

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ И РИСКА ПЕСТИЦИДОВ ДЛЯ ВОДНЫХ ОРГАНИЗМОВ

© 2019 г. В. С. Горбатов¹, А. А. Астайкина^{2,*}, Р. С. Аптикаев², В. В. Тихонов³

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 р.п. Большие Вяземы, Московская обл., ул. Институт, влад. 5, Россия*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения
119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия*

³ *ООО “Центр эконестицидных исследований”
127220 Москва, ул. Башиловская, 1 корп. 1, Россия*

**E-mail: astaikina-anzhel@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.12.2018 г.

После доработки 21.01.2019 г.

Принята к публикации 08.08.2019 г.

Систематизированы данные по токсичности для гидробионтов двухсот действующих веществ пестицидов, зарегистрированных в РФ. Установлены классы опасности пестицидов для водной среды в соответствии с современными классификациями опасности химической продукции для окружающей среды. Предложен агрегированный показатель риска пестицидов для водных организмов — индикатор *HARIP*, учитывающий риски их токсичности и биоаккумуляцию. Рассчитаны его численные показатели — индексы *HARIP* и составлен рейтинг пестицидов, который можно использовать при выборе приоритетных пестицидов-загрязнителей поверхностных водоемов РФ.

Ключевые слова: пестициды, водные организмы, токсичность, опасность, биоаккумуляция, индикатор агрегированного риска.

DOI: 10.1134/S0002188119110061

ВВЕДЕНИЕ

Одним из возможных негативных последствий применения пестицидов является загрязнение ими поверхностных вод и вредное воздействие на водные организмы (рыб, беспозвоночных, водоросли и высшие водные растения). В водоемы пестициды могут попадать за счет сноса потоками воздуха при обработке полей и садов, смыва с поверхности почвы с жидким и твердым стоком, миграции с дренажными водами. По сравнению с наземными и почвенными организмами, гидробионты более чувствительны к пестицидам в силу физиологических особенностей и из-за того, что вода является их постоянной средой обитания и менее буферна по отношению к загрязнителям, чем почва.

Чтобы контролировать и уменьшить влияние пестицидов на водные объекты, включая водные организмы, государством за последние годы принят ряд ограничительных мер. В 2015 г. Правительством РФ установлен “Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования” [1].

Среди более 200 веществ-загрязнителей водных объектов, подлежащих государственному регулированию, есть и 15 пестицидов (альдрин, атразин, гексахлорбензол, ГХЦГ, 2,4-Д, дильдрин, каптан, карбофос, ДДТ, ДДД, прометрин, симазин, трифлуралин, ТХАН, фозалон). Однако логика формирования этого перечня пестицидов не совсем понятна. Достаточно сказать, что большинство из них (за исключением 2,4-Д, карбофоса, прометрина и фозалона) давно исключены из списка пестицидов, разрешенных на территории РФ [2]. Напротив, в перечне для приоритетного регулирования отсутствуют зарегистрированные в России пестициды с гораздо более высоким уровнем риска для гидробионтов.

Еще одним ограничением, принятым в 2013 г. “Водным кодексом Российской Федерации” [3] и призванным уменьшить воздействие пестицидов на водные организмы, является запрещение применения всех пестицидов в водоохранных зонах водных объектов. На наш взгляд, оно является чрезмерным из-за недифференцированного подхода к способности разных пестицидов оказывать негативное воздействие на гидробионты и огра-

ничивает возможности защиты растений с использованием пестицидов, обладающих низким риском для этих нецелевых видов организмов.

