



**Жолткевич Григорий Николаевич,**

доктор технических наук, кандидат физико-математических наук, декан механико-математического факультета, заведующий кафедрой теоретической и прикладной информатики Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, г. Харьков

[g.zholtkevych@gmail.com](mailto:g.zholtkevych@gmail.com)

**Беспалов Юрий Гаврилович,**

старший научный сотрудник Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, г. Харьков

[bespalov@univer.kharkov.ua](mailto:bespalov@univer.kharkov.ua)

**Носов Константин Валентинович,**

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, г. Харьков

[k-n@nm.ru](mailto:k-n@nm.ru)

**Мэр Квентин,**

магистр естественных наук, старший преподаватель Glasgow Caledonian University, Глазго, Великобритания

[Q.Mair@gcu.ac.uk](mailto:Q.Mair@gcu.ac.uk)

## Проблема биобезопасности эвтрофицированных источников питьевого водоснабжения: модель факторов устойчивости зоопланктона

**Аннотация.** Основные проблемы биобезопасности эвтрофицированных водоемов – источников питьевого водоснабжения – связаны с риском массового развития токсических цианобактерий. Фактором этого риска является, в частности, характер обратных связей в зоопланктоне, некоторые виды которого в ходе своего питания элиминируют представителей фитопланктона, являющихся конкурентами цианобактерий, и насыщают воду продуктами своего метаболизма – питательными веществами для фитопланктона. В работе получены описания отношений этих видов, открывающие новые подходы к прогнозированию риска массового развития цианобактерий в эвтрофированных гидробиоценозах.

**Ключевые слова:** биобезопасность, эвтрофикация, токсичные цианобактерии, питьевое водоснабжение, математическое моделирование.

## Введение

Проблемы биобезопасности и экологии человека неизбежно связаны с состоянием природных экосистем. Их устойчивость подвергается серьезным испытаниям вследствие хозяйственной деятельностью людей, и в то же время является необходимым условием нормальной жизнедеятельности нашего биологического вида – таким, как наличие чистых источников питьевого водоснабжения, мест полноценной рекреации и т. д.

Во многих случаях возникают труднопреодолимые противоречия между хозяйственной деятельностью человека и его экологией. В качестве драматического примера такого рода можно упомянуть ситуацию с озером Киннерет, являющимся важнейшим источником водоснабжения для ряда ближневосточных стран, в частности, снабжающим питьевой водой примерно треть Израиля. В настоящее время эвтрофикация Киннерета достигла критической степени, в чем, согласно широко распро-



страненному мнению, сыграло свою роль и глобальным потепление, вызвавшее увеличение испарения воды и ее забора для нужд орошения. Основной экологический риск связан с постоянным повышением концентрации в воде биогенных элементов, в первую очередь – азота и фосфора [1–3], увеличивающим возможность массового развития в водоеме токсических цианобактерий с опасным для здоровья людей ухудшением качества питьевой воды. В связи с этим чрезвычайную важность приобретает задача определения того момента, когда наступает стадия эвтрофикации, при которой реальность этой опасности потребует значительных затрат, связанных с ограничением земледелия на берегах Киннерета.

Надо сказать, что это далеко не единственный случай, когда хозяйственная деятельность человека, вызывающая эвтрофикацию крупного водоема, создает опасность нарушения устойчивости его экосистемы, чреватого нарушением биобезопасности. И не только создает опасность, но и реально приводит к экологическому бедствию.

На территории бывшего СССР также имеется довольно печальный прецедент нарушения биобезопасности подобного рода с озером Севан (Армения). Забор воды для ирригации из Севана в течение четверти века в результате обусловленной этим антропогенной эвтрофикации в итоге привел к массовому развитию цианобактерий в этом известном чистотой своей воды горном озере [4].

