

УДК 574.587

## ДИНАМИКА СОСТОЯНИЯ МАКРОЗООБЕНТОСА МАЛОЙ РЕКИ В РАЙОНЕ ОБЪЕКТА УНИЧТОЖЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

© Т.И. Кочурова, Т.Г. Шихова, М.Л. Цепелева

*Ключевые слова:* макрозообентос; биоиндикация; химическое оружие.

Обобщены результаты исследований за 2001–2011 гг. состояния макрозообентоса малого притока р. Вятка вблизи завода по уничтожению химического оружия. Выявлены изменения структурных характеристик донных сообществ и их влияние на ухудшение качества вод. Негативная трансформация бентоценозов в большей степени совпала с этапами уничтожения Vx и ипритно-люизитной смеси. Обнаружена отрицательная корреляция биологического разнообразия с содержанием ионов аммония, нитритов, фосфатов. Рост олигохетного индекса происходил на фоне возрастания концентраций АПАВ и нефтепродуктов.

### ВВЕДЕНИЕ

Нарастающая деградация природных экосистем вблизи промышленных предприятий диктует необходимость комплексного исследования воздействия факторов среды на биоценозы и отдельные компоненты биоты. Экологическое состояние природных сред наиболее показательно отражают донные сообщества, чутко реагирующие на трансформацию водотока и его водосборной территории.

Представляющий значительную потенциальную угрозу природным экосистемам крупный арсенал (7 тыс. т) боевых отравляющих веществ (ОВ) первого класса опасности с 1953 г. располагался у п. Мирный Кировской области в 60 км от областного центра [1]. С 2006 г. здесь начал функционировать производственный объект по уничтожению химического оружия (ОУХО), на котором к 2014 г. было уничтожено 98,4 % ОВ (Vx, зарин, зоман – фосфорорганические ОВ нервно-паралитического действия и ипритно-люизитная смесь – мышьяксодержащие ОВ кожно-нарывного действия). Завод относится к предприятиям замкнутого цикла водоснабжения. Очищенные хозяйственно-бытовые стоки с объекта и с п. Мирный поступают в р. Погиблиця в 2 км от ее устья.

Концентрация населенных пунктов и густая гидрологическая сеть в районе исследования, включая источники питьевого водоснабжения, актуализируют необходимость мониторинга состояния бентоса реки, находящейся в зоне влияния ОУХО.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Погиблиця – левый приток среднего течения р. Вятка длиной 13 км и площадью водосбора 57,3 км<sup>2</sup> [2]. Бассейн реки в пониженных местах переувлажнен и заболочен. Русло шириной до 3,5 м, глубиной до 0,4 м. Скорость течения 0,1–0,8 м/с. Грунты преимущественно песчаные, местами заиленные. В среднем течении река запружена, а ниже п. Мирный принимает очищенные сточные воды. Погиблиця – наиболее загрязненный на данной территории водоток, испыты-

вающий влияние сточных вод ОУХО, п. Мирный и отходов торфодобычи.

Материалом послужили 95 количественных и качественных проб макрозообентоса, отобранных в августе-октябре 2001, 2004–2011 гг. по традиционной методике гидробиологических исследований [3]. Пробы отбирали на четырех станциях (ст.): ст. 1 – верховье реки (фоновая), ст. 2 – в 500 м выше сброса сточных вод, ст. 3 – в 500 м ниже сброса сточных вод, ст. 4 – приустьевой участок в 2 км ниже сброса сточных вод (рис. 1).

Согласно последовательным стадиям уничтожения ОВ период исследования условно разделен на 5 этапов: I – базовый (до пуска ОУХО) – 2001–2005 гг.; II – детоксикация Vx и сжигание реакционных масс (PM) от детоксикации Vx – 2006–2008 гг.; III – детоксикация зарина и сжигание PM – 2009 г.; IV – уничтожение ипритно-люизитной смеси – 2010 г.; V – детоксикация зомана и сжигание PM – 2011 г.



