

## Оценка качества воды водоёма-охладителя Балаковской атомной электростанции методами биомониторинга

© 2008. В.Н. Чупис, Л.Л.Журавлёва, В.А. Жирнов, И.Н. Ларин, Е.А. Луцкая, Н.В.Емельянова, Е.В. Ильина, Д.Е.Иванов  
Институт промышленной экологии

В статье приведены результаты биотестирования качества воды водоёма-охладителя Балаковской АЭС. Изучено влияние проб воды на интенсивность биолюминесценции бактерий, смертность дафний и рост хлореллы. Кроме этого, изучена стабильность развития популяций бокоплавов водоёма-охладителя и акватории реки Волги. При биотестировании на дафниях пробы не оказывали острого токсического действия. При биотестировании проб на бактериях обнаружена острая токсичность у шести проб воды водоёма-охладителя. При биотестировании проб из водоёма-охладителя на хлорелле средняя степень токсичности выявлена у двух проб. Анализ характера морфологической изменчивости глаз бокоплавов показал, что данный тип изменчивости является флуктуирующей асимметрией. Установлено, что между температурой воды и стабильностью развития бокоплавов существует прямая зависимость. В пределах нормы реакции бокоплавов повышение температуры уменьшает уровень флуктуирующей асимметрии в популяции, т. е. стабильность онтогенеза возрастает. Обнаруженную в нашем исследовании большую жизнеспособность дафний и бокоплавов по сравнению с бактериями и хлореллой, по-видимому, можно объяснить негативным влиянием на одноклеточные организмы высокой концентрации солей водоёма-охладителя Балаковской АЭС.

The article contains the results of water biotesting in the cooling-reservoir of Balakovo NPS. The influence of water-samples on bio-luminescence, daphnia death-rate, and chlorella growth is investigated. The stability of amphipods population development in the cooling-reservoir and within the Volga water surface is considered. In the process of bio-testing the samples did not produce acute toxic effect on daphnia, while six cooling-reservoir water samples had acute toxic impact on bacteria. During biotesting the influence of the cooling-reservoir samples on chlorella average toxicity degree of two samples was found out. The analysis of morphological changeability of amphipods' eyes showed that this type of changeability represents fluctuational asymmetry. It is stated that development stability of amphipods directly depends on water temperature. Within the norm of amphipods' reaction the increase of temperature causes decrease of population fluctuational asymmetry, i.e. increase of ontogenesis stability. The reason of the fact that daphnia and amphipods are more viable as compared with bacteria and chlorella may consist in the negative influence of high salt concentration in the Balakovo NPS cooling-reservoir water.

### Введение

Атомная электростанция является опасным промышленным объектом, требующим пристального внимания экологических служб. Поэтому в настоящей работе нами была проведена оценка методами биотестирования и биоиндикации качества воды водоёма-охладителя Балаковской АЭС в Саратовской области. (См. цветную вкладку).

Работа всех тепловых и атомных электростанций основана на одном принципе. Электроэнергия вырабатывается при передаче тепла от нагретого в реакторе пара к «холодильнику» – окружающей среде. При этом большая часть энергии топлива как отходы производства рассеивается в окружающей среде. В качестве наиболее доступного и удобного теплоносителя используется вода. Существует два основных способа водоснабжения станций.

При использовании закрытого способа нагретая вода для охлаждения поступает в

башню-градирню. Водоём-охладитель при этом не используется, но на крупных станциях такой метод охлаждения невыгоден.

В открытом способе в качестве холодильника используется водоём-охладитель. В этом случае схема водоснабжения может быть «прямоточной», когда вода проходит охлаждающие агрегаты станции только один раз. Этот способ обычно реализуется на крупных реках или водохранилищах. Водозабор находится выше по течению от водосброса. При «оборотной» схеме вода сбрасывается в замкнутый водоём-охладитель, водосброс по возможности отдаляется от водозабора, и в агрегаты станции поступает охлаждённая вода.

Электростанции забирают из водоёмов массы воды и сбрасывают их обратно подогретыми на 8–12°C. Средний расход охлаждающей воды на 1000 МВт получаемой энергии составляет для ТЭС 30 м<sup>3</sup>/с, а для АЭС – 50 м<sup>3</sup>/с. С точки зрения расхода воды атомные электростанции менее экономичны, чем тепловые [1].