Очевидно, что для формирования списка приоритетных пестицидов, подлежащих первоочередному регулированию и ограничениям применения, необходим объективный и научно обоснованный подход сравнительной оценки негативного воздействия пестицидов на гидробионты. Он должен базироваться не только на показателях токсичности пестицидов для гидробионтов, характеризующих их опасность для данной группы организмов, но и учитывать концентрации пестицидов в воде и их способность к биоаккумуляции. Чтобы объединить разнородные данные в один удобный показатель — индикатор риска, применяют разнообразные методы их агрегирования. В последние годы интерес к агрегированным показателям, как относительно простым и доступным инструментам планирования риска и принятия решений, значительно вырос как со стороны органов, регулирующих регистрацию и применение пестицидов, так и со стороны их потребителей. Неудивительно, что уже предложены десятки таких индикаторов, предприняты попытки их систематизации и выбора наиболее приемлемых (например, проект Европейского Союза “*CAPER*” [4]). Первые попытки разработки экологических индикаторов пестицидов связаны с оценкой их вреда для окружающей среды в целом, включая различные нецелевые виды организмов [5–7]. Но они оказались не совсем удачными, прежде всего из-за того, что ни один вид организмов не является одинаково чувствительным ко всем пестицидам. Большее развитие получили экологические индикаторы риска пестицидов для отдельных природных сред (воды, почвы, воздуха) и различных групп нецелевых организмов. В частности, стоит отметить проект Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), в рамках которого специально для гидробионтов разработаны 3 индикатора риска пестицидов: REXTOX, ADSCOR и SYSCOR [8], применимые в масштабах государства, региона и фермерского хозяйства для отдельных культур, пестицидов и их комбинаций. Общими недостатками этих 3-х индикаторов являются их сложность и использование скоринга (программы, которая в реальном времени оценивает все возможные риски, используя имеющиеся данные об объекте) для оценки уровня воздействия вместо более реалистичных моделей прогноза концентраций пестицидов в воде.

Цель работы — предложить простой и понятный метод ранжирования пестицидов по их рискам для водных организмов с использованием:

1 — имеющихся данных по токсичности пестицидов для гидробионтов и их биоаккумуляции, 2 — спрогнозированных концентраций пестицидов в поверхностных водах, 3 — обобщения данных для расчета агрегированного индикатора риска. Предполагается, что рассчитанные рейтинги риска пестицидов для гидробионтов могут быть использованы для научно обоснованных управленческих решений по регулированию обращения пестицидов и при выборе приоритетных пестицидов для национального мониторинга в поверхностных водоемах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методология оценки опасности и риска пестицидов для водных организмов. Поэтапная схема процедур оценки опасности, рисков и определения рейтингов агрегированного риска пестицидов для гидробионтов приведена на рис. 1. Под опасностью пестицида для гидробионтов понимали его способность оказывать негативное воздействие на эти нецелевые организмы. Одним из основных видов опасностей пестицида является его токсичность для водных организмов. Риск пестицида — это возможность реализации его опасности (прежде всего токсичности) в конкретных условиях окружающей среды и регламента применения пестицида. Количественно риски пестицида для гидробионтов характеризовали отношением показателей токсичности пестицида к его прогнозируемой концентрации в воде. Для обобщения нормализованных показателей риска острой и хронической токсичности, коэффициентов биоаккумуляции пестицидов использовали один из самых простых и общепринятых методов агрегирования данных — сложение баллов, который позволил составить рейтинги агрегированного риска пестицидов для водных организмов.

Данные о токсичности и биоаккумуляции пестицидов. Это исследование охватывает практически все действующие вещества гербицидов, фунгицидов и инсектицидов (всего 200 веществ), входящих в состав пестицидных препаратов, зарегистрированных для применения в РФ [2]. Источниками данных о токсичности пестицидов для гидробионтов и их биоаккумуляции служила база данных *PPDB* (Pesticide Property Data Base) [9], в основу которой положены результаты испытаний, полученные в процессе разработки и регистрации пестицидов, а также открытые научные публикации. В *PPDB* представлены данные об острой и хронической токсичности действующих веществ пестицидов для рыб (типичный представитель — радужная форель, *Oncorhynchus*