Рис. 1. Район исследования. Станции отбора проб

Использовался комплекс методов, основанных на количественных и качественных характеристиках зообентосных сообществ: число видов ( $S$ ), общая численность организмов ( $N$ , экз./м<sup>2</sup>), общая биомасса организмов ( $B$ , г/м<sup>2</sup>), индексы: Гуднайта и Уитлея ( $I_{G-W}$ , %) [3], Вудивисса ( $W$ , баллы) [3]; Шеннона ( $H$ , бит/экз.) [4]. Качество воды оценивали согласно классификации ГОСТ 17.1.3.07-82 [5].

Для анализа изменения структуры зообентоценозов составлялись кластеры отклонений структур сообществ от своего начального состояния, рассчитанные на основе коэффициента биоценотической общности Жаккара ( $K_j$ ) [4]. В пространственно-временном аспекте по градиенту загрязнения водотока (р. Погиблиця) сравнивались фоновые и контрольные участки реки за 10-летний период.

Использован метод парных корреляций Пирсона ( $r$ ) структурных характеристик зообентоса ( $S$ ,  $N$ ,  $B$ ) и рассчитанных на их основе индексов с 14 химическими показателями воды р. Погиблиця (рН, химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода (БПКполное), сухой остаток, взвешенные вещества, концентрации хлоридов, сульфатов, нитратов, нитритов, иона аммония, фосфатов, железа растворенного, анионных поверхностно-активных веществ (АПАВ), нефтепродуктов). Наличие корреляции оценивалось на уровне значимости  $p \leq 0,05$  [6] при объеме выборки ( $n$ ) от 10 до 15 в зависимости от компонента. Специфические загрязнители (ОВ и продукты их деструкции) на территории исследования находились ниже предела обнаружения, поэтому взаимосвязь с ними не устанавливалась. Химанализ воды выполнен в лаборатории Регионального центра государственного экологического контроля и мониторинга по Кировской области. Статистическая обработка данных проведена в компьютерных программах Microsoft Excel 2010 и Statistica 10.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В составе бентофауны обнаружено 105 таксонов видового и надвидового рангов, относящихся к шести типам (Porifera, Cnidaria, Nematelminthes, Annelida, Mollusca, Arthropoda), 11 классам, 23 отрядам, 58 семействам.

Наиболее устойчивые донные зооценозы характерны для верхнего участка р. Погиблиця (ст. 1), которому свойственно высокое видовое разнообразие (2,3988 бит/экз.), присутствие олигозапробных видов (*Limnephilus sp.*, *Anabolia soror* McLachlan, 1875) и доминирование видов олиго- и  $\beta$ -мезосапробной группы (*Baetis rhodani* (Pictet, 1843), *Cloeon sp.*, *Potamanthus luteus* (L., 1767), *Bithynia tentaculata* (L., 1758)). На первом этапе исследований выявлено заметное ухудшение эколого-санитарного состояния воды р. Погиблиця: от чистой в верховье, слабо загрязненной в среднем течении (ст. 3, пруд п. Мирный) до умеренно загрязненной ближе к устью [7]. Отмечалось снижение биоразнообразия и возрастание роли олигохет (рис. 2).

По мере нарастания антропогенной нагрузки вниз по течению таксономическое богатство снижалось с 30 (ст. 1) до 20 (ст. 3) и 14 таксонов (ст. 4). В период функционирования ОУХО  $S$  выше очистных сооружений удерживалось на уровне 21–26 таксонов на станции и достоверно не отличалось от значений ст. 3 (18–28). Таксономический состав ст. 4 во все годы оставался

беден (10–14 таксонов), что могло быть обусловлено аккумуляцией загрязняющих веществ в донных отложениях приустьевой части реки. Снижение обилия видов на этом участке после пуска объекта (2006–2007 гг.) характеризовалось выпадением представителей наиболее чувствительных к загрязнению отрядов поденок и ручейников (*A. soror*). Таксономический минимум 2010 года, отмеченный полным отсутствием моллюсков и ручейников, совпал с этапом уничтожения мышьяксодежащих ОВ и аномально жарким летним сезоном. Наибольшую устойчивость к действию поллютантов традиционно проявили представители Tubificidae, Chironomidae, *Stylaria lacustris* Linnaeus, 1767, *Asellus aquaticus* Linnaeus, 1758, регистрировавшиеся на ст. 4 на протяжении всего периода наблюдений. В 2008–2011 гг. здесь отмечена относительно высокая встречаемость (50 %) личинок *Baetis vernus* Curtis, 1834.