Эксплуатация водоёмов-охладителей сопровождается подогревом воды и усилением испарения с поверхности водоёмов, что приводит к изменению микроклимата прилегающей территории. В водоёме-охладителе усиливается циркуляция и перемешивание воды за счёт течений от водосброса и забора станции. Существуют и другие побочные влияния на водоём-охладитель со стороны электростанции. В водоём-охладитель могут поступать стоки с промышленной площадки станции, из цеха химической водоочистки, загрязнённые нефтепродуктами, тяжёлыми металлами, бытовыми загрязнениями [2]. Поэтому исследование качества воды в водоёмах-охладителях представляет особый интерес, как с химической, так и биологической точки зрения.

Методы биологического тестирования и индикации значительно дешевле и чувствительнее химических методов анализа. С их помощью можно оценить синергическое действие токсиантов и биологические эффекты сверхмалых концентраций.

Для оценки качества воды нами использовалась система биотестов, в которой тест-объектами являлись люминесцентные бактерии, дафнии, бокоплав и хлорелла.

### Объекты и методы исследования

Качество исследуемой воды определялось по изменению интенсивности биолюминесценции бактерий (тест-система «Эколюм») [3]. Острое токсическое действие растворов исследовалось по гашению их биолюминесценции бактерий за 30-ти минутный период экспозиции.

Влияние на рост водоросли хлореллы (*Chlorella vulgaris* Beijer) изучалось по методике [4]. Методика основана на регистрации различий в оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла, выращенной на среде, не содержащей токсических веществ (контроль) и тестируемых проб, в которых эти вещества присутствуют. Критерием токсичности воды являлось снижение на 20% (подавление роста) или увеличение на 30% (стимуляция роста) величины оптической плотности культуры водоросли, выращенной в течение 22 часов на тестируемом растворе, в сравнении с её ростом на контрольной среде, приготовленной на дистиллированной воде.

Качество проб воды определяли по смертности дафний (*Daphnia magna* Straus). Оценивали острое токсическое действие на дафний, критерием которого является гибель 50% и более тест-объектов за 96 часов [5].

Сбор бокоплавов проводился по общепринятым гидробиологическим методикам на мелководьях (до 1 м) в верхней зоне Волгоградского водохранилища и водоёме-охладителе Балаковской АЭС (БАЭС). На станциях 1–6 было взято 20 выборок и на станциях 1 и 3–5 – 10 выборок (рис. 1, табл. 1), в общей сложности исследовано 2462 особи бокоплавов. Для определения плотности популяций бокоплавов отбирались количественные пробы. Пробы фиксировали 70% спиртом. Определение видов проводили по «Атласу беспозвоночных» [6], «Определителю пресноводных беспозвоночных» [7].

Было обнаружено 10 видов бокоплавов: *Chaetogammarus warpachowskyi*, *Chaeto-*

Таблица 1

Описание мест отбора проб

№	Станции	Температура воды, °С		Тип грунта	Плотность популяций бокоплавов (ранговые значения)
		Июнь	Май		
1.	Река Балаковка, приток р. Волги, у городского водозабора	22,0	5,0	Мелкий, заиленный щебень	II
2.	Река Волга ниже БАЭС и г. Балаково	22,5	–	Песок	III
3.	Река Волга выше БАЭС и г. Балаково, мелководный прогреваемый залив	25,5	0,5	Мелкий песок	V
4.	Холодноводный канал пруда-охладителя	28,5	13,3	Песок	IV
5.	Холодноводный канал пруда-охладителя	28,6	12,6	Щебень	VI
6.	Тепловодный канал	31,5	–	Песок	I