Главным фактором эвтрофикации, как сказано выше, является повышение концентрации биогенных элементов. На процессы эвтрофикации также заметное влияние оказывает зоопланктон. Это влияние является существенным фактором, определяющим структуру и динамику фитопланктона – в котором вследствие эвтрофикации цианобактерии могут доминировать и получать массовое развитие. Среди механизмов такого влияния, важных с точки зрения риска массового развития токсических цианобактерий, важную роль играет сочетание следующих двух факторов, обусловленных жизнедеятельностью зоопланктона. Первый – насыщение воды метаболитами организмов зоопланктона, являющимися питательными веществами для фитопланктона. Второй – элиминация в процессе питания зоопланктона организмов фитопланктона, конкурирующих с цианобактериями (виды цианобактерий, представляющих опасность для качества питьевой воды, как правило, в живом виде зоопланктоном не выедаются).

Влияние этих двух факторов связано с двумя группами зоопланктона, занимающими обычно заметное место в пресноводных озерных экосистемах – седиментаторов *Rotatoria* и фильтраторов *Cladocera*. Характер этого влияния в значительной степени определяется структурой и динамикой системы отношений различных, в том числе и двух названных, групп в зоопланктонном сообществе. Представляют интерес также отношения биомассы и численности – двух тесно связанных между собой параметров зоопланктона, отличающихся характером отклика на эвтрофикацию (одним из фундаментальных аспектов которой является повышение биопродуктивности водной экосистемы).

Возможность наглядного представления отношений в зоопланктонном сообществе дает модель, позволяющая описать структуру межкомпонентных отношений в сложных биологических и экологических системах, разработанная с участием авторов [4]. Данная модель, получившая название дискретная модель динамических систем (ДМДС), базируется на теории динамических систем [6] и известном из теоретической биологии представлении о типах взаимоотношений между видами [7, 8]. Опишем заложенные в модель ДМДС положения более подробно, а саму модель – в разделе «Материалы и методы».



Как известно, в биологических сообществах один организм может оказывать на другой положительное (+), отрицательное (–) или нейтральное (0) воздействие. Положительное воздействие означает получение пользы одним организмом от другого, отрицательное – причинение вреда, нейтральное – отсутствие влияния. Следовательно, взаимодействие пары организмов могут быть следующими: (0, 0) – нейтрализм, (–, 0) – аменсализм, (–, +) – хищничество, (0, +) – комменсализм, (–, –) – конкуренция и (+, +) – мутуализм. Кроме того, предполагаем, что каждый организм может оказывать влияние на себя, которое должно быть симметричным, т. е. типа (0, 0), (–, –) и (+, +).

Выявление структуры межвидовых отношений в сообществе живых организмов представляет сложную задачу и требует системного подхода, эффективным инструментом которого может, в частности, выступать математическое моделирование.

Предметом настоящей работы является математическое моделирование системы отношений седиментаторов и фильтраторов озера Севан, а также других групп зоопланктона и выявление системных аспектов, определивших развитие токсичности примерно с 1964 года.

Речь идет о следующем:

- стадии, на которой проявления эвтрофикации практически незаметны, и, соответственно, опасность массового развития цианобактерий отсутствует;
- стадии, непосредственно предшествующей состоянию озерной экосистемы, при котором в ней постоянно наблюдаются вспышки биомассы и численности цианобактерий.

## Материалы и методы

Для математического моделирования в настоящей работе использовался отраженный в литературных источниках [9] фактический материал многолетних наблюдений зоопланктона озера Севан на протяжении следующих двух периодов, соответствующих двум указанным стадиям эвтрофикации:

- период 1937–1957 годов, когда экосистема Севана еще не претерпела существенных изменений и проявления эвтрофикации практически незаметны (далее – «первый период»)
- период 1958–1962 годов, непосредственно предшествующий впервые наблюдавшемуся в Севане в 1964 году массовому развитию цианобактерий (далее – «второй период»).

Фактически, для указанных двух периодов по имеющимся данным о численности и биомассе вычислялись корреляционные матрицы, которые и служили исходным материалом для моделирования. Кратко опишем модель ДМДС, детали приведены в [10, 11].

Будем считать, что динамическая система образована  $N$  компонентами  $A_1, A_2, \dots, A_N$ , каждый из которых принимает  $K$  значений: 1, 2, ...,  $K$ . Предполагаем, что каждый компонент количественно выражает величину некоторого признака природной системы, в нашем случае – численности и биомассы. Предполагается, что этот признак измеряется в дискретной упорядоченной шкале, т. е. 1 является его минимальным значением,  $K$  – максимальным.