Среднегодовое значение общей численности на верхнем участке (ст. 2) было 10,1 тыс. экз./м<sup>2</sup>. Ниже сброса сточных вод  $N$  существенно падала: на 31 % (ст. 3), на 63 % (ст. 4). Подобная динамика прослеживалась для среднегодовых значений общей биомассы: на ст. 2  $B=15,4$  г/м<sup>2</sup>, на ст. 3 снизилась на 51 %, на ст. 4 – на 84 %.

Минимальные величины  $B$  (<0,1 г/м<sup>2</sup>) и  $N$  (200–250 экз./м<sup>2</sup>) зафиксированы на приустьевом участке в 2006 и 2010 гг. По сравнению с показателями I этапа исследований (2005 г.) численность макрозообентоса здесь снизилась в 2006 г. в 34 раз, в 2010 г. – в 40 раз. Падение биомассы в эти годы было еще более значительным (в 150 и 100 раз, соответственно) и указывало на снижение общего продукционного потенциала и резкое ухудшение состояния бентосных сообществ. Флуктуациям количественного развития зообентоса на ст. 4 во многом способствовали колебания уровня режима: в годы с высоким уровнем воды (2007–2008 гг.) отмечено нарастание  $B$  и  $N$  олигохет [8].

В структуре макрозообентоса во все годы численно преобладали личинки хирономид и олигохеты. Нарастание доли олигохет после запуска объекта достигло максимума в 2007–2008 гг. на ст. 2–4. В 2009–2010 гг. в состав доминирующих групп вновь вошли хирономиды, вернувшие к 2011 г. численное лидерство в бентосных сообществах. Основу общей биомассы также составляли преимущественно олигохеты и личинки хирономид. В отдельные годы к ним присоединялись прочие Diptera, Isopoda, а в 2011 г. на ст. 4 – Ephemeroptera. Бентоценозы ст. 4 во все годы характеризовались

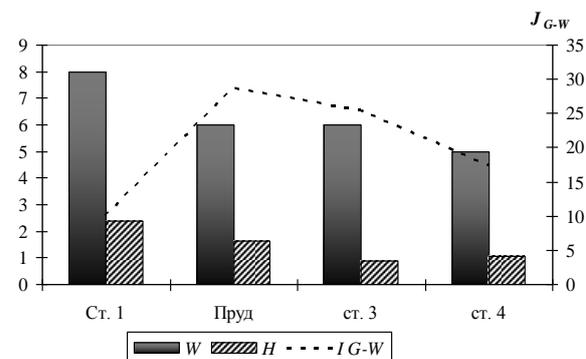


Рис. 2. Характеристики макрозообентоса на первом этапе

монодоминантной структурой, причем в 2007–2008 и 2010 гг. абсолютно доминировали олигохеты. Сообщества, расположенные выше, имели более сложную структуру.

Индекс Вудивисса выше (ст. 2) и ниже сброса сточных вод (ст. 3) за весь период наблюдений составлял 8–9 баллов (на ст. 3 в 2009 г. – 7 баллов) и соответствовал II классу качества (чисто). Средняя многолетняя величина  $W$  на ст. 4 характеризовала воду III классом (умеренное загрязнение), а наиболее низкое значение (4 балла) в 2006 г. после пуска объекта соответствовало загрязненным водам (IV класс).

