

## Динамика зообентоса озёр зоны защитных мероприятий объекта по уничтожению химического оружия в г. Щучье как метод биологического мониторинга

© 2014. Д. Д. Алексеус<sup>1</sup>, соискатель учёной степени; О. В. Козлов<sup>2</sup>, д.б.н., профессор, зав. кафедрой зоологии и биоэкологии; О. М. Плотникова<sup>1,2</sup>, д.б.н., г.н.с.<sup>1</sup>, профессор кафедры физической и прикладной химии<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Региональный Центр по обеспечению государственного экологического контроля и мониторинга объектов по хранению и уничтожению химического оружия (РЦ СГЭЖиМ) по Курганской области,

<sup>2</sup>Курганский государственный университет,  
e-mail: alexeyusd@mail.ru, plotnikom@yandex.ru

В Щучанском районе Курганской области в зоне защитных мероприятий (ЗЗМ) объекта по уничтожению химического оружия (объект «Щучье») в 2009–2014 годах для оценки комбинированного характера действия загрязнителей использовались методы химико-аналитического контроля и биоиндикации. В рамках биологического мониторинга животного мира было проведено исследование зообентоса озёр Наумовское, Панькино и Фролиха с целью определения показателей, необходимых для оценки степени загрязнения и дальнейшего использования в ретроспективном анализе. Все работы проводились в соответствии со стандартными методиками гидробиологических исследований, допущенных в системе Госгидромета России, с использованием метода цифровой микроскопии.

По результатам исследований описано видовое разнообразие зоопланктоценозов, изучены морфологические особенности и динамика популяций беспозвоночных гидробионтов, определены индикаторные свойства организмов. Для оценки состояния экосистем малых озёр рассчитаны индексы Пантле-Букка, которые широко используются при оценке загрязнённости природных и сточных вод. Было установлено, что сообщества исследуемых озёр принадлежат к β-мезосапробным с умеренной долей органического загрязнения, которая может быть вызвана не только антропогенной нагрузкой, но также и значительным накоплением иловых отложений, характерным для озёр Зауралья.

Таким образом, при исследовании зоопланктоценозов озёр ЗЗМ объекта «Щучье» было выяснено, что все изменения для изученных особей беспозвоночных различного таксономического статуса и размерных групп обусловлены естественными сукцессионными процессами. Возможное морфологическое разнообразие форм объясняется модификационной изменчивостью, характерной для их видов при наличии хищников более высокого порядка. Отсутствие тератогенеза, связанного с возможным воздействием химических компонентов на структурные компоненты зоопланктоценозов исследованных водоёмов, позволяет сделать вывод об отсутствии негативного влияния объекта «Щучье» на водные экосистемы зоны защитных мероприятий.

In the Shchuchye district of Kurgan region of the protected area of «Shchuchye» facility for destruction of chemical weapons (PAFDCW) facility for destruction of chemical weapons (object «Shchuchye») in 2009–2014 to assess the nature of the combined effects of pollutants used methods of chemical analysis and control of bio-indication. Within the biological monitoring of fauna study was conducted zoobenthos of lakes Naumovski, Pankino and Frolikha to identify indicators to assess the extent of contamination and further use in a retrospective analysis. All work is carried out in accordance with standard procedures hydrobiological studies made in the system Gosgidrometa Russia, with the use of digital microscopy.

According to the research described species diversity of zooplankton communities, studied the morphological characteristics and population dynamics of aquatic invertebrates, defined indicator properties of organisms. To assess the state of ecosystems of small lakes calculated indices Pantle Bucca, which are widely used in the evaluation of pollution of water and wastewater. It was found that the community of the lakes belong to β-mesosaprobic with moderate proportion of organic pollution that can be caused not only by anthropogenic load, but also a significant accumulation of silt characteristic of lakes Zauralye.

Thus, in the study of zooplankton of lakes PAFDCW «Shchuchye» it was determined that all changes for the studied species of invertebrates and taxonomic status of various size groups are due to natural succession process. Possible morphological diversity of variability explained by the modification characteristic of their species in the presence of higher-order predators. Lack of teratogenesis associated with possible exposure to chemical components on the structural components of the zooplankton communities studied reservoirs, leads to the conclusion about the absence of the negative impact of the project: «Shchuchye» on aquatic ecosystems zone of protective actions.

