M. wesenbergii* // *J. Plank. Res.* 2009. Vol. 31, N 2. P. 171–178.
17. Митрахович П. А., Самойленко В. М., Караташевич З. К., Свирид А. А., Козлов Е. А., Королев Г. Н., Папко Н. А. Экосистема водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС // *Право и экономика*. Минск, 2008. 144 с.
18. Xie L. Q., Xie P., Tang H. J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms – an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake // *Environmental Pollution*. 2003. Vol. 122, N 3. P. 391–399.
19. Суццик Н. Н. Роль незаменимых жирных кислот в трофометаболических взаимодействиях пресноводных экосистем // *Журн. общ. биол.* 2008. Т. 69, № 4. С. 299–316.
20. Burns C. W., Brett M. T., Schallenberg M. A. A comparison of the trophic transfer of fatty acids in freshwater plankton by cladocerans and calanoid copepods // *Freshwater Biology*. 2011. Vol. 56, N 5. P. 889–903.
21. Schindler D. E., Rogers D. E., Scheuerell M. D., Abrey C. A. Effects of changing climate on zooplankton and juvenile sockeye salmon growth in southwestern Alaska // *Ecology*. 2005. Vol. 86. P. 198–209.
22. Visconti A., Manca M., De Bernardi R. Eutrophication-like response to climate warming: an analysis of Lago Maggiore (N. Italy) zooplankton in contrasting years // *J. Limnol.* 2008. Vol. 67, N 2. P. 87–92.
23. Суццэня Л. М., Семенченко В. П., Галковская Г. А. Видовое разнообразие пелагического зоопланктона озер разного типа // *ДАН Беларуси*. 2001. Т. 46, № 6. С. 83–85.
24. Brucet S., Dani B., Quintana X. D., Jensen E., Nathansen L. W., Trochine C., Meerhoff M., Gascon S., Jeppesen E. Factors influencing zooplankton size structure at contrasting temperatures in coastal shallow lakes: Implications for effects of climate change // *Limnol. Oceanogr.* 2010. Vol. 55, N 4. P. 1697–1711.

## Assessment of Ecological Risk in the Change of the Content of Essential Polyunsaturated Fatty Acids in Plankton of Lakes under Global Warming

V. P. SEMENCHENKO

*Scientific and Practical Center of the NAS of Belarus on Bioresources  
220072, Belarus, Minsk, Akademicheskaya str., 27  
E-mail: zoo231@biobel.bas-net.by*

Assessment of ecological risk for the change in the content of essential polyunsaturated fatty acids (PUFA) in the plankton of lakes under global warming is carried out. The analyzed hazards are temperature, dissolved phosphorus and nitrogen, phyto- and zooplankton structure. The main risks are related not only with temperature increase, but indirect effects of warming. The critical link in risk assessment of PUFA is phytoplankton structure due to the particularly favorable growth conditions for cyanobacteria in nutrient rich waters in shallow lakes and reservoirs.

**Key words:** risk assessment, polyunsaturated fatty acids, climate, plankton.