Олигохетный индекс на этапе фонового обследования характеризовал воды р. Погиблицы I–II классами качества. В 2007–2008 гг. выше и ниже сброса сточных вод отмечен резкий рост  $I_{G-W}$  до V класса (грязно). Плотность олигохет местами достигала 11–17 тыс. экз./м<sup>2</sup>, что указывало на интенсивное органическое загрязнение. В 2009 г. обозначилась тенденция сокращения доли олигохет в бентосных сообществах до значений II–III классов (чистые – умеренно загрязненные воды), закрепившаяся в 2010–2011 гг. (рис. 3).

Возрастание доли олигохет, пространственно тяготеющее к ОУХО, отмечено также в бентосных сообществах р. Вятки на территории зоны защитных мероприятий (ЗЗМ) [1]. Эти факты указывали на наличие источника органического загрязнения на исследуемой территории, наибольшее воздействие которого проявилось в период 2007–2008 гг. и совпало с этапом уничтожения основной массы фосфорорганических ОБ ( $V_x$ , ~66 % всех ОБ).

Относительно низкие для рек Кировской области значения индекса Шеннона в большей мере были обусловлены чертами монодоминантности бентосных сообществ. Минимальные величины  $H$  (0,80 и 1,09 бит/экз.) наблюдались на ст. 4 в 2007 и 2010 гг. Среднее многолетнее значение  $H$  (1,47 бит/экз.) на участке выше сброса сточных вод превышало величины нижних станций, но различия были недостоверны.

Анализ отклонения структуры сообществ в 2006–2011 гг. от своего начального состояния (2005 г.) на

основе коэффициента биоценологической общности ( $K_j$ ) показал, что в приустьевом участке реки минимальные изменения произошли в 2006, 2010 гг. Наибольшие изменения приходятся на 2007, 2008 г. (рис. 4), что, на-

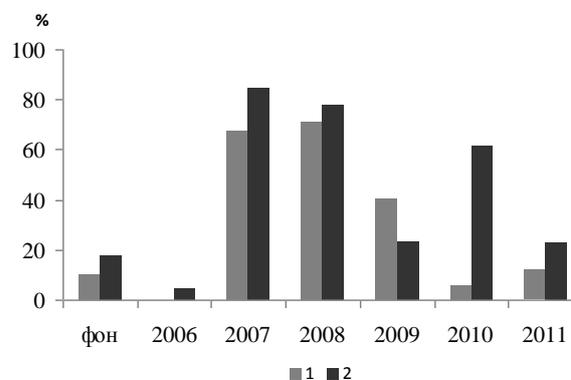


Рис. 3. Динамика олигохетного индекса р. Погиблицы: 1 – выше сброса сточных вод (ст. 2); 2 – ниже сброса (ст. 4)

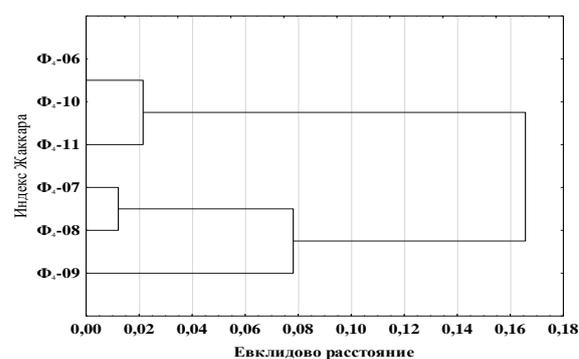


Рис. 4. Кластеры сходства состава бентофауны ст. 4 в 2006–2011 гг. с фоновым 2005 г. ( $\Phi_4$ ) на основе индекса Жаккара методом Варда

Таблица 1

Коэффициенты корреляции ( $r$ ) между структурными характеристиками макрозообентоса и гидрохимическими показателями р. Погиблицы