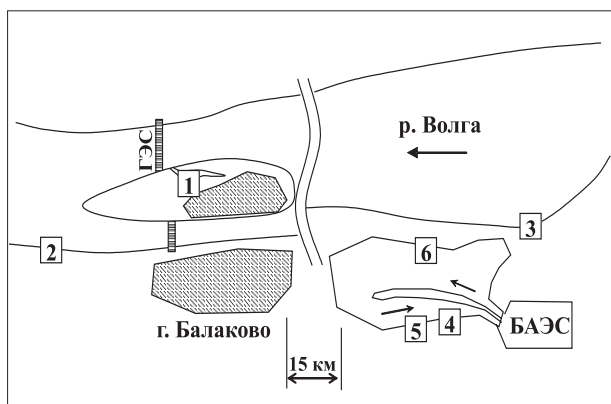


Рис. 1. Схема расположения мест (1 – 6) отбора бокоплавов для биоиндикации

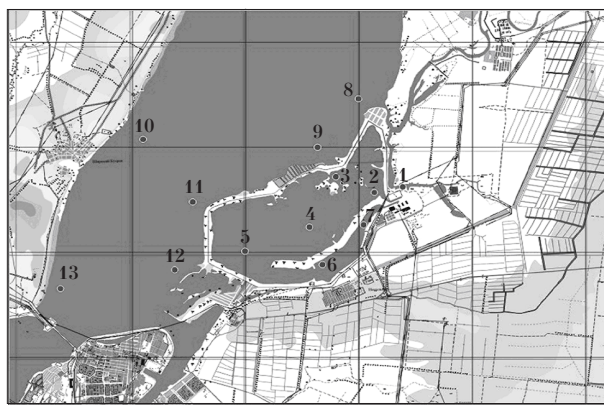


Рис. 2. Схема расположения точек отбора проб воды для биотестирования

*gammarus ischnus*, *Micruropus wohli*, *Dikergammarus caspius*, *Dikergammarus villosus bispinosus*, *Dikergammarus haemobaphes*, *Stenogammarus dzjubani*, *Pontogammarus robustoides*, *Pontogammarus sarsi*, *Iphigenella schablensis*.

При обработке проб у животных отмечались отклонения от нормальной морфологии глаз, пигментные пятна на месте обломанных конечностей и повреждения кутикулы, укороченные конечности как результат незаконченной регенерации. Уровень флуктуирующей асимметрии измеряли с использованием двух дублирующих методов: по доле асимметричных особей в выборке, а также по частоте проявления нарушений развития глаз (отношения количества глаз, ненормальной для данного вида формы или развития, к общему числу глаз в выборке). Различия между выборками при этом определялись в соответствии с реальным объемом выборки.

Для определения природы изменчивости использовались критерии В.М. Захарова (1987) [8]. Ненаправленность различий между сторонами определялись по Б.Л. Астаурову (1927) [9] с использованием  $\phi$  критерия Фишера и подтверждалось по  $z$  критерию знаков. Взаимосвязь проявления признака на правой и левой сторонах тела оценивалось по коэффициенту корреляции Фехнера ( $r_{\phi}$ ). Для подтверждения случайности сочетания проявлений признака на разных сторонах тела применялся «вероятностный подход». Достоверность различий между разными выборками по доле особей с морфологическими нарушениями при попарном сравнении проверялся по  $\phi$  критерию Фишера.

Статистическая обработка выполнена с использованием пакетов программ Excel 2000, Matcad 2000 Pro, Statistic 6.0.

## Результаты исследования и их обсуждение

### 1. Результаты биотестирования проб воды на люминесцентных бактериях, хлорелле и дафниях.

Карта-схема водоёма-охладителя Балаковской АЭС с указанием точек отбора проб для биотестирования воды приводится на рисунке 2.

При биотестировании проб (№ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 16) на бактериях обнаружена острая токсичность у шести проб воды № 2, 3, 4, 5, 6, 7 водоёма-охладителя (табл. 2). Острая токсичность отсутствует у проб № 1, 8, 9, 11, 12, 16. Точка № 1 находится в районе насосной станции подпитки водоёма-охладителя АЭС, а точки № 8, 9, 11, 12, 16 находятся в акватории реки Волги и вода там чище, чем в других местах отбора проб (рис. 2).

Кроме этого, проведено биотестирование семи проб из водоёма-охладителя (№ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) на культуре хлореллы (*Chlorella vulgaris*). Установлено, что пробы № 1, 2, 6, 7 – слаботоксичны, № 4, 5 – среднетоксичны и № 3 – сильнотоксичная (табл. 3).

При биотестировании на дафниях пробы не оказывали острого токсического действия (табл. 4). Однако имелась тенденция большей смертности дафний в пробах из водоёма-охладителя (точки № 2, 3, 4, 5, 6, 7) по сравнению с пробами из акватории реки Волги (8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16).

Таким образом, результаты биотестирования (табл. 2–4) показали, что при определении токсичности воды из водоёма-охладителя наиболее чувствительными тест-объектами являлись люминесцентные бактерии и хлорелла (табл. 2, 3; точки 2–7). В то же время, вода в этих же точках не оказала токсического влияния на дафнии (табл. 4).