Значения признаков наблюдаются в дискретные моменты времени  $t = 0, 1, \dots$ . Таким образом, значение признака  $A_j$  в момент времени  $t$  равно  $A_j(t)$ , а состояние всей системы –  $(A_1(t), A_2(t), \dots, A_N(t))$ .



Тогда траекторией системы является бесконечная вправо матрица вида

$$\begin{pmatrix} A_1(0) & A_1(1) & A_1(2) & \dots \\ A_2(0) & A_2(1) & A_2(2) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ A_N(0) & A_N(1) & A_N(2) & \dots \end{pmatrix}, \quad (1)$$

каждый столбец которой представляет состояние всех компонентов системы в моменты  $t = 0, 1, \dots$

Считаем, что состояние системы  $(A_1(t+1), A_2(t+1), \dots, A_N(t+1))$  в момент  $t+1$  полностью определяется ее состоянием в момент времени  $t$ . Из того, что система может принимать только конечное число состояний (именно,  $K^N$ ), следует, что начиная с некоторого момента, траектория системы становится периодичной и для некоторых положительных целых  $T$  и  $s_0$  из (1) можно выделим минор ( $s \geq s_0$ )

$$\begin{pmatrix} A_1(s) & A_1(s+1) & \dots & A_1(s+T-1) \\ A_2(s) & A_2(s+1) & \dots & A_2(s+T-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_N(s) & A_N(s+1) & \dots & A_N(s+T-1) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

который полностью описывает поведение системы.

Функция перехода от состояния в момент времени  $t$  к состоянию в момент времени  $t+1$

$$F: \begin{pmatrix} A_1(t) \\ A_2(t) \\ \vdots \\ A_N(t) \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} A_1(t+1) \\ A_2(t+1) \\ \vdots \\ A_N(t+1) \end{pmatrix}$$

определяется по меж- и внутрикомпонентным отношениям компонентов  $A_1, A_2, \dots, A_N$ , начальному состоянию системы  $(A_1(0), A_2(0), \dots, A_N(0))$  и согласно модели ДМДС подбираются таким образом, чтобы минор (2) в наибольшей степени соответствовал реальному массиву наблюдений. В данном исследовании в качестве меры соответствия использована мера, основанная на сходстве двух корреляционных матриц (Спирмена): одна – между признаками массива наблюдений, вторая – между строками минора (2).

Важным свойством данной модели является то, что она дает возможность восстановить динамику системы, относительно которой выполнены заложенные в модель предположения, по ряду неупорядоченных во времени наблюдений, чем выгодно отличается от моделей, основанных на временных рядах.

### Полученные результаты

С помощью ДМДС идентифицировалась структура отношений между следующими группами в зоопланктонном сообществе озера Севан:

- фильтраторы *Cladocera* (представленные видом *Daphnia longispina sevanica*);
- седиментаторы *Rotatoria* (представленные видами *Acanthodiaptomus denticornis*, *Arctodiaptomus bacillifer*, *Arctodiaptomus spinosus fadeevi*);
- хищные на взрослых стадиях развития *Copepoda* (представленные видом *Cyclops strennus sevanii*);
- питающиеся более крупными, чем фильтраторы и седиментаторы, органическими частицами *Diaptomidae* (представленные видами *Acanthodiaptomus denticornis*, *Arctodiaptomus bacillifer*, *Arctodiaptomus spinosus fadeevi*).



Для этих групп отдельно учитывались биомасса и численность – параметры, различным образом связанные с такими, формирующими структуру и динамику сообщества процессами, как рост и размножение. Мы использовали 5 уровней значений признаков ( $K = 5$ ) и метод весовых функций для определения функций перехода (подробности в цитированной литературе). В качестве исходных данных использовалась биомасса и численность этих групп в период с апреля по сентябрь, то есть за вегетационный сезон, когда температурные условия и другие абиотические факторы в наибольшей степени благоприятствуют массовому развитию организмов фитопланктона, в том числе и цианобактерий. Таким образом, количество компонентов, которые составляют значения биомасс и численности четырех групп, равно 8.