Ключевые слова: биологический мониторинг, зообентос озёр, сапробность, индексы загрязнения, уничтожение химического оружия.

Keywords: biological monitoring, zoobenthos lakes, saprobity, pollution indices, destruction of chemical weapons.

## Введение

В Щучанском районе Курганской области с мая 2009 года работает объект по хранению и уничтожению отравляющих веществ (ОВ) – зарина, зомана и вещества типа Vx – химического оружия (объект «Щучье»). На объекте «Щучье» по состоянию на декабрь 2013 г. уничтожено более 87% запасов химического оружия [1], на конец 2014 г. – около 95%, и с 2015 года на объекте «Щучье» начинается завершающий этап работы – уничтожение ОВ зоман и Vx в изделиях сложной конструкции (ИСК). При штатном режиме работы объекта прямое попадание загрязняющих веществ в природную среду исключается, однако процессы химического разоружения сопряжены с потенциальной опасностью для окружающей среды [2]. При рассеивании в пределах допустимых выбросов даже очень малых количеств уничтожаемых веществ, продуктов их деструкции, компонентов дегазирующих смесей может быть возможным загрязнение как почвы, так и поверхностной воды зоны защитных мероприятий (ЗЗМ).

Известно, что продуктами деструкции фосфорорганических отравляющих веществ зарина, зомана и Vx и компонентами детоксицирующих смесей являются достаточно устойчивые к разложению метилфосфоновая кислота (МФК), моноэтаноламин, их соли, моно- и диалкиловые эфиры МФК (в том числе тиоэфиры) [3], которые в силу своего строения могут быть посредниками свободно-радикальных процессов, влияя на работу антиоксидантной системы живых организмов – растений [4], животных [5, 6], гидробионтов.

При большом количестве химических соединений, образующихся как продукты детоксикации и деструкции фосфорорганических ОВ и дегазирующих составов, при отсутствии для многих из них разработанных нормативов контроля (например, предельно-допустимых концентраций – ПДК), недостаточной базе методического и приборного обеспечения, а также из-за сложности и порой высокой стоимости химических исследований организовать эффективный экологический мониторинг только средствами аналитической химии весьма затруднительно. Химико-аналитический контроль не учитывает и комбинированный характер действия загрязнителей, когда влияние каждого из них может дополнять, усиливать или подавлять друг друга. Следствием этих причин система экологического мониторинга в зоне влияния объектов по

уничтожению химического оружия должна быть основана на сочетании методов химико-аналитического контроля и биологических исследований [7, 8, 9].

В ЗЗМ объекта «Щучье» с 2009 г. проводится регулярный биологический мониторинг различными методами в соответствии с ежегодными программами, согласованными с территориальным органом Росприроднадзора по Курганской области. Биологический мониторинг животного мира в районе расположения объекта «Щучье» осуществлялся с использованием методов оценки хронического (долговременного) воздействия на природные объекты по индикации с использованием индикаторных видов мелких млекопитающих и популяционных показателей зоопланктона (гидробиологический мониторинг).

Целью исследований, результаты которых представлены в этой работе, было определение показателей озёр ЗЗМ объекта «Щучье» для их дальнейшего использования в ретроспективном анализе результатов биомониторинга.

## Объекты и методы

Полевые исследования проводились в соответствии со стандартными методиками гидробиологических исследований [10]. Места отбора проб определялись в зависимости от морфологических особенностей водоёма, а количество отбираемых проб зависело от площади озера. Для получения объективных результатов отбор проводился в нескольких повторностях с каждого биотопа, после чего при камеральной обработке проводилось усреднение данных по ним, для учёта пространственной неоднородности размещения организмов. Дальнейшей обработке подвергался нефиксированный биологический материал. При камеральной обработке определялась систематическая принадлежность особей, а на основании обработки результатов – половозрастная структура популяций и пространственное распределение особей в популяциях.