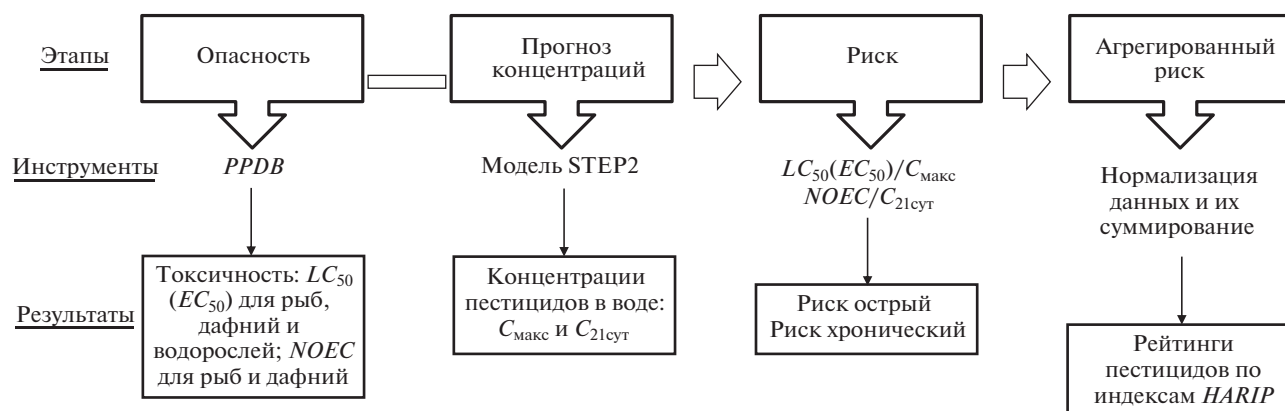


Рис. 1. Схема поэтапной оценки опасности и риска пестицидов для гидробионтов.

mykiss), водных беспозвоночных (дафнии, *Daphnia magna*), водорослей (зеленые водоросли, в основном — *Selenastrum capricornutum*). Показатели острой токсичности пестицидов — LC_{50} и EC_{50} (96-часовые тесты для рыб и 48-часовые для дафний соответственно), их хронической токсичности $NOEC$ (14–21-суточные тесты) для этих же гидробионтов, а также токсичности для водорослей (EC_{50}) и биоаккумуляции в рыбах (BCF), как правило, определены по методикам испытаний химикатов Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР). В настоящее время эти методики переведены на русский язык и оформлены в виде межгосударственных стандартов [10–15].

Классификации опасности пестицидов для гидробионтов. Для классификации и описания характеристик опасности пестицидов для водных организмов использовали 2 государственных стандарта [16, 17]. Оба ГОСТа подготовлены на основе международного документа — “Согласованной на глобальном уровне системе классификации опасности и маркировки химической продукции (СГС)” [18]. В обобщенном и адаптированном для пестицидов виде классификации острой и хронической токсичности пестицидов для гидробионтов представлены в табл. 1 и 2.

Прогноз концентраций пестицидов в поверхностных водах. При оценке риска пестицидов для водных организмов, кроме данных о токсичности пестицидов для гидробионтов, необходимо знать их концентрации в воде поверхностных водоемов. Натурные эксперименты и мониторинговые наблюдения по определению концентраций пестицидов в поверхностных водоемах слишком дороги и не учитывают всего разнообразия водоемов, почвенно-климатических условий, рельефа местности и регламентов применения пестицидов. Поэтому в последнее время широко применяют прогнозы концентраций пестицидов в поверхностных водах с использованием математических моделей. Они являются одними из основных инструментов прогноза концентраций пестицидов в водной среде в Европейском Союзе [19] и их начинают применять в Российской Федерации [20].

В данной работе использована модель **STEP2**, разработанная в Европейском Союзе [21]. Это достаточно простая универсальная модель с ограниченным количеством входных данных, не требующая детальной информации о свойствах почв, рельефе и метеоусловиях. Она позволяет рассчитывать максимальные актуальные и средневзвешенные концентрации пестицида в воде на 1, 2, 4, 7, 14, 21, 28, 42, 50 и 100-е сут после его применения.