Показатель	$n$	$r_{кр.}$	$S$	$N$	$B$	$W$	$I_{G-W}$	$H$
pH	10	0,63	0,04	-0,18	-0,15	0,07	<b>-0,76</b>	0,48
БПК полное, мг $O_2$ /дм <sup>3</sup>	12	0,58	-0,44	0,07	-0,38	-0,42	0,21	-0,31
ХПК, мг/дм <sup>3</sup>	14	0,53	-0,34	-0,12	-0,08	<b>-0,56</b>	0,23	-0,27
Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>	15	0,51	-0,43	-0,30	-0,18	-0,36	-0,19	-0,50
Взвеш. вещества, мг/дм <sup>3</sup>	15	0,51	-0,28	0,16	-0,03	-0,22	-0,18	<b>-0,60</b>
Ион аммония, мг/дм <sup>3</sup>	15	0,51	<b>-0,56</b>	-0,26	-0,31	<b>-0,85</b>	-0,17	<b>-0,52</b>
Нитраты, мг/дм <sup>3</sup>	15	0,51	-0,08	-0,16	-0,31	-0,08	0,16	-0,17
Нитриты, мг/дм <sup>3</sup>	15	0,51	<b>-0,53</b>	-0,01	-0,31	<b>-0,60</b>	0,20	<b>-0,55</b>
Хлориды, мг/дм <sup>3</sup>	15	0,51	-0,37	-0,25	-0,33	-0,30	-0,12	-0,36
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup>	15	0,51	-0,35	-0,14	-0,30	<b>-0,52</b>	-0,13	<b>-0,60</b>
Фосфаты, мг/дм <sup>3</sup>	15	0,51	<b>-0,52</b>	-0,46	-0,39	<b>-0,52</b>	0,14	<b>-0,54</b>
Железо раствор., мг/дм <sup>3</sup>	14	0,53	-0,27	-0,32	-0,24	<b>-0,69</b>	-0,3	-0,07
АПАВ, мг/дм <sup>3</sup>	13	0,55	-0,24	0,25	-0,19	-0,45	<b>0,77</b>	-0,45
Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>	13	0,55	-0,53	-0,08	-0,53	-0,43	<b>0,60</b>	-0,29

Примечание:  $r_{кр.}$  – критическое значение коэффициента корреляции. Жирным шрифтом выделены достоверные значения ( $p \leq 0,05$ ).

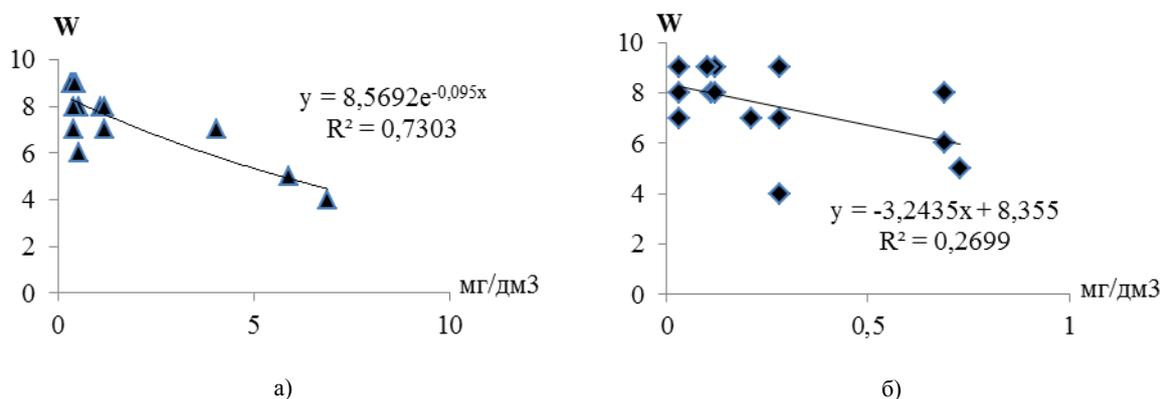


Рис. 5. Связь индекса Вудивисса,  $W$  с гидрохимическими характеристиками р. Погиблицы: а) – ион аммония; б) – фосфаты