При определении биомассы популяций организмов зоопланктона учитывались размерно-весовые характеристики. Индивидуальную массу особей определяли на аналитических весах с точностью до 0,001 г. Для планктонных ракообразных, относящихся к Copepoda и Cladocera, масса тела рассчитывалась с использованием номограмм [11], отражающих зависимость их массы тела от линейных размеров особей. Среднюю удельную биомассу популяции определяли взвешива-

Таблица 1

Физико-географические характеристики исследованных водоёмов

Водоём	Географические координаты		Площадь, км <sup>2</sup>	Длина береговой линии, км	Высота над уровнем моря, м
	с.ш.	в.д.			
Панькино	55°26'43"	62°47'35"	115,5	4,259	160
	55°26'38"	62°47'39"			
Наумовское	55°21'51"	62°42'58"	30,0	2,030	162
	55°21'44"	62°42'47"			
Фролиха	55°14'36"	62°48'05"	77,0	3,281	159
	55°14'31"	62°48'09"			

нием всех особей в пробе с пересчётом данной величины на единицу площади поверхности водоёма (1 м<sup>2</sup>).

Для определения таксономического статуса организмов использовались определители [12–14]. В результате обработки полученных материалов определялись популяционные характеристики беспозвоночных гидробионтов, статус доминирования их в экосистемах озёр, оценивалось биологическое разнообразие зоопланктоценозов исследованных водоёмов.

Исследованные оз. Наумовское, Панькино и Фролиха расположены в ЗЗМ объекта «Щучье». Озеро Панькино находится на расстоянии 9 км от промзоны объекта «Щучье» в северо-восточном направлении; оз. Наумовское – на расстоянии 4,2 км от промзоны и на расстоянии 10 км к северу от арсенала хранения ХО; оз. Фролиха – на расстоянии 6 км в юго-восточном направлении от него. Физико-географические характеристики водоёмов получены с помощью дистанционного зондирования и обработаны с использованием геоинформационной системы MapInfo 8.0 (табл. 1).

По своему происхождению водоёмы типичны для территории Курганской области и представляют собой результат суффозионных процессов. Это привело к формированию правильных по форме блюдцеобразных озёр с незначительной (2,0–2,5 м) глубиной, малым уклоном дна и различной степенью зарастания погружёнными и полупогружёнными макрофитами.

### Результаты и обсуждение

Основные популяционные характеристики планктонных беспозвоночных гидробионтов и беспозвоночных гидробионтов-зоопланктеров в озёрах ЗЗМ объекта «Щучье» в 2009–2014 годах приведены в таблице 2.

В 2009 г. по биологическому разнообразию во всех наблюдаемых водоёмах доминировали виды *Keratella quadrata*, *Acanthocyclops vernalis*. К субдоминантному виду относился *Daphnia*

*longispina*, численность которого в момент исследования составляла 36000 особей/м<sup>2</sup>. Половая структура представлена преимущественно самками, самцы встречаются редко.

В 2010 г. отбор проб показал изменение видового состава. Доминирующими видами являлись *Daphnia cristata* и *Acanthocyclops vernalis*. Отсутствовал вид *Keratella quadrata*, однако в планктоне присутствовал вид *Daphnia longispina*. По биологическому разнообразию зоопланктонных организмов оз. Панькино представляется наиболее интересным с точки зрения биоиндикации негативных воздействий. Зоопланктоценоз оз. Панькино в 2010 г. был представлен двумя видами ветвистоусых ракообразных (*Cladocera*, *Daphnidae*), которые различаются по степени доминирования. К доминирующим видам ветвистоусых ракообразных в планктоценозе водоёма относятся *Daphnia longispina*, *Daphnia pulex*. К субдоминантному виду относится *Mesocyclops leuckarti*, плотность популяции которого в момент исследования составила 4000 особей/м<sup>2</sup>. Доля молоди в популяциях ветвистоусых ракообразных в июле 2010 г. колеблется от 9 до 13% общей численности популяций. В выводковых камерах самок отмечено в среднем 6–8 яиц, причём часть самок имеют эфиппиумы, содержащие диапаузирующие яйца. Количество самок с яйцами составляет до 76% общего числа особей в популяциях. В осенних сборах 2010 г. в планктоне озёр отмечено значительное количество (до 890 эфиппиумов/м<sup>2</sup>) эфиппиумов, содержащих диапаузирующие яйца ветвистоусых рачков. Данная зимующая жизненная форма даёт возможность возобновления популяций ветвистоусых рачков после неблагоприятных условий зимнего периода.