Результаты биотестирования проб воды (тест-система «Эколюм»)

№ точек	Степень разбавления тестируемых вод, %	Индекс токсичности (Т)	Группа токсичности
1	100	0	Проба не токсична
2	100	65,91	Проба сильно токсична
3	100	78,38	Проба сильно токсична
4	100	58,07	Проба сильно токсична
5	100	86,28	Проба сильно токсична
6	100	78,65	Проба сильно токсична
7	100	88,38	Проба сильно токсична
8	100	0	Проба не токсична
9	100	0	Проба не токсична
11	100	0	Проба не токсична
12	100	0	Проба не токсична
16	100	0	Проба не токсична

Примечание. Группы токсичности: 1) не токсичная –  $T < 20$ ; 2) токсичная  $20 < T < 50$ ; 3) сильно токсичная –  $T > 50$

## 2. Результаты изучения изменений флуктуирующей асимметрии у бокоплавов.

Статистически значимых различий уровня флуктуирующей асимметрии между выборками, взятыми весной, обнаружено не было. Это, возможно, связано с их небольшим объёмом, и с большей однородностью условий среды внутри водоёма. Между более объёмными летними пробами отмечен ряд статистически значимых различий (табл. 5). Флуктуирующая асимметрия считается показателем стабильности развития, неспецифически возрастающим при любом стрессовом воздействии на организм. Уровень этого показателя в популяциях, расположенных на экологической и географической периферии ареала вида, обычно выше, нежели в центральных и благополучных популяциях. В географически удаленных друг от друга популяциях уровень флуктуирующей асимметрии может значительно отличаться в силу ряда причин: центрального или периферического положения популяции в пределах ареала, климатических особенностей и т. д. Отбор проб проводился на станциях, располагающихся на относительно небольшом удалении друг от друга (около 15 км, см. рис. 1), что позволило избежать влияния на результат различий между географически удаленными популяциями. Поэтому можно утверждать, что все различия стабильности развития между особями из разных популяций наблюдались в силу локального действия экологических факторов. Различия уровня флуктуирующей асимметрии в разных популяциях могут также объясняться различ-

ной плотностью животных в них. Между ними обычно отмечается положительная зависимость [8].

У бокоплавов (*Ch. warpachowskyi*) наименьший уровень флуктуирующей асимметрии отмечен на станциях с максимальной и минимальной плотностью популяции. (см. табл. 5). Наибольшее же количество асимметричных особей обнаружено со средними значениями численности. Соответствие между плотностью популяции и уровнем флуктуирующей асимметрии хорошо прослеживается у бокоплавов (*P. robustoides*), противоположная картина наблюдается у бокоплавов (*St. dzjubani*). Если бы фактор численности оказывал существенное влияние на стабильность развития бокоплавов, то следовало бы ожидать какой-либо взаимосвязи между ними. Однако четкой зависимости между этими популяционными показателями не наблюдается, т. е. фактор численности невозможно отнести к определяющим и влияние его на развитие бокоплавов незначительное.

Нами был зарегистрирован низкий уровень флуктуирующей асимметрии в популяциях бокоплавов, обитающих в водоёме-охладителе, по сравнению с волжскими популяциями.

В силу специфики водоёма-охладителя в него постоянно поступают избыточные количества тепла. В результате его гидрологические и гидрохимические характеристики сильно отличаются от фоновых значений в прилежащих водоёмах. Следствием постоянного испарения с поверхности считается избыточное содержание минеральных солей

в нем. Температура держится в среднем на 10°С выше, чем в водоёмах с естественным температурным режимом. Столь значительная разница в условиях обитания существенно сказывается на развитии организмов. Избыточная солёность накладывает отпечаток на существование бокоплавов в водоёме-охладителе БАЭС. Большинство обитающих в нём видов бокоплавов – эвригалитные виды, относительно недавно совершившие экспансию в пресные водоёмы. Они нашли для своего развития в водоёме-охладителе более благоприятные условия.

Их развитие в водоёме статистически значительно стабильнее, чем в пресной воде р.Волги. Однако не все достоверные различия в уровне флуктуирующей асимметрии между выборками объясняет эта гипотеза. Так, в пределах водоёма-охладителя содержание солей на разных станциях не имеет существенных отличий, но стабильность развития в выборках с разных станций значительно различается.

