

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АТТЕСТОВАННЫХ БИОТЕСТОВ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ ВОД СОВРЕМЕННЫМИ ГЕРБИЦИДАМИ: МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Олькова А. С., Березин Г. И.

STUDY ON THE SENSITIVITY OF CERTIFIED BIOASSAYS TO WATER POLLUTION WITH MODERN HERBICIDES: MODEL EXPERIMENTS

Olkova A. S., Berezin G. I.

Аннотация.

Введение: гербициды имидазолиноны и производные пиридина являются современными препаратами для борьбы с сорняками. К их преимуществам специалисты относят возможность применения как для почвы, так и для растений, широкий спектр действия против нежелательных растений, защиту полей в течение всего вегетационного сезона. Производители заявляют об экологичности использования гербицидов последнего поколения за счет их быстрой деструкции в окружающей среде. Однако в различных исследованиях показано, что применение современных гербицидов воздействует как на микроорганизмы, так и на крупных животных. Следовательно, диагностика гербицидного загрязнения в почве и водных объектах является актуальной задачей. **Методы:** в работе мы исследовали воздействие на живые организмы имидазолинонов (имазетапир и имазамокс) и производных пиридина (смесь клопиралида и пиклорама). Эти вещества рекомендованы к применению в системе «чистого поля» (Clearfield system). Коммерческие формы препаратов (водные растворы) произведены в России и Республике Беларусь под торговыми марками «Родимич» (имазамокс), «Гольф ВК» (имазетапир), «Актеон» (смесь клопиралида и пиклорама). Для расчетов использовали ПДК для воды действующих веществ: для имазетапира — 0,01 мг/л, для клопиралида и пиклорама — 0,04 мг/л, для имазамокса — 0,004 мг/л. Практическая задача состояла в определении чувствительности биотестов, аттестованных в России, к этому специфическому загрязнению. Сравнивали чувствительность биотестов по смертности *Daphnia magna*, *Ceriodadhnia affinis*, хемотаксису *Paramecium caudatum*, изменению биолюминесценции *Escherichia coli*. Дополнительно оценивали хронические эффекты для *D. magna*. **Результаты:** рачки *D. magna* и *C. affinis* оказались нечувствительными к исследуемым веществам. Гибель *C. affinis* наступала в ответ на дозы 350 ПДК, а для *D. magna* летальными оказались добавки, равные 300 ПДК. Было установлено, что опасность гербицидов для этих гидробионтов увеличивается в ряду Имазетапир < Клопиралид + Пиклорам < Имазамокс. Биотесты по предлетальным реакциям микроорганизмов *P. caudatum* и *E. coli* оказались чувствительнее. Смесь клопиралида и пиклорама угнетала тест-функции микроорганизмов в от-

Abstract.

Introduction: Imidazolinone herbicides and pyridine derivatives are modern weed control products. Experts attribute the possibility of introducing into the soil and on plants, wide spectrum of action against undesirable plants, and protection of fields throughout the growing season to their advantages. Manufacturers claim the environmental friendliness of using the latest generation of herbicides due to their rapid destruction in the environment. But various studies have shown that the use of modern herbicides affects both microorganisms and large animals. Therefore, diagnostics of herbicide contamination in the soil and water bodies is an urgent task. **Methods:** We studied the effects of imidazolinones (imazetapir and imazamox) and pyridine derivatives (a mixture of clopyralid and picloram) on living organisms. Those substances are recommended for use in the Clearfield system. Commercial forms of preparations (aqueous solutions) were produced in the Russian Federation and the Republic of Belarus under the Rodimich (imazamox), Golf VK (imazetapir), Akteon (a mixture of clopyralid and picloram) trademarks. For the purposes of calculation, the following maximum allowable concentrations (MAC) in water were taken: for imazetapir — 0.01 mg/l, for clopyralid and picloram — 0.04 mg/l, for imazamox — 0.004 mg/l. The practical task was to determine the sensitivity of bioassays certified in Russia to this specific pollution. We compared the sensitivity of bioassays in terms of mortality of *Daphnia magna* and *Ceriodadhnia affinis*, *Paramecium caudatum* chemotaxis, and *Escherichia coli* bioluminescence changes. Additionally, we rated chronic effects for *D. magna*. **Results:** Crustaceans *D. magna* and *C. affinis* were not sensitive to the test substances. Death of *C. affinis* occurred in response to doses of 350 MAC, and for *D. magna*, supplements equal to 300 MAC were lethal. Experiments showed that the threat of herbicides to these aquatic organisms increased in the following series: imazetapi < < clopyralid + picloram < imazamox. The bioassays for the prelethal reactions of microorganisms *P. caudatum* and *E. coli* were more sensitive. A mixture of clopyralid and picloram inhibited the test functions of microorganisms in response to a minimum dose of 1 MAC (using clopyralid). The negative effect of imazetapir on ciliates started with 10 MAC, on *E. coli* — with 50 MAC. Imazamox was the safest. It had an effect only at a