Сделаем замечание о вычислительных особенностях решаемой задачи идентификации. Эта задача является задачей целочисленной оптимизации, для которой множество точек, на которых ищется решение, всегда конечно. В цитированных работах авторов показано, что общее количество начальных условий и структур отношений между компонентами, которые используются для идентификации, равно

$K^N \cdot 3^{N^2}$ . Естественно, это число всегда конечно, но даже при умеренных значениях  $K$  и  $N$  оно будет настолько достаточно большим, что перебор всех данных комбинаций за сколь-нибудь приемлемое время оказывается невозможным. В нашем случае ( $K = 5$ ,  $N = 8$ ) количество комбинаций имеет порядок  $10^{36}$ . Для преодоления этой трудности задача оптимизации решалась с использованием генетических алгоритмов, реализованных в пакете Matlab, а вычисления проводились на высокопроизводительном кластере (High Performance Computing cluster) в Glasgow Caledonian University с использованием библиотеки Matlab Compiler Runtime. Поскольку для поиска решения использованы методы стохастической оптимизации (генетические алгоритмы), нельзя гарантировать, что найденное решение является оптимальным. Тем не менее, оно является достаточно близким к оптимальному и по мнению авторов, вполне адекватно соответствует исследуемой биосистеме.

Структура отношений между группами зоопланктонного сообщества для двух указанных периодов показана в табл. 1 и табл. 2. В таблицах названия групп представлены первыми двумя буквами,  $B$  означает биомассу,  $N$  – численность. В ячейках таблицы на основной диагонали и ниже показаны отношения между численностью и биомассами групп. Смысл этих обозначений следующий: если на пересечении строки компонента  $i$  и столбца компонента  $j$  стоит отношение ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), это означает, что компонент  $j$  влияет на компонент  $i$  как  $\alpha$ , а что компонент  $i$  влияет на компонент  $j$  как  $\beta$ . Например, в первом периоде биомасса *Cladocera* и численность *Copepoda* находятся в отношении (0, –). Заметим, что для отображения структуры отношений достаточно вывести отношения на главной диагонали и ниже нее, что связано с парностью отношений.

Таблица 1

## Структура отношений между группами зоопланктона (первый период)

	Cl, N	Co, N	Ro, B	Di, B	Cl, B	Co, B	Ro, N	Di, N
Cl, N	(–, –)							
Co, N	(+, 0)	(–, –)						
Ro, B	(–, +)	(0, –)	(–, –)					
Di, B	(0, –)	(–, –)	(0, +)	(–, –)				
Cl, B	(0, +)	(0, –)	(+, +)	(+, 0)	(–, –)			
Co, B	(–, 0)	(0, +)	(+, 0)	(–, 0)	(+, +)	(–, –)		
Ro, N	(–, 0)	(+, +)	(–, 0)	(0, +)	(–, 0)	(–, 0)	(0, 0)	
Di, N	(–, 0)	(0, +)	(+, 0)	(+, 0)	(–, 0)	(–, 0)	(+, +)	(–, –)





Таблица 2

## Структура отношений между группами зоопланктона (второй период)

	Cl, N	Co, N	Ro, B	Di, B	Cl, B	Co, B	Ro, N	Di, N
Cl, N	(-, -)							
Co, N	(-, +)	(-, -)						
Ro, B	(0, -)	(+, +)	(-, -)					
Di, B	(+, 0)	(+, -)	(+, 0)	(-, -)				
Cl, B	(+, 0)	(+, +)	(0, -)	(-, 0)	(-, -)			
Co, B	(0, +)	(+, 0)	(+, 0)	(-, 0)	(0, +)	(-, -)		
Ro, N	(-, +)	(-, -)	(+, 0)	(+, 0)	(-, 0)	(+, 0)	(-, -)	
Di, N	(-, 0)	(+, +)	(+, +)	(+, -)	(0, +)	(+, 0)	(+, +)	(-, -)

Как видим из табл. 1, для первого периода между биомассой седиментаторов *Rotatoria* и численностью фильтраторов *Cladocera* имеется отношение типа (+, -). Отметим, что это единственные отношения такого типа в данной структуре.