Все статистически достоверные случаи различия уровня флуктуирующей асимметрии отмечены между выборками со станций

Таблица 3

Результаты экотоксикологических исследований проб воды с использованием тест-объекта *Chlorella vulgaris*

№ точек	Концентрация тестируемых вод, %	Результаты анализа (оптическая плотность)	Процентное отклонение от контроля	Оценка качества исследованной среды
1	100	0,203	34	Слаботоксична
	33	0,363	-17	
	11	0,330	-7	
	3,7	0,314	-2	
	1,2	0,324	-5	
2	100	0,159	27	Слаботоксична
	33	0,190	14	
	11	0,196	9	
	3,7	0,190	14	
	1,2	0,191	11	
3	100	0,057	70	Сильнотоксична
	33	0,076	60	
	11	0,077	60	
	3,7	0,085	56	
	1,2	0,159	17	
4	100	0,051	79	Среднетоксична
	33	0,175	28	
	11	0,267	10	
	3,7	0,251	4	
	1,2	0,257	6	
5	100	0,058	79	Среднетоксична
	33	0,200	27	
	11	0,242	11	
	3,7	0,230	15	
	1,2	0,269	1	
6	100	0,077	68	Слаботоксична
	33	0,235	3	
	11	0,245	-1	
	3,7	0,236	3	
	1,2	0,264	-9	
7	100	0,035	87	Слаботоксична
	33	0,222	15	
	11	0,265	2	
	3,7	0,260	0	
	1,2	0,265	2	

Примечание: (-) – активация роста *Chlorella vulgaris* по сравнению с контролем

Результаты экотоксикологических исследований с применением *Daphnia magna*

№ пробы	Концентрация тестируемых вод, %	Результаты анализа (смертность, %)	Оценка тестируемой пробы
1	100	7	Не оказывает острое токсическое действие
	30	4	
	1	0	
2	100	10	Не оказывает острое токсическое действие
	30	7	
	1	0	
3	100	0	Не оказывает острое токсическое действие
	30	0	
	1	0	
4	100	10	Не оказывает острое токсическое действие
	30	7	
	1	0	
5	100	0	Не оказывает острое токсическое действие
	30	0	
	1	0	
6	100	7	Не оказывает острое токсическое действие
	30	4	
	1	0	
7	100	13	Не оказывает острое токсическое действие
	30	9,3	
	1	0	
8	100	0	Не оказывает острое токсическое действие
	30	0	
	1	0	
9	100	0	Не оказывает острое токсическое действие
	30	0	
	1	0	

с различной температурой. При этом уровень стабильности развития бокоплавов значимо выше на участках водоёмов с более высокой температурой. Этот феномен можно объяснить генезисом фауны бокоплавов Волжского бассейна. Большинство исследованных нами видов относятся к понто-каспийской фауне и имеют температурный оптимум выше, чем у древнепресноводных видов. Следует отметить, что в жаркие летние месяцы эти ракообразные отсутствовали в непосредственной близости от водосброса БАЭС, где температура воды достигала 37–40 °С. Этот феномен связан с их высокой оксифильностью. Летом бокоплавов находили оптимальные условия для своего развития на значительном удалении от БАЭС при температуре воды не более 32 °С.

Для многих видов животных обнаружены циклические сезонные изменения уровня флуктуирующей асимметрии в популяциях [9], обычно связанные с различием стабильности развития особей разных генераций. Подобное явление обнаружено нами

у большинства исследованных видов. Уровень флуктуирующей асимметрии в летних выборках выше, чем в весенних (табл. 5).

Радиационная обстановка в г. Балаково и районе БАЭС соответствует уровню естественных фоновых значений для европейской части страны и уровню, который был до строительства станции и составляет от 8 до 15 мкР/ч [10].

Связь стабильности развития бокоплавов с температурным режимом водоемов и другими факторами среды может оказаться перспективной для экологических и биомониторинговых исследований. В дальнейшем представляется перспективным выяснение последовательности экспансии видов понто-каспийской фауны на север в межледниковые периоды. На основании таких данных можно прогнозировать трансформацию таксоценозов бокоплавов как естественных водоемов в условиях многолетних климатических изменений, так и техногенных при изменении режима их эксплуатации.