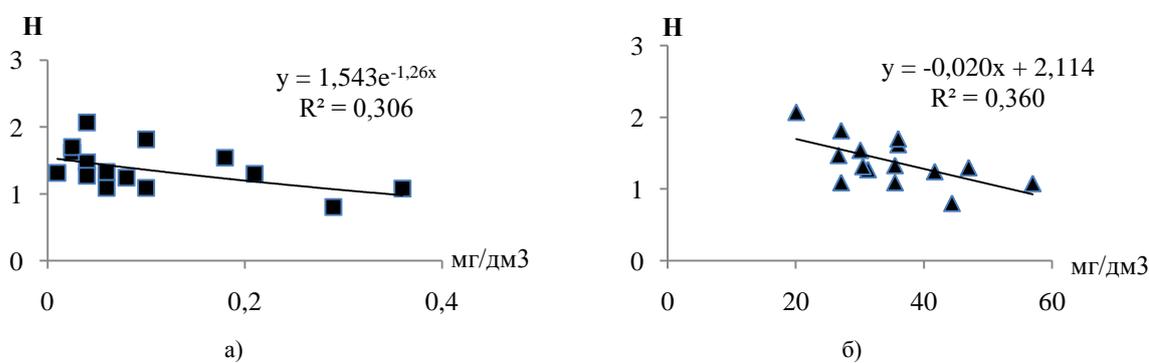


Рис. 6. Связь индекса Шеннона,  $H$  с гидрохимическими характеристиками р. Погиблицы: а) – нитриты; б) – сульфаты

ряду с нарастанием антропогенного пресса (уничтожение ОВ типа  $V_x$ ), могло быть связано и с повышением уровня режима р. Вятки, созданием зоны подпора и, как следствие, изменением условий обитания зообентоса.

Корреляционный анализ показателей развития макрозообентоса с гидрохимическими характеристиками выявил наличие достоверной обратной связи количества таксонов ( $S$ ) с концентрацией ионов аммония, нитритов, фосфатов (табл. 1). Сходные корреляции между данными показателями отмечались ранее и на других реках в ЗЗМ ОУХО [9].

Значимых корреляций численности и биомассы зообентоса с гидрохимическими показателями не выявлено. Однако эти показатели на ст. 2 и 3 достоверно снижались с повышением концентрации фосфат-иона ( $r = -0,88$  и  $-0,79$  при  $r_{кр} = 0,71$ ;  $n = 8$ ). В устьевой зоне  $B$  нарастала с повышением концентрации АПАВ ( $r = 0,996$  при  $r_{кр} = 0,88$ ;  $n = 5$ ).

Наибольшее число значимых корреляций установлено для индекса Вудивисса: обратная связь с ХПК, ионом аммония, нитритами, фосфатами и сульфатами, растворенным железом (рис. 5), что согласуется с данными по другим рекам в районе ОУХО. [9].

Доля олигохет в суммарной численности зообентоса ( $I_{G-W}$ ) отрицательно коррелировала с рН. Положительная корреляция  $I_{G-W}$  отмечена с АПАВ и нефтепродуктами. Установлена отрицательная связь индекса Шеннона ( $H$ ) с количеством взвешенных веществ, кон-

центрациями ионов аммония, нитритов, сульфатов и фосфатов (рис. 6).

Максимальное число значимых корреляций установлено для фосфат-иона с большинством гидробиологических характеристик. Часто изменения в бентоценозах были связаны с концентрациями ионов аммония и нитритов, содержание которых, наряду с фосфатами, ниже сброса сточных вод нередко превышало ПДК<sub>р.х.</sub>. Не выявлено корреляции характеристик бентосных сообществ с БПК<sub>полное</sub>, сухим остатком, нитратами и хлоридами. Из гидробиологических показателей максимальное число значимых корреляций установлено с  $W$  и  $H$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За период функционирования объекта по уничтожению химоружия общее таксономическое богатство принимающей его стоки реки оставалось относительно стабильным. Сообщества выше сброса сточных вод имели высокую плотность организмов и были достаточно устойчивы. Обедненные качественно и количественно бентоценозы нижнего течения реки характеризовались монодоминантной структурой, резкими колебаниями общей численности и биомассы.

Негативная трансформация донных сообществ в большей степени проявилась на устьевом участке р. Погиблицы и совпала с этапами уничтожения ОВ типа  $V_x$  (2006–2008 гг.) и ипритно-люизитной смеси

(2010 г.). Наблюдалось снижение таксономического богатства, видового разнообразия, индекса Вудивисса, исчезновение чувствительных к загрязнению групп организмов, резкое возрастание доли олигохет.