вет на минимальную дозу 1 ПДК (в расчете на клопиралид). Негативное действие имазетапира на инфузорий началось с 10 ПДК, на *E. coli* — с 50 ПДК. Наиболее безопасным оказался имазамокс, оказывающий эффект при дозе 50 ПДК. В итоге для *P. caudatum* и бактерий тест-системы «Эколюм» справедлив ряд возрастания опасности действующих веществ в препаратах: имазамокс («Родимич») < Имазетапир («Гольф ВК») < Клопиралид + пиклорам («Актеон»). В хронических опытах с *D. magna* было показано, что современные гербициды вызывают задержку созревания самок *D. magna* и более позднее появление молоди по сравнению с контролем (на 1–2 дня). В результате за 24 дня эксперимента плодовитость *D. magna* была достоверно угнетена в ответ на действие доз в диапазоне от 1 до 50 ПДК в 1,3–1,8 раз ($p < 0,05$). **Заключение:** опыты показали, что чувствительность четырех биотестов к гербицидам имазетапиру, имазамоксу, смеси клопиралида и пиклорама можно представить следующим рядом: биотест по изменению хемотаксиса *P. caudatum* > биолуминесцентный биотест с бактериальным препаратом «Эколюм» > биотест по гибели *C. affinis* > биотест по гибели *D. magna*.

Ключевые слова: биотестирование, *Daphnia magna*, *Ceriodadhnia affinis*, *Paramecium caudatum*, *Escherichia coli*, загрязнение воды, имазамокс, имазетапир, клопиралид, пиклорам.

Введение

Промышленность и сельское хозяйство являются главными источниками антропогенного воздействия на окружающую среду [5]. Загрязняющие вещества промышленности связаны со спецификой производства, тогда как сельскому хозяйству всего мира присущи такие приоритетные загрязнители, как минеральные формы фосфора, азота, а также пестициды различного спектра действия. Отказ от химических агромероприятий в сельском хозяйстве на сегодняшний день практически невозможен, поэтому ученые уделяют особое внимание разработке новых поколений удобрений, пестицидов и изучению их действия на компоненты природной среды и биоту [23, 25].

В Федеральном законе РФ «О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами» [4] определено, что пестициды — это химические или биологические препараты, используемые для борьбы с вредителями и болезнями растений, сорными растениями, вредителями хранящейся сельскохозяйственной продукции, бытовыми вредителями и внешними паразитами животных, а также для регулирования роста растений, предуборочного удаления листьев (дефолианты), предуборочного подсушивания растений (де-

dose of 50 MAC. As for *P. caudatum* and Ecolum test system bacteria, the following series of risk increase regarding the active ingredients in preparations is valid: imazamox (Rodimich) < < imazetapir (Golf VK) < < clopyralid + picloram (Akтеon). In chronic experiments with *D. magna*, it was shown that modern herbicides caused a delay in the maturation of females *D. magna* and later appearance of the young in comparison with the control (by 1–2 days). As a result, in 24 days of the experiment, the fertility of *D. magna* was significantly depressed in response to doses in the range from 1 to 50 MPC — by 1.3–1.8 times ($p < 0.05$). **Conclusion:** The experiments showed that the sensitivity of the four bioassays for imazetapir, imazamox, and the mixture of clopyralid + picloram could be represented by the following series: the bioassay for changes in chemotaxis of *P. caudatum* > the bioassay of bioluminescence reduction in *E. coli* > the bioassay for the mortality of *C. affinis* > the bioassay for the mortality of *D. magna*.

Keywords: bioassay, *Daphnia magna*, *Ceriodadhnia affinis*, *Paramecium caudatum*, *Escherichia coli*, water pollution, imazamox, imazetapir, clopyralid, picloram.

сиканты). Современные препараты чаще всего имеют относительно невысокий класс опасности для окружающей среды (3 или 4), при этом оказывают искомое действие в низких дозах, а также разрушаются под воздействием естественных факторов (света, влажности, температуры).

Одними из наиболее востребованных классов пестицидов, применяемых во многих видах растениеводства, являются гербициды — препараты для уничтожения сорных растений. Современные гербициды, как заявляют производители, не оказывают губительного действия на насекомых, например, пчел, а также на другие виды животных, то есть действуют избирательно на растения. Тем не менее, существует опасность негативного действия пестицидов на живые организмы агроэкосистемы, например, педобионтов или гидробионтов ближайших водоёмов. Эта проблема обсуждается в отношении пресноводных экосистем различных стран [12, 16]. При выращивании риса водные объекты становятся источниками вторичного поступления гербицидов и их органических остатков на поля [20]. После применения многих современных гербицидов требуется применять меры рекультивации почв [21].

Действие гербицидов последнего поколения на основе имидазолинонов и производных пиридина, рассматриваемых нами в работе, активно изучаются учеными. В недавнем исследовании показана повышенная стереоселективная биологическая активность R-имидазолинонов в отношении *Echinochloa crus-galli* и *Microcystis aeruginosa* [24]. В модельных мезокосмах с фитопланктонным сообществом группой ученых было показано, что смесь гербицидов имзапирфимазапик (Kifix®) оказывает более выраженное токсическое действие в первые дни приме-

нения и максимально влияет на микроводоросли Cyanophyceae, Chlamydothryxaceae и Chlorophyceae [22]. В статье [19] продемонстрировано, что хотя имидазолиноновые гербициды нацелены на отсутствующий у животных фермент ANAS, обнаружены острые токсические эффекты у пятнистой рамдии из отряда Сомообразных (*Rhambdia quelen*) по его жизненно важным функциям иммунной защиты, обмена веществ, ионорегуляции и нейротрансмиссии.