На рис. 1 и рис. 2 представлены траектории данных двух групп для первого и второго периода.

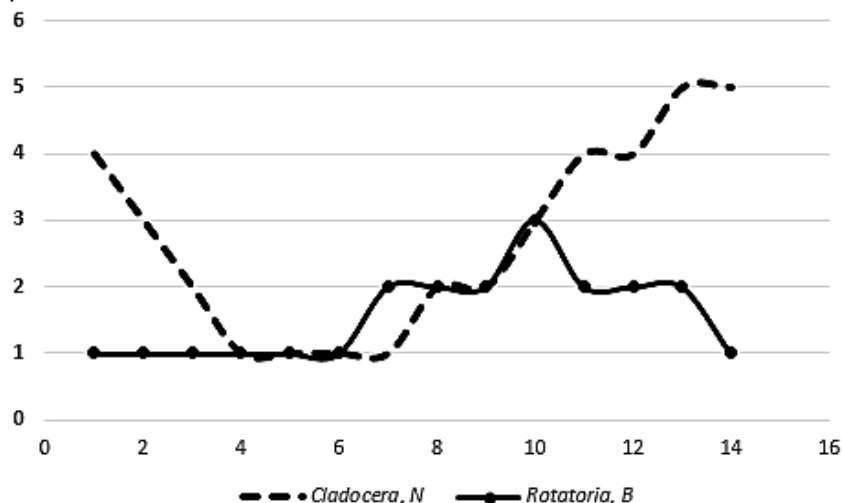


Рис. 1. Траектория численности *Cladocera* и биомассы *Rotatoria* для первого периода. По оси абсцисс – условные шаги по времени, по оси ординат – значения компонентов

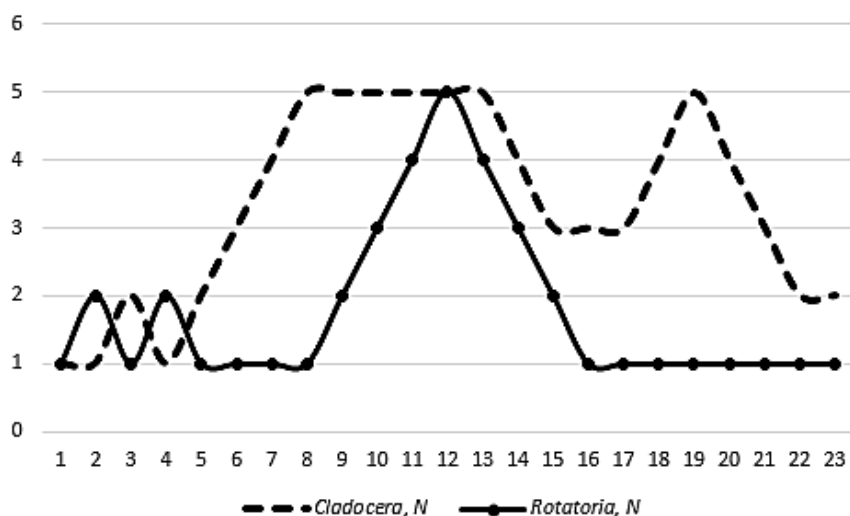


Рис. 2. Траектория численности *Cladocera* и *Rotatoria* для второго периода



Представленная на рис. 1 динамика, особенно на шагах 10–14, демонстрирует антагонистические отношения двух данных групп, что является следствием отношений типа (+, –). Таким образом, эти отношения оказывают заметное влияние на характер динамики седиментаторов *Rotatoria* и фильтраторов *Cladocera* в первом периоде. Как известно, отношения типа (+, –) способствуют установлению состояния динамического равновесия и препятствуют значительным отклонениям от равновесных значений связанных этим типом отношений параметров.