Анализ характера морфологической изменчивости глаз бокоплавов показал, что

Таблица 5

Различие уровня флуктуирующей асимметрии в выборках особей весенней и летней генераций

Вид	№ станции	Количество особей в выборке	Частота асимметричных особей, %	Частота проявления признака, %
<i>Ch. ischnus</i>	5	8	37,5	31,3
		31	16,1	8,1
<i>Ch. warpachowskyi</i>	4	231	23,8	17,7
		121	18,2	11,6
<i>D. villosus</i>	5	138	10,1	7,6
		44	2,3	1,1
<i>P. robustoides</i>	1	17	5,9	5,9
		60	6,7	4,2
<i>P. sarsi</i>	3	54	18,5	13,9
		20	5,0	2,5
<i>St. dzjubani</i>	3	69	8,7	6,5
		24	8,3	4,2
<i>M. wohli</i>	4	441	8,6	6,8
		374	13,6	9,4
		112	13,4	8,9
		31	9,7	4,8

Примечание: весенняя (над чертой) и летняя (под чертой) генерации

Таблица 6

Гидрохимический состав воды водоёма-охладителя БАЭС (мг/л)

Место	pH	Жёсткость воды, мг экв/дм <sup>3</sup>			SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SiO <sub>2</sub> <sup>2-</sup>
		Общая	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>						
Холодноводный канал	8,15	6,87	2,97	3,90	270,00	161,17	0,09	0,72	0,39	0,54
Тепловодный канал	8,18	7,17	3,18	4,20	271,33	161,90	0,08	0,72	0,40	0,75
Водоём-охладитель	8,42	6,63	3,37	3,27	212,67	165,17	0,24	0,96	–	0,67
р. Волга выше БАЭС	8,08	3,18	2,13	1,05	69,43	24,33	0,06	0,44	–	–
р. Волга ниже БАЭС	8,03	3,52	2,13	1,04	72,63	25,00	0,16	0,64	–	–

Место	O <sub>2</sub>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Соле-содержание	Нефте-продукты
Холодноводный канал	10,80	172,33	6,80	0,12	0,01	932,13	0,04
Тепловодный канал	10,80	170,67	6,83	0,11	0,01	941,77	0,04
Водоём-охладитель	11,60	151,50	7,07	0,25	0,02	832,00	0,04
р. Волга выше БАЭС	12,42	19,23	2,87	0,25	0,01	304,30	0,53
р. Волга ниже БАЭС	10,57	21,00	2,83	0,21	0,06	303,57	0,53

данный тип изменчивости является флуктуирующей асимметрией. Установлено, что между температурой воды и стабильностью развития бокоплавов существует прямая зависимость. В пределах нормы реакции бокоплавов повышение температуры уменьшает уровень флуктуирующей асимметрии в популяции, т. е. стабильность онтогенеза возрастает.

Содержание солей в водоёме-охладителе Балаковской АЭС почти в три раза выше, чем в реке Волге (табл. 6). Высокая концентрация солей в воде может оказывать негативное влияние на одноклеточные организмы. По-видимому, этим можно объяснить обнаруженную в нашем исследовании большую жизнеспособность дафний и бокоплавов по сравнению с бактериями и хлореллой.

### Литература

1. Балаковская АЭС. Оценка воздействия на окружающую среду. 1991. 495 с.
2. Гидробиология водоёмов-охладителей тепловых и атомных электростанций Украины / Протасов А.А., Сергеева О.А., Кошелева С.И. и др. / Киев.: Наук. думка, 1991. 192с.
3. ПНД ФТ 14.1:2:3:4. 11-04/ 16.1:2:3:3.8-04. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению интенсивности бактериальной биолюминесценции тест-системой «Эколюм».
4. ФР 1.39.2004.01143. Методика определения токсичности проб поверхностных пресных, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных вытяжек из почвы, осадков сточных вод и отходов по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris beiger*).
5. ФР 1.39.2007.03222. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний.
6. Гресе И.И. Бокоплавов. Фауна Украины. Т. 26. Высшие ракообразные. Вып. 5. Киев: Наукова Думка, 1985. 171 с
7. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. Л., 1977. 510 с.
8. Захаров В.М. Асимметрия животных (популяционно-феногенетический подход). М.: Наука, 1987. 216 с.
9. Захаров В.М., Баранов А.С., Борисов В.И. и др. Здоровье среды: методика оценки. М.: Центр экологической политики России, 2000. 68 с.
10. [www.balaes.ru](http://www.balaes.ru)