В представленной работе нами оценивалась чувствительность четырех методов биотестиро-

Таблица 1

Характеристика исследованных гербицидов

Характеристика препарата	Гольф ВК	Актеон	Родимич
Действующее вещество	Имазапир C ₁₅ H ₁₉ N ₃ O ₃ (Имидазолиноны)	Клопиралид + пиклорам (производные пиридина)	Имазамокс C ₁₅ H ₁₉ N ₃ O ₄ (Имидазолиноны)
Препаративная форма	Водорастворимый концентрат	Водный раствор	Водный раствор
ПДК [3]	0,01 мг/л	клопиралид 0,04 мг/л пиклорам 0,04 мг/л	0,004 мг/л
Содержание действующего вещества, г/л	100	267 + 67	40
Механизм действия	Ингибирование синтеза белка в чувствительных растениях, что приводит к замедлению и прекращению роста их клеток	Замещение натуральных гормонов растения, нарушают процессы дыхания клеток и блокируют точки роста тканей меристем, что приводит к значительным нарушениям ростовых процессов в растениях и их гибели	Подавление образования незаменимых аминокислот валина, лейцина и изолейцина, нарушение синтеза белка и нуклеиновых кислот. В результате прекращается деление клеток и чувствительные растения отмирают
Класс опасности	3	3	3
Регистрант	ООО «Форвард», ООО «Шанс», ООО «АГРОДИМ» (Россия)	ООО «Форвард», ООО «АГРОДИМ» (Россия)	ООО «Форвард», ООО «Франдеса» (Республика Беларусь)
Регистрационный номер	042(275)-03-737-1	042(275)-03-823-1	297(042)-03-1240-1
Дата окончания срока регистрации	13.06.2023	27.10.2025	26.09.2026
Преимущества для сельского хозяйства	Обладает высокой эффективностью как при внесении в почву, так и по вегетирующим растениям. Одна обработка обеспечивает эффективную защиту посевов в течение всего вегетационного периода	Эффективная защита посевов от проблемных сорняков, в том числе подмаренника цепкого в течение всего вегетационного периода. Широкий диапазон сроков применения (вплоть до появления цветочных бутонов). Уничтожает не только надземные части, но и корневую систему многолетних сорняков, включая почки возобновления и корневые отпрыски. Не снижает эффективности даже в неблагоприятных условиях среды	Эффективно уничтожает широкий спектр однолетних злаковых и двудольных сорняков, а также некоторых многолетних. Сдерживает «вторую волну» сорняков за счет продолжительного экраняющего действия

вания, допущенных для экологического контроля и мониторинга в Российской Федерации, к загрязнению водных сред современными гербицидами.

Методы и материалы

В исследовании были испытаны три гербицидных препарата, применяемых в настоящее время в сельском хозяйстве. Два препарата (на основе имидазолинонов) в мировой сельскохозяйственной практике рекомендованы в системе «чистого поля» (Clearfield system) [13]. Их особенности приведены в табл. 1.

Оценку чувствительности к выбранным препаратам четырех аттестованных методик биотестирования проводили в модельном эксперименте. В природную подземную воду питьевого качества вводились добавки гербицидных препаратов в диапазоне от 1 до 300 ПДК методом последовательного разбавления маточного раствора. Далее проводили биотестирование свежеприготовленных модельных вод, загрязненных гербицидами. Использовали два экспресс-метода: биотест по изменению хемотаксической реакции инфузорий *Paramecium caudatum* Ehrenberg (1838) [9] и биолюминесцентный тест с использованием препарата «Эколюм» на основе условно непатогенного штамма *Escherichia coli* Migula (1895) [6]. Для сравнения чувствительности методов по предлетальным эффектам применили два «дафние-вых» теста: по смертности *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (1900) [1] и по плодovitости *Daphnia magna* Straus (1820) [2].

Результаты и обсуждение

Низшие ракообразные *D. magna* — это тест-организм, используемый для биотестирования во всем мире. Метод определения токсичности по гибели дафний можно считать базовым, результаты которого будут ориентиром для установления действующих доз с помощью других биотестов [8]. В соответствии с этим в первую очередь были установлены нелетальные и летальные дозы гербицидов по смертности *D. magna*. Параллельно определили чувствительность *C. affinis* к модельным водным растворам тестируемых веществ (табл. 2).

Чувствительность низших ракообразных к тестируемым веществам оказалась достаточно низкой, что характерно для современных гербицидов, а также является положительным фактом для их активного использования в сельском хозяйстве. Полная гибель *D. magna* была выявлена только в ответ на добавки гербицидов, равные 300 ПДК. Цериодафнии, в силу биологических особенностей, являются тест-организмами, более чувствительными к органическому загрязнению, поэтому летальные эффекты проявились в ответ на меньшие дозы. Несмотря на низкую чувствительность дафний и цериодафний к гербицидам, удалось определить, что их опасность для данных гидробионтов увеличивается в ряду Имазетапир < Клопиралид + пиклорам < Имазамокс.