Таблица 1. Классификация опасности пестицидов по острой токсичности для гидробионтов

LC_{50}/EC_{50} , мг/л	Класс	Краткая характеристика опасности	Символ	Сигнальное слово
$\leq 1/0$	1	Очень токсично для водных организмов		Осторожно
$> 1/0 - \leq 10$	2	Токсично для водных организмов	Нет	Нет
$> 10 - \leq 100$	3	Вредно для водных организмов		
> 100	Нет			

Таблица 2. Классификация опасности пестицидов по хронической токсичности для гидробионтов

NOEC, мг/л	Класс	Краткая характеристика опасности	Символ	Сигнальное слово
Пестициды, способные к быстрому разложению*				
≤0.01	1	Очень токсично для водных организмов с долгосрочными последствиями		Осторожно
>0.01—≤0.1	2	Токсично для водных организмов с долгосрочными последствиями		Нет
>0.1—≤1.0	3	Вредно для водных организмов с долгосрочными последствиями	Нет	
>1.0	Нет			
Пестициды, не способные к быстрому разложению**				
≤0.1	1	Очень токсично для водных организмов с долгосрочными последствиями		Осторожно
0.1—≤1.0	2	Токсично для водных организмов с долгосрочными последствиями		Нет
>1.0	Нет		Нет	

*Биоразложение в воде >70% в течение 28 сут или гидролиз ($DT_{50} < 16$ сут).

**Биоразложение в воде <70% в течение 28 сут или гидролиз ($DT_{50} > 16$ сут).

В качестве условного стандартного водоема в модели STEP2 используют один простой вид водоема со следующими параметрами: отношение ширины к его длине – 1 : 10 при уклоне 5%, глубина – 30 см, мощность донного осадка – 5 см. Модель принимает в расчет перехват пестицида культурой, а также учитывает воздушный снос пестицида на поверхность водоема при обработке поля и его миграцию в водоем за счет поверхностного стока и дренажа из почвы. Для прогноза концентраций пестицидов в поверхностных водах и последующих расчетов их рисков для гидробионтов использовали максимально рекомендуемые однократные нормы применения пестицидов на основных сельскохозяйственных культурах, выращиваемых в России. Если пестицид применяли только для обработки семян, то его норму применения рассчитывали с учетом гектарной нормы высева культуры.

Обобщение данных и составление рейтингов рисков. Достаточно большое количество исходных данных, характеризующих разные стороны негативного воздействия пестицидов на гидробионты, осложняет их сравнительную оценку. Поэтому в данной работе использовали следующие приемы обобщения и уменьшения объемов исходной информации:

1 – использование данных по токсичности пестицида только для наиболее чувствительной группы гидробионтов;

2 – преобразование показателей токсичности и концентрации в коэффициенты риска острой ($R_{\text{остр}}$) и хронической ($R_{\text{хрон}}$) токсичности:

$$R_{\text{остр}} = LC_{50}(EC_{50})/C_{\text{макс}},$$

где LC_{50} или EC_{50} – полуэффективная концентрация пестицида, $C_{\text{макс}}$ – максимальная прогнозируемая концентрация пестицида в воде;

$$R_{\text{хрон}} = NOEC/C_{21 \text{ сут}},$$

где $NOEC$ – неэффективная наблюдаемая концентрация пестицида, $C_{21 \text{ сут}}$ – средневзвешенная за 21 сут прогнозируемая концентрация пестицида в воде;

3 – приведение разнородных данных по рискам и биоаккумуляции в один формат – баллы (нормализация данных);

4 – суммирование баллов по рискам обоих видов токсичности и биоаккумуляции и преобразование их в индикатор агрегированного риска пестицидов для гидробионтов *HARIP* (Hydrobionts Aggregate Risk Indicator for Pesticides).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Токсичность пестицидов для гидробионтов и их опасность для водной среды. Данные о токсичности для водных организмов применяемых в РФ пестицидов до настоящего времени в России практически не были систематизированы. На ос-

Таблица 3. Рейтинги 20-ти наиболее токсичных пестицидов для гидробионтов

Рейтинг, баллы	Рыбы		Дафнии		Водоросли
	LC_{50}	$NOEC$	EC_{50}	$NOEC$	EC_