Анализ же табл. 2 указывает на отсутствие для второго периода отношений типа (+, –) между биомассой седиментаторов *Rotatoria* и численностью фильтраторов *Cladocera*. Во втором периоде отношениями такого типа связаны численности этих двух групп. Но в представленной на рис. 2 динамике этих параметров отношения (+, –) не проявляются, что, как надо полагать, вызвано влиянием на эти отношения другими наличествующими в системе отношениями. Соответственно, ослаблено стабилизирующее влияние этих отношений. Заметим, что во втором периоде отношения типа (+, –), также не находящие соответствия в динамике, наблюдаются между биомассой *Diaptomidae* и численностью *Copepoda* и между численностями *Cladocera* и *Rotatoria*. Однако главный интерес для изучения данной экосистемы, как говорилось, представляют седиментаторы *Rotatoria* и фильтраторы *Cladocera*, насыщающие воду питательными веществами для фитопланктона и элиминирующие виды фитопланктона, которые являются конкурентами цианобактерий.

На основании вышесказанного можно выдвинуть рабочую гипотезу, в соответствии с которой в первом периоде сильнее, чем во втором, функционирует стабилизирующий механизм, препятствующий отклонениям от равновесных значений биомассы и численности седиментаторов *Rotatoria* и фильтраторов *Cladocera*. Речь может идти также и об отклонениях, вызванных внешними воздействиями. В качестве таких внешних, весьма слабых, воздействий, могут рассматриваться магнитные бури.

Для проверки этой гипотезы для двух периодов определялись значения коэффициентов корреляции Спирмена между значениями биомассы и численности седиментаторов *Rotatoria* и фильтраторов *Cladocera* и полученными из [12] частотами магнитных бурь определенной силы (уровни G1–G5, согласно классификации Национального управления океанических и атмосферных исследований США). Звездочкой отмечены значимые на уровне 0,05 коэффициенты корреляции.

Представленные в табл. 3 результаты подтверждают указанную рабочую гипотезу: для седиментаторов *Rotatoria* и фильтраторов *Cladocera* во втором периоде наблюдаются отсутствующие в первом статистически значимые достаточно сильные положительные корреляции частот магнитных бурь со значениями биомассы и численности.

Таблица 3

## Корреляции между значениями биомассы и численности седиментаторов *Rotatoria* и фильтраторов *Cladocera* и частотами магнитных бурь уровней G1–G5

	Первый период					Второй период				
	G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5
Cl, N	0,02	0,21	–0,01	–0,15	0,00	0,15	0,53	0,16	0,65*	0,39
Cl, B	0,00	0,11	–0,05	–0,16	–0,05	0,29	0,73*	0,42	0,79*	0,39
Ro, B	0,39	0,28	0,36	0,10	0,36	–0,29	0,26	–0,12	0,24	–0,22
Ro, N	0,06	0,10	0,20	0,24	0,36	0,51	0,31	0,63*	0,23	0,22



## Обсуждение и выводы

В результате математического моделирования описан системный, практически значимый, эффект влияния эвтрофикации на структуру и динамику озерного зоопланктонного сообщества. Важной стороной этого эффекта является наличие на ранних, невыраженных стадиях эвтрофикации механизма, обеспечивающего устойчивость значений биомассы и численности седиментаторов *Rotatoria* и фильтраторов *Cladocera*. На более поздней стадии, непосредственно предшествующей массовому развитию цианобактерий, действие этого механизма отсутствует. Эта черта структуры и динамики зоопланктона может сыграть важную роль в реализации сценария эвтрофикации, при котором повышение уровня первичной продукции будет приводить к доминированию цианобактерий – в частности, благодаря выеданию их конкурентов седиментаторами *Rotatoria* и фильтраторами *Cladocera*, давшими, при ослаблении стабилизирующих механизмов, всплески биомассы и численности. Этот, выявленный с использованием модели, аспект структуры и динамики зоопланктонного сообщества может быть использован для определения степени риска массового развития цианобактерий на разных стадиях эвтрофикации.

Таким образом, построенная динамическая модель зоопланктонного сообщества эвтрофицированного озера позволяет выявить черты структуры и динамики зоопланктона, характерные для стадии эвтрофикации, предшествующей такой ее степени, при которой проблемы биобезопасности, связанные с массовым развитием в водоеме токсических цианобактерий, становятся актуальными. Полученные результаты могут оказаться полезными для разработки методов диагностики состояния эвтрофицированной водной экосистемы и оценки риска массового развития в ней токсических цианобактерий.