Далее модельные растворы были протестированы с помощью инфузорий и бактериально-го препарата «Эколюм». Действующие дозы для двух видов рачков оказывали максимальное токсическое действие на микроорганизмы, поэтому для сравнения их чувствительности к гербицидному загрязнению водной среды испытывались добавки 1, 10 и 50 ПДК действующих веществ (табл. 3).

В тестируемом диапазоне концентраций для большинства проб наблюдалось закономерное увеличение индексов токсичности в ответ на повышение дозы действующего вещества. Только при испытании растворов с добавками имазамокса («Родимич») наблюдали снижение токсичности от 1 к 10 ПДК. Это может быть связано как с нелинейными токсикологическими эффектами [18], так и с временной стимуляцией двигатель-

Таблица 2

Результаты определения острого токсического действия гербицидов в биотестах по смертности *D. magna* и *C. affinis*

Вариант	Доза		Смертность ракообразных, %	
	мг/л	Кратность ПДК	<i>D. magna</i>	<i>C. affinis</i>
Имазетапир («Гольф ВК»)	0,5	50	0	25±10
	1,5	150	0	100
	3	300	100	100
Клопиралид + пиклорам («Актеон»)	2	50	0	40±16
	6	150	46,6±18,4	100
	12	300	100	100
Имазамокс («Родимич»)	0,2	50	0	65±26
	0,6	150	63,3±25,3	100
	1,2	300	100	100

Таблица 3

Ответные реакции *P. caudatum* и тест-системы «Эколюм» на гербициды

Вариант	Доза		В биотесте по <i>P. caudatum</i>		В биотесте по «ЭКОЛЮМ»	
	ПДК	мг/л	Индекс токсичности, у.е.	Группа токсичности	Индекс токсичности, у.е.	Группа токсичности
Имазетапир («Гольф ВК»)	1	0,01	0,24±0,02	I	6,5±1,5	I
	10	0,1	0,68±0,06	II	8,4±1,6	I
	50	0,5	0,94±0,01	III	32,5±0,9	II
Клопиралид + пиклорам («Актеон»)	1	0,04	0,52±0,05	II	0 (-56,9±13,7)	I
	10	0,4	0,60±0,07	II	0 (-23,2±6,0)	I
	50	2	0,94±0,02	III	41,2±3,1	III
Имазамокс («Родимич»)	1	0,004	0,29±0,05	I	0 (-19,9±4,5)	I
	10	0,04	0,04±0,01	I	0 (-12,7±6,5)	I
	50	0,2	0,92±0,02	III	20,4±6,5	II

Примечание: обозначение групп токсичности для теста по *P. caudatum*: I — допустимая степень токсичности, II — умеренная степень токсичности, III — высокая степень токсичности; обозначение групп токсичности для биолюминесцентного теста: I — проба нетоксична, II — проба среднетоксична, III — проба сильнотоксична.

ной активности инфузорий при добавке относительно невысокой дозы в 10 ПДК.

В целом инфузории *P. caudatum* оказались более чувствительными тест-организмами к гербицидному загрязнению, чем бактерии «Эколюм». Добавки всех веществ, равные 50 ПДК, приводили к угнетению хемотаксиса инфузорий до уровня III группы токсичности (высокая степень токсичности). Аналогичные дозы токсикантов в биотесте по тест-системе «Эколюм» привели к подобной характеристике только в варианте с препаратом, содержащим клопиралид и пиклорам («Актеон»). Однако условный порог между II и III группами токсичности ($T = 20,0$ у. е.) был преодолен в незначительной мере. Также результаты, полученные в биолюминесцентном тесте для вариантов Клопиралид + пиклорам («Актеон») и имазамокс («Родимич») 1 и 10 ПДК, свидетельствуют о стимуляции оцениваемой тест-функции. В тесте с инфузориями для всех анализируемых вариантов наблюдали угнетение ответной реакции организмов.

Отметим, что наблюдались отличия и в степени опасности тестируемых гербицидов для низших ракообразных и микроорганизмов. Для *P. caudatum* и бактерий тест-системы «Эколюм» справедлив ряд возрастания опасности действующих веществ в препаратах: имазамокс («Роди-

мич») < Имазетапир («Гольф ВК») < Клопиралид + пиклорам («Актеон»).

Дополнительно были установлены хронические токсические эффекты нелетальных доз гербицидов для *D. magna* (табл. 4).

Воздействие нелетальных доз гербицидных препаратов начало проявляться с момента созревания рачков: большинство модельных проб вызывали задержку появления выводковых камер у дафний, а затем и появление первой молоди. Обычно такое действие веществ приводит впоследствии к отклонению плодовитости от контрольных значений [7]. Эта гипотеза подтвердилась. В конце эксперимента удельная плодовитость на одну подопытную самку была снижена во всех пробах с добавками ($p < 0,05$). Также была отмечена незначительная гибель взрослых особей на 24 день эксперимента, не превышающая критических 20 % по сравнению с контрольными данными.