Доля молоди в популяциях ветвистоусых ракообразных в 2011 году колеблется от 10 до 23% общей численности популяций. В выводковых камерах самок отмечено в среднем 5–9 яиц, причём часть самок имеют эфиппиумы, содержащие диапаузирующие яйца. Количество самок с яйцами составляет до 48% общего

Таблица 2

Основные популяционные характеристики беспозвоночных гидробионтов в озёрах ЗЗМ объекта «Щучье» Курганской области в 2009–2014 год

Водоём	Систематическая принадлежность организма	2009		2011		2012		2013		2014	
		экз/м <sup>2</sup>	г/м <sup>2</sup>	экз/м <sup>2</sup>	г/м <sup>2</sup>	экз/м <sup>2</sup>	г/м <sup>2</sup>	экз/м <sup>2</sup>	г/м <sup>2</sup>	экз/м <sup>2</sup>	г/м <sup>2</sup>
Наумовское	<i>Keratella quadrata</i>	1982	0,059	718	0,021	-	-	-	-	-	-
	<i>Daphnia cristata</i>	622	0,248	826	0,329	86	0,034	122	0,048	316	0,112
	<i>Ceriodaphnia reticulata</i>	-	-	-	-	118	0,082	112	0,078	352	0,106
	<i>Acanthocyclops vernalis</i>	1890	0,378	1664	0,332	-	-	-	-	-	-
	<i>Eudiaptomus gracilloides</i>	-	-	-	-	1058	0,317	926	0,278	769	0,169
Панькино	<i>Culex sp.</i>	4	0,104	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Keratella quadrata</i>	2627	0,079	1228	0,037	-	-	186	0,006	66	0,053
	<i>Kellicottia longispina</i>	-	-	-	-	-	-	98	0,004	98	0,004
	<i>Daphnia longispina</i>	1344	1,075	1124	0,9	-	-	66	0,053	64	0,053
	<i>Daphnia pulex</i>	138	0,193	123	0,172	-	-	-	-	-	-
	<i>Bythotrephes longimanus</i>	-	-	-	-	42	0,075	34	0,061	76	0,089
	<i>Eudiaptomus gracilloides</i>	-	-	-	-	98	0,029	244	0,073	301	0,109
	<i>Mesocyclops leuckarti</i>	826	0,165	4124	0,824	-	-	-	-	-	-
<i>Cloeon dipterum</i>	-	-	-	-	-	-	34	0,102	52	0,156	
Фролиха	<i>Keratella quadrata</i>	926	0,028	882	0,027	438	0,013	246	0,007	246	0,007
	<i>Daphnia longispina</i>	-	-	-	-	184	0,123	98	0,066	49	0,02
	<i>Eudiaptomus gracilis</i>	1128	0,135	1882	0,225	412	0,049	578	0,068	446	0,053
	<i>Eylais sp.</i>	6	0,072	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Daphnia cucullata</i>	528	0,312	618	0,365	228	0,135	46	0,027	-	-

Примечание: - представители данного вида в пробе отсутствовали.

числа особей в популяциях. Зоопланктоценоз в оз. Фролиха достаточно стабилен, а все возможные изменения связаны, по всей видимости, с изменениями солёности воды в водоёме. За исследуемый период минерализация воды в озере повысилась на 1 г/л, что привело к исчезновению из планктоценоза одного вида ветвистоусых рачков (*Bosmina longirostris*, *Keratella quadrata*) и появлению в нём незначительного количества особей *Trichocerca sp.*, *Eylais sp.*, *Daphnia cucullata*, *Cyclops leuckarti*. Представители данного рода, наряду с *Keratella quadrata*, составляют систему субдоминантов, которая может нивелировать незначительные негативные природные воздействия на данный зоопланктоценоз. Одновременно с этими процессами увеличилась численность ещё одного вида-доминанта – веслоногих раков *Cyclops strenuous*, плотность популяции которого в 2011 г. по сравнению с предыдущим годом выросла в 1,75 раза, а в 2009 г. этот вид вообще не был обнаружен. Подобные процессы можно считать типичными для небольших суффозионных озёр исследуемой территории, так как все они подвержены влиянию циклов водности и, как следствие, регулярному изменению минерализации воды. За последние два года начал снижаться уровень подземных вод, а изменения