## Ссылки на источники

1. Gophen M. Lake Kinneret (Israel) Ecosystem: Long-term Instability or Resiliency // Water, Air, & Soil Pollution. – 2000. – Vol. 123, N 1. – P. 323–335.
2. Berman T., Stone, Y., Kaplan B., Schlichter M., Nishri A., Pollinger U. Primary Production and Phytoplankton in Lake Kinneret: A Long-Term Record (1972–1993) // Limnology and Oceanography. – 1995. – Vol. 40, N 6. – P. 1064–1076.
3. Pinchasov Y., Porat R., Zur B., Singer L., Dubinsky Z. Photosynthetic efficiency as function of nutrient status in phytoplankton from irrigation and drinking-water reservoirs, determined by photoacoustics // Israel Journal of Plant Sciences. – 2008. – Vol. 56, N 1–2. – P. 69–74.
4. Многолетние показатели развития зоопланктона: научное издание / Акад. наук СССР, Сов. нац. ком. по Междунар. биол. программе; ред. Н. Н. Смирнов. – М.: Наука, 1973. – 203 с.
5. Беспалов Ю. Г., Дереча Л. Н., Жолткевич Г. Н., Носов К. В. Дискретная модель системы с отрицательными обратными связями // Вестник Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина. Серия «Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизация систем управления». – 2008. – № 833. – С. 27–38.
6. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. – М.: Мир, 1971. – 400 с.
7. Lidicker W. Z., Jr. A Clarification of Interactions in Ecological Systems // BioScience. – 1979. – Vol. 29, N 8. – P. 475–477.
8. Abrams P. A. On classifying interactions between populations // Oecologia. – 1987. – Vol. 73, N 2. – P. 272–281.
9. Многолетние показатели... Указ. соч.
10. Беспалов Ю. Г. и др. Указ. соч.
11. Bespalov Yu., Gorodnyanskiy I., Zholtkevych G., Zaretskaya I., Nosov K., Bondarenko T., Kalinovskaya K., Carrero Y. Discrete Dynamical Modeling of System Characteristics of a Turtle's Walk in Ordinary Situations and After Slight Stress // Бионика интеллекта. – 2011. – № 3 (77). – С. 54–59.
12. The USA National oceanic and atmospheric administration. – URL: <http://www.noaa.gov/index.html>.





**Bespalov Yuri,**

*Master of Science, Senior researcher, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv*

[bespalov@univer.kharkov.ua](mailto:bespalov@univer.kharkov.ua)

**Nosov Konstantin,**

*Ph.D., Senior research fellow, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv*

[k-n@nm.ru](mailto:k-n@nm.ru)

**Zholtkevych Grigori,**

*Dr.s., Ph.D, Dean, Head of Department, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv*

[g.zholtkevych@gmail.com](mailto:g.zholtkevych@gmail.com)

**Mair Quentin,**

*Master of Science, Senior Lecturer, Glasgow Caledonian University, Glasgow, United Kingdom*

[Q.Mair@gcu.ac.uk](mailto:Q.Mair@gcu.ac.uk)

**Biosafety issues of eutrophicated sources of drinking-water supply in relation to the risk of mass development of toxic cyanobacteria: model of stability factors of zooplankton**

**Abstract.** Main issues of biosafety of eutrophicated water reservoirs, which used as drinking-water sources, are related with the risk of mass development of toxic cyanobacteria. Factor of this risk is, in particular, a character of feedback in zooplankton, some species of which in the course of their nutrition eliminate representatives of phytoplankton. In turn, these representatives are competitors to cyanobacteria and saturate water with the products of their metabolism – nutrients for phytoplankton. In the paper descriptions of relations for these species are obtained and this result suggests new approaches to prediction of the risk of mass development of cyanobacteria in eutrophicated hydrobiocoenoses.

**Keywords:** biosafety, eutrophication, toxic cyanobacteria, drinking-water supply, mathematical modeling.



**Рекомендовано к публикации:**

*Зиновкиной М. М., доктором педагогических наук, профессором, действительным членом Академии профессионального образования Российской Федерации*