Отметим, что в большинстве вариантов хроническое действие доз гербицидов в диапазоне от 1 до 50 ПДК значимо не различается между собой. Это косвенно свидетельствует о том, что обнаруженное воздействие произвели не только добавленные в воду вещества, но и продукты их деструкции, что еще предстоит изучить.

Полученные результаты дополняют научный банк данных о влиянии современных гербицидов

Таблица 4

Влияние гербицидов на тест-функции *D. magna*

Вариант	Доза		Показатели			
	ПДК	мг/л	Появление выводковых камер, сутки	Появление первой молоди, сутки	Плодовитость за 24 дня, шт./взрослую самку	Смертность** в конце эксперимента, %
Контроль	0	0	7	9	12,4±1,2	0
Имазетапир («Гольф ВК»)	1	0,04	7	10	9,0±1,7*	3,3
	10	0,4	8	10	8,1±0,5*	0
	50	2	8	11	10,7±1,0	0
Клопиралид + пиклорам («Актеон»)	1	0,004	9	11	6,8±0,1*	3,3
	10	0,04	9	11	10,3±1,8	6,7
	50	0,2	9	11	7,1±0,8*	0
Имазамокс («Родимич»)	1	0,04	9	11	9,0±0,9*	0
	10	0,4	9	11	11,4±2,1	16,7
	50	2	9	11	9,3±0,3*	6,7

* Отличия от контрольных значений достоверны ($p < 0,05$); ** погрешность в пределах норматива методики [2].

на организмы различной систематики. В исследовании [10] авторы также пришли к заключению, что действующие на гидробионтов дозы во много раз выше установленных нормативов. Отмечена высокая чувствительность элодеи *Elodea canadensis*: сублетальное действие имазетапира по замедлению роста боковых и основного побегов проявилось в ответ на концентрацию 10 мг/дм³ и выше. В отличие от наших данных, авторы работы [10] приводят сведения о хроническом токсическом действии имазетапира для *D. magna*, начиная с дозы 300 мг/л. Можно предположить, что несогласованность данных вызвана различиями в химическом составе воды для моделирования загрязнения.

За рубежом также ведется поиск гидробионтов, способных сигнализировать о пестицидных, в том числе гербицидных угрозах водным объектам. На примере нильской тилляпии *Oreochromis niloticus* показана опасность производных пиридина, которые в нашем исследовании представлены смесью клопиралида и пиклорама, для ихтиофауны даже при применении в соответствии с рекомендуемыми нормами [11]. Макрофиты *Lemna minor* и *Azolla caroliniana* предлагаются в качестве биоиндикаторов гербицидного загрязнения водных объектов. Ряска *L. minor* оказалась чувствительнее к атразину, смеси бентазона и имазамокса, кломазону. Действующие дозы для ряски лежали в диапазоне 0,1–118 мг/дм³ для разных веществ [17]. Чувствительность *L. minor* к имазапиру подтверждается данными биотестирования: в 7-дневном тесте LD50 составила все-

го 1,06 мг/дм³ [15]. Такую эффективность имазапира предлагается использовать для борьбы с водными макрофитами там, где их разрастание способствует эвтрофикации водоема.

Исходя из анализа данных научных источников, большинство исследователей занимаются вопросом риска попадания гербицидов в водные экосистемы. При этом в работе [14] показано, что наземные нецелевые виды (на примере *Tripleurospermum inodorum* (L.) и *Stellaria media* (L.) более уязвимы для современных гербицидов по сравнению с водными видами.

Заключение

Полученные в острых и хронических экспериментах результаты подтверждают литературные сведения о том, что несмотря на быстрое разрушение в окружающей среде современных гербицидов их попадание в экосистемы даже на уровне предельно допустимых концентраций будет приводить к деформации почвенных и водных сообществ организмов. В этой ситуации экспериментально полученные нами выводы будут способствовать диагностике специфического загрязнения окружающей среды:

– исследованные гербицидные препараты производных пиридина (клопиралид и пиклорам) и имидазолиноны (имазетапир и имазамокс) в дозах до 50 ПДК включительно оказывают значимое воздействие в первую очередь на микроорганизмы, используемые в экспресс-биотестах — инфузории и бактерии;

– концентрации 1, 10 и 50 ПДК оказывают негативное действие на рачков *D. magna* и *C. affinis*

по показателям хронического воздействия. Для проявления воздействия на низших ракообразных в краткосрочных опытах (96 часов) требуются концентрации свыше 150 ПДК;

– в итоге чувствительность испытанных аттестованных биотестов к современным гербицидам имазетапиру («Гольф ВК»), смеси клопиралаида и пиклорама («Актеон») и имазамокса («Родимич») можно представить следующим рядом: биотест по изменению хемотаксиса *P. caudatum* > биолюминесцентный биотест с бактериальным препаратом «Эколюм» > биотест по гибели *C. affinis* > биотест по гибели *D. magna*.