климата привели к сезонным уменьшениям количества атмосферных осадков. Повышение минерализации воды приводит к структурным перестройкам зоопланктоценозов и изменению их видового разнообразия. В зоопланктоценозах озёр в 2011 г. значительную роль играют ветвистоусые рачки, плотность популяций которых в момент исследований доходила до 826–1134 особей/м<sup>2</sup>. Половая структура популяций сдвинута в сторону преобладания самок, что объясняется неоптимальными условиями существования популяций в момент исследований при массовом развитии зелёных и синезелёных водорослей (цианобактерий). Горизонтальное распределение ветвистоусых ракообразных достаточно равномерно. Это связано с развитием кормовой базы в водоёме и отсутствием ветрового переноса и перемешивания в момент исследований. В 2012 г. для всех трёх модельных водоёмов проводились исследования в прибрежной фации зарастания полуводными и погруженными макрофитами и в открытой части водоёмов, свободной от плавающих макрофитов, на расстоянии 70–120 м от уреза воды. В оз. Фролиха различий в видовом составе зоопланктоценозов прибрежной и открытой части водоёма не наблюдалось. По сравнению с 2011 г. в водоёме в небольшом

количестве и примерно одинаковой плотности популяций появляются *Bosmina longirostris* и *Daphnia longispina*. Стабильно на протяжении всех лет исследований в зоопланктоне отмечались представители веслоногих рачков *Eudiaptomus gracilis* и коловраток *Keratella quadrata*. По сравнению с предыдущими годами наблюдается снижение общей массы планктонных организмов. Возможно, одной из причин, определяющих данную тенденцию в исследованных водоёмах, является снижение уровня воды в связи с аномально жарким летом и минимальный уровень на протяжении современной фазы гидрогеологического цикла для озёр Зауралья. В летний сезон 2013 г. наблюдалась стабилизация структуры зоопланктонных сообществ исследуемых озёр, что, возможно, связано с установлением интервала минерализации среды, характерного для формирования подобных комплексов с меньшим биологическим разнообразием. Несмотря на понижение уровня озёр по вертикали на 0,3–0,5 м и увеличение солёности на 1,0–1,5 г/л, следует отметить общее увеличение численности и биомассы зоопланктона при увеличении степени доминирования отдельных видов. Все изменения в структуре зоопланктоценозов, системе доминирования отдельных видов беспозвоночных гидробионтов и структуры их популяций в них определяются естественными природными причинами и прежде всего – изменением минерализации среды и глубины в определенные фазы минимального уровня гидрологического цикла озёр. В планктоне озёр в 2013 г. появляются коловратки *Keratella quadrata* (оз. Наумовское – 632 особи/м<sup>2</sup>; Панькино – 228632 особи/м<sup>2</sup>) и *Kellicottia longispina* (Панькино – 186632 особи/м<sup>2</sup>). Новым массовым видом для оз. Панькино, имеющим при невысокой плотности популяции (132 особи/м<sup>2</sup>) среднюю относительную биомассу (0,396 г/м<sup>2</sup>), в 2013 г. можно считать личиночные стадии подёнок *Cloeon dipterum*.

Среди ракообразных, вновь отмеченных в исследованных озёрах летом 2013 г., встречены *Ceriodaphnia reticulata* (Наумовское – 792 особи/м<sup>2</sup>) и *Daphnia longispina* (Наумовское – 132 особи/м<sup>2</sup>).

В 2013–2014 гг. для всех исследуемых озёр была проведена оценка степени загрязнения озёр, для чего использовали индекс Пантле-Букка (табл. 3). Индекс Пантле-Букка является универсальным, применяемым для водоёмов различной типологии и учитывающим как планктон, так и бентос [14]. Индекс вычислялся согласно формуле  $I = \Sigma(SJ) / \Sigma J$ ,

Таблица 3  
Индекс сапробности Пантле-Букка  
в озёрах ЗЗМ объекта «Щучье» в 2013–2014 гг.