Средний и высокий уровень корреляций характеристик зообентоса со многими гидрохимическими показателями указывает на структурную перестройку бентоценозов под влиянием сточных вод. Увеличение содержания ионов аммония, нитритов, фосфатов сопровождалось снижением количества таксонов, индексов Вудивисса и Шеннона. Рост олигохетного индекса происходил на фоне возрастания концентраций АПАВ и нефтепродуктов.

Проявлению процессов трансформации бентосных сообществ способствовали существенные колебания уровня режима в устье реки и неблагоприятные погодные-климатические условия 2010 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кочурова Т.И., Кантор Г.Я. Макрозообентос среднего течения р. Вятка в районе уничтожения химического оружия // Биология внутренних вод. 2013. № 4. С. 52-60.
2. Каталог рек Кировской области. Киров, 1991. 34 с.
3. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 239 с.
4. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 287 с.
5. ГОСТ 17.1.3.07-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. М.: Стандартинформ, 1982. 12 с.
6. Глац С. Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1998. 459 с.
7. Шихова Т.Г. Экологическое состояние поверхностных вод окрестностей Марадыковского арсенала химического оружия по гидробиологическим показателям // Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства: материалы междунар. науч.-практ. конф. (28-31 мая 2002 г.). Киров, 2002. С. 409-411.
8. Цепелева М.Л., Шубина В.Н., Кочурова Т.И. Зообентос р. Погиблицы в районе объекта уничтожения химического оружия «Марадыковский» // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 39-46.
9. Кочурова Т.И. Зообентос водоемов бассейна р. Вятка в условиях антропогенного влияния: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Киров, 2008. 22 с.

Поступила в редакцию 6 июня 2014 г.

#### Kochurova T.I., Shikhova T.G., Tsepeleva M.L. DYNAMICS OF MACROZOOBENTHOS CONDITION ON SMALL RIVER AROUND OBJECT OF CHEMICAL WEAPON DESTRUCTION

Data of condition of the macrozoobenthos is collected in 2001–2011 on small tributary of Vyatka river near the chemical weapons destroy plant were summarized. Changes of the structural characteristics of benthic communities in response to the deterioration of water quality are identified. Negative transformation of benthic cenosis largely is coincided with the stages of the Vx and iprito-lewisite mixtures destruction. Negative correlation of the biological diversity and content of ammonium, nitrite and phosphate ions were found. Oligotech index growth against the backdrop of increasing concentrations of anionic surface-active substances (SAS) and petroleum products is occurred.

*Key words:* macrozoobenthos, bioindication, chemical weapons.

Кочурова Татьяна Ивановна, Кировский городской научно-естественный музей, г. Киров, Российская Федерация, кандидат биологических наук, зав. отделом, e-mail: kochurovati@mail.ru

Kochurova Tatyana Ivanovna, Kirov Museum of Natural Science, Kirov, Russian Federation, Candidate of Biology, Head of Department, e-mail: kochurovati@mail.ru

Шихова Татьяна Геннадьевна, Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б.М. Житкова, г. Киров, Российская Федерация, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела экологии животных, e-mail: biota.vniioz@mail.ru

Shikhova Tatyana Gennadyavna, Prof. B.M. Zhitkov All-Russian Research Institute of Hunt Management and Fur Farming, Kirov, Russian Federation, Candidate of Biology, Senior Research Worker of Animals Ecology Department, e-mail: biota.vniioz@mail.ru

Цепелева Марина Леонидовна, Вятский государственный гуманитарный университет, г. Киров, Российская Федерация, кандидат биологических наук, ассистент кафедры экологии, e-mail: marinatsepeleva@mail.ru

Tsepeleva Marina Leonidovna, Vyatka State Humanities University, Kirov, Russian Federation, Candidate of Biology, Assistant of Ecology Department, e-mail: marinatsepeleva@mail.ru