Литература

1. Акварос (2007). ФР 1.39.2007.03221. Биологические методы контроля. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости цериодафний. М.: Акварос, 56 с.
2. Акварос (2007). ФР 1.39.2007.03222. Биологические методы контроля. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний. М.: Акварос, 51 с.
3. Главный государственный санитарный врач Российской Федерации (2018). Постановление от 10 мая 2018 г. № 33 «Об утверждении гигиенических нормативов ГН 1.2.3539–18 «Гигиенические нормативы содержания пестицидов в объектах окружающей среды (перечень)» [online] Доступно по ссылке: <http://docs.cntd.ru/document/557532326> [Дата обращения: 26.02.2019].
4. Государственная дума (2017). Федеральный закон «О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами (с изменениями на 17 апреля 2017 года)» [online] Доступно по ссылке: <http://docs.cntd.ru/document/9045962> [Дата обращения: 26.02.2019].
5. Данилов-Данильян, В. И. и Пискулова, Н. А. (ред.) (2015). Устойчивое развитие: новые вызовы М.: Аспект Пресс, 336 с.
6. Министерство природных ресурсов Российской Федерации (2010). ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11–04. Т.16.1:2:3:3.8–04. Методика определения интегральной токсичности поверхностных, в том числе морских, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных экстрактов почв, отходов, осадков сточных вод по изменению бактериальной биолюминесценции тест-системой «Эколюм». М.: ФБУ «ФЦАО», 26 с.
7. Олькова, А. С. (2017). Условия культивирования и многообразия тест-функций *Daphnia Magna Straus* при биотестировании. Вода и экология: проблемы и решения, № 1, сс. 63–82. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.19.1.63-82.
8. Олькова, А. С. (2018) Актуальные направления развития методологии биотестирования водных сред. Вода и экология: проблемы и решения, № 2 (74), сс. 40–50. DOI: 10.23968/2305–3488.2018.20.2.40–50.
9. Спектр-М (2015). ФР 1.39.2015.19242. ПНД Ф Т 16.2:2.2–98 Методика определения токсичности проб природных, питьевых, хозяйственно-питьевых, хозяйственно-бытовых сточных, очищенных сточных, сточных, талых, технологических вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». СПб.: ООО «СПЕКТР-М», 21 с.
10. Федорова, Е. А., Зинчук, О. А., Бессчетнова, Л. М. и Сороколетова, Г. В. (2016). Хроническая токсичность имадазолинонового гербицида имазетапир для пресноводных организмов разных систематических групп. Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, № 123 (9), сс. 90–101.
11. Botelho, R. G., Santos, J. B., Oliveira, T. A., Braga, R. R. and Byrro, E. C. M. (2009). Acute toxicity to herbicides to *Oreochromis niloticus*. *Planta Daninha*, vol. 27 (3), pp. 621–626. DOI: 10.1590/S0100-83582009000300024.
12. Brock, T. C. M., Arts, G. H. P., Maltby, L. and Van den Brink, P. J. (2006). Aquatic risks of pesticides, ecological protection goals, and common aims in European Union legislation. *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 2, issue 4, pp. e20–e46. DOI: 002/ieam.5630020402.
13. Bzour, M. I., Zuki, F. M. and Mispan, M. Sh. (2018). Introduction of imidazolinone herbicide and Clearfield® rice between weedy rice—control efficiency and environmental concerns. *Environmental Reviews*, vol. 26, No. 2, pp. 181–198. DOI: 10.1139/er-2017-0096.
14. Cedergreen, N., Kudsk, P., Mathiassen, S. K. and Streibig, J. C. (2007). Combination effects of herbicides on plants and algae: do species and test systems matter? *Pest Management Science*, vol. 63, issue 3, pp. 282–295. DOI: 10.1002/ps.1353.
15. Cruz, C., Silva, A. F., Shiogiri, N. S., Garlich, N. and Pitelli, R. A. (2015). Imazapyr herbicide efficacy on floating macrophytes control and ecotoxicology for non-target organisms. *Planta Daninha*, vol. 33, No. 1, pp. 103–108. DOI: 10.1590/S0100-83582015000100012.
16. Daam, M. A. and Van den Brink, P. J. (2010). Implications of differences between temperate and tropical freshwater ecosystems for the ecological risk assessment of pesticides. *Ecotoxicology*, vol. 19, issue 1, pp. 24–37. DOI: 10.1007/s10646-009-0402-6.
17. Della Vecchia, J. F., Cruz, C., Silva, A. F., Cerveira Jr., W. R. and Garlich, N. (2016). Macrophyte bioassay applications for monitoring pesticides in the aquatic environment. *Planta Daninha*, vol. 34, No. 3, pp. 597–603. DOI: 10.1590/S0100-83582016340300021.
18. Erofeeva, E. A. (2014). Hormesis and paradoxical effects of wheat seedling (*Triticum aestivum* L.) parameters upon exposure to different pollutants in a wide range of doses. *Dose-Response*, vol. 12, issue 1, pp. 121–135. DOI: 10.2203/dose-response.13-017.Erofeeva.
19. Golombieski, J. I., Sutili, F. J., Salbego, J., Seben, D., Gressler, L. T., da Cunha, J. A., Gressler, L. T., Zanella, R., de Almeida Vaucher, R., Marchesan, E. and Baldisserotto, B. (2016). Imazapyr+imazapic herbicide determines acute toxicity in silver catfish *Rhamdia quelen*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 128, pp. 91–99. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2016.02.010.
20. Kasamesiri, P. and Thaimuangphol, W. (2019). Effects of agrochemical residues on aquatic invertebrates in semi-organic rice fields. *International Journal of GEOMATE*, vol. 16, issue 56, pp. 54–58. DOI: 10.21660/2019.56.4567.

21. López-Vizcaino, R., dos Santos, E. V., Yustres, A., Rodrigo, M. A., Navarro, V. and Martínez-Huitile, C. A. (2019). Calcite buffer effects in electrokinetic remediation of clopyralid-polluted soils. *Separation and Purification Technology*, vol. 212, pp. 376–387. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.11.034.

22. Reck, L., Reimche, G. B. Alves, C. R., Abreu, K. do V., Oliveita, M. A. and de Oliveira Machado, S. L. (2018). Effect of herbicides imazapyr and imazapicon in the phytoplanktonic community of rice paddy fields. *Iheringia Serie Botanica*, vol. 73, issue 3, pp. 298–307. DOI: 10.21826/2446-8231201873307.

23. Saldívar, R. H. L., Arguello, B. M., Reyes, I. V. and de los Santos Villarreal, G. (2018). Agronanotechnology: a new tool for modern agriculture. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, vol. 50, issue 2, pp. 395–411.

24. Xie, J., Zhao, L., Liu, K., Guo, F., Gao, L. and Liu, W. (2018). Activity, toxicity, molecular docking, and environmental effects of three imidazolinone herbicides enantiomers. *Science of the Total Environment*, vol. 622–623, pp. 594–602. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.333.

25. Zhang, Y., Lorsbach, B. A., Castetter, S., Lambert, W. T., Kister, J., Wang, N. X., Klittich, C. J. R., Roth, J. Sparks, T. C. and Loso, M. R. (2018). Physicochemical property guidelines for modern agrochemicals. *Pest Management Science*, vol. 74, issue 9, pp. 1979–1991. DOI: 10.1002/ps.5037.

References

1. Akvaros (2007). *Federal Register FR 1.39.2007.03221. Biological control methods. Methodology for determining the toxicity of water and water extracts from soils, sewage sludge, and waste by mortality and changes in fertility of Ceriodaphnias*. Moscow: Akvaros, 56 p.

2. Akvaros (2007). *Federal Register FR 1.39.2007.03222. Biological control methods. Methodology for determining the toxicity of water and water extracts from soils, sewage sludge, and waste by mortality and changes in fertility of daphnias*. Moscow: Akvaros, 51 p.

3. Chief Public Health Officer of the Russian Federation (2018). *Resolution No. 33 dd. May 10, 2018 "On approval of hygienic standards GN 1. 2.3539-18 "Hygienic standards for the content of pesticides in environmental objects (list)".* [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/557532326> [Date accessed 26.02.2019].

4. State Duma (2017). *Federal Law "Concerning safe handling of pesticides and agrochemicals (as amended on April 17, 2017)".* [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/9045962> [Date accessed 26.02.2019].

5. Danilov-Danilyan, V. I. and Piskulova, N. A. (eds.) (2015). *Sustainable development: new challenges*. Moscow: Aspect Press, 336 p.

6. Ministry of Mineral Resources of the Russian Federation (2010). *Environmental Regulatory Document PND F T 14.1:2:3:4.11-04. T.16.1:2:3:3.8-04. Method for determining the integrated toxicity of surface waters, including marine, ground, drinking, waste waters, water extracts from soils, waste, sewage sludge by changes in bacterial bioluminescence using the Ecolum test-system*. Moscow: Federal State-Financed Institution "Federal Center for Analysis and Estimation of Technogenic Impact", 26 p.

7. Olkova, A. S. (2017). The conditions of cultivation and the variety of test functions of *Daphnia Magna Straus* in bioassay.

Water and Ecology, No. 1, pp. 64–82. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.19.1.63-82.

8. Olkova, A. S. (2018). Current trends in the development of the methodology of bioassay aquatic environments. *Water and Ecology*, No. 2 (74), pp. 40–50. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.20.2.40-50.

9. Spektr-M (2015). *Federal Register FR 1.39.2015.19242. Environmental Regulatory Document PND F T 16.2:2.2-98. Methodology for determining the toxicity of samples of natural, drinking, domestic and drinking, household waste, treated sewage, waste, thawed, technological water by the express method using the Biotester device*. Sainte Petersburg: SPEKTR-M, 21 p.

10. Fedorova, E. A., Zinchuk, O. A., Besschetnova, L. M. and Sorokoletova, G. V. (2016). Chronic toxicity of imidazolinone herbicide called imazethapyr to freshwater organisms of various systematic groups. *Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, No. 123 (9), pp. 90–101.

11. Botelho, R. G., Santos, J. B., Oliveira, T. A., Braga, R. R. and Byrro, E. C. M. (2009). Acute toxicity to herbicides to *Oreochromis niloticus*. *Planta Daninha*, vol. 27 (3), pp. 621–626. DOI: 10.1590/S0100-83582009000300024.

12. Brock, T. C. M., Arts, G. H. P., Maltby, L. and Van den Brink, P. J. (2006). Aquatic risks of pesticides, ecological protection goals, and common aims in European Union legislation. *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 2, issue 4, pp. e20–e46. DOI: 10.1002/ieam.5630020402.

13. Bzour, M. I., Zuki, F. M. and Mispan, M. Sh. (2018). Introduction of imidazolinone herbicide and Clearfield® rice between weedy rice—control efficiency and environmental concerns. *Environmental Reviews*, vol. 26, No. 2, pp. 181–198. DOI: 10.1139/er-2017-0096.

14. Cedergreen, N., Kudsk, P., Mathiasen, S. K. and Streibig, J. C. (2007). Combination effects of herbicides on plants and algae: do species and test systems matter? *Pest Management Science*, vol. 63, issue 3, pp. 282–295. DOI: 10.1002/ps.1353.

15. Cruz, C., Silva, A. F., Shigiri, N. S., Garlich, N. and Pitelli, R. A. (2015). Imazapyr herbicide efficacy on floating macrophytes control and ecotoxicology for non-target organisms. *Planta Daninha*, vol. 33, No. 1, pp. 103–108. DOI: 10.1590/S0100-83582015000100012.

16. Daam, M. A. and Van den Brink, P. J. (2010). Implications of differences between temperate and tropical freshwater ecosystems for the ecological risk assessment of pesticides. *Ecotoxicology*, vol. 19, issue 1, pp. 24–37. DOI: 10.1007/s10646-009-0402-6.

17. Della Vechia, J. F., Cruz, C., Silva, A. F., Cerveira Jr., W. R. and Garlich, N. (2016). Macrophyte bioassay applications for monitoring pesticides in the aquatic environment. *Planta Daninha*, vol. 34, No. 3, pp. 597–603. DOI: 10.1590/S0100-83582016340300021.

18. Erofeeva, E. A. (2014). Hormesis and paradoxical effects of wheat seedling (*Triticum aestivum* L.) parameters upon exposure to different pollutants in a wide range of doses. *Dose-Response*, vol. 12, issue 1, pp. 121–135. DOI: 10.2203/dose-response.13-017.Erofeeva.

19. Golombieski, J. I., Sutili, F. J., Salbego, J., Seben, D., Gressler, L. T., da Cunha, J. A., Gressler, L. T., Zanella, R., de Almeida Vaucher, R., Marchesan, E. and Baldisserotto,

B. (2016). Imazapyr+imazapic herbicide determines acute toxicity in silver catfish *Rhamdia quelen*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, V. 128, pp. 91–99. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2016.02.010.

20. Kasamesiri, P. and Thaimuangphol, W. (2019). Effects of agrochemical residues on aquatic invertebrates in semi-organic rice fields. *International Journal of GEOMATE*, vol. 16, issue 56, pp. 54–58. DOI: 10.21660/2019.56.4567.

21. López-Vizcaíno, R., dos Santos, E. V., Yustres, A., Rodrigo, M. A., Navarro, V. and Martínez-Huitle, C. A. (2019). Calcite buffer effects in electrokinetic remediation of clopyralid-polluted soils. *Separation and Purification Technology*, vol. 212, pp. 376–387. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.11.034.

22. Reck, L., Reimche, G. B. Alves, C. R., Abreu, K. do V., Oliveita, M. A. and de Oliveira Machado, S. L. (2018). Effect of herbicides imazapyr and imazapicon in the phytoplanktonic community of rice paddy fields. *Iheringia, Serie Botanica*, vol. 73, issue 3, pp. 298–307. DOI: 10.21826/2446-8231201873307.

23. Saldívar, R. H. L., Arguello, B. M., Reyes, I. V. and de los Santos Villarreal, G. (2018). Agronanotechnology: a new tool for modern agriculture. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, vol. 50, issue 2, pp. 395–411.

24. Xie, J., Zhao, L., Liu, K., Guo, F., Gao, L. and Liu, W.. (2018). Activity, toxicity, molecular docking, and environmental effects of three imidazolinone herbicides enantiomers. *Science of the Total Environment*, vol. 622–623, pp. 594–602. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.333.

25. Zhang, Y., Lorsbach, B. A., Castetter, S., Lambert, W. T., Kister, J., Wang, N. X., Klittich, C. J. R., Roth, J. Sparks, T. C. and Loso, M. R. (2018). Physicochemical property guidelines for modern agrochemicals. *Pest Management Science*, vol. 74, issue 9, pp. 1979–1991. DOI: 10.1002/ps.5037.

Авторы

Олькова Анна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент
Вятский государственный университет
E-mail: morgana-abend@mail.ru

Березин Григорий Иванович, канд. биол. наук, доцент
Вятский государственный университет
E-mail: grigoory1987@gmail.com

Authors

Anna Sergeevna Olkova, Dr. of Engineering, Associate Professor
Vyatka State University
E-mail: morgana-abend@mail.ru

Grigoriy Ivanovich Berezin, Dr. of Biological Sciences, Associate Professor
Vyatka State University
E-mail: grigoory1987@gmail.com

Подписано к печати 7.06.2019. Формат 60×90^{1/8}. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 15,0. Тираж 1000 экз. Заказ 83. «С» 33. Отпечатано на МФУ.
198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А