Водоём	Год исследования	
	2013	2014
Наумовское	2,22	2,30
Фролиха	1,90	1,86
Панькино	1,71	1,68

где S – сапробность индикаторного таксона; J – его индикаторный вес. Данный индекс используется в системе Госгидромета России при оценке загрязнённости природных и сточных вод.

Было установлено, что в соответствии со шкалами Кольквитца-Марссона [14] сообщества всех трёх озёр принадлежат к β-мезосапробным с умеренной долей органического загрязнения, которая может быть вызвана не только антропогенной нагрузкой, но также и значительным накоплением иловых отложений, характерным для озёр Зауралья.

### Заключение

При исследовании зоопланктона озёр ЗЗМ объекта «Щучье» с использованием метода цифровой микроскопии было выяснено, что все изменения для изученных особей беспозвоночных различного таксономического статуса и размерных групп обусловлены естественными сукцессионными процессами. Возможное морфологическое разнообразие форм объясняется модификационной изменчивостью, характерной для их видов при наличии хищников более высокого порядка. Отсутствие тератогенеза, связанного с возможным воздействием химических компонентов на структурные компоненты зоопланктоценозов исследованных водоёмов, позволяет сделать вывод об отсутствии негативного влияния объекта «Щучье» на водные экосистемы зоны защитных мероприятий.

### Литература

1. Холстов В.И. Итоги реализации Федеральной целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в РФ» в преддверии 2014 года // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 4. С. 6–9.
2. Капашин В.П., Поляков А.И., Круглов В.А. Обеспечение экологической безопасности объектов по уничтожению химического оружия // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 4. С. 10–18.
3. Растегаев О.Ю., Чупис В.Н., Марьин В.И. и др. Фосфорорганические отравляющие вещества. Свойства

и методы определения. Саратов: ООО «Фиеста-2000», 2009. 219 с.

4. Огородникова С.Ю., Головки Т.К., Ашихмина Т.Я. Реакции растений на фосфорорганический ксенобиотик – метилфосфовую кислоту. Сыктывкар, 2004. 24 с. (Научные доклады. Коми научный центр УрО РАН. Вып. 464).

5. Плотникова О.М., Евдокимов А.Н., Григорович М.А. О возможности использования ферментативных методов для диагностики влияния метилфосфонатов и моноэтаноламина на теплокровных животных в районах расположения объектов уничтожения химического оружия // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 76–80.

6. Плотникова О.М., Матвеев Н.Н., Савинова И.В. и др. Оценка влияния низких доз метилфосфоната на теплокровных животных по биохимическим показателям крови мышей // Естественные и технические науки. 2011. № 1 (51). С. 32–37.

7. Ашихмина Т.Я. Комплексный экологический мониторинг объектов хранения и уничтожения химического оружия. Киров: Вятка, 2002. 544 с.

8. Алексеус Д.Д., Плотникова О.М., Козлов О.В., Максимовских С.Ю. Биомониторинговые исследования

в районе расположения объекта «Щучье» по уничтожению химического оружия // Биосфера. 2014. Т. 6. № 1. С. 17–28.

9. Плотникова О.М., Григорович М.А., Максимовских С.Ю., Кудрин Б.И., Евдокимов А.Н. Биоиндикация как метод биологического мониторинга в районе расположения объекта по уничтожению химического оружия в г. Щучье // Теоретическая и прикладная экология, 2013. № 4. С. 93–98.

10. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под. Ред. проф. Абакумова В.А. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.

11. Численко Л.Л. Номограммы для определения веса водных организмов по размерам и форме тела. Л.: Наука, 1968. 105 с.

12. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР (планктон и бентос). Л.: Гидрометеиздат, 1977. 512 с.

13. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. СПб.: Наука, 2001. Т. 1, 395 с. Т. 2, 629 с.

14. Чертопруд М.В., Чертопруд Е.С. Краткий определитель беспозвоночных пресных вод европейской России. М.: Товарищество КМК, 2010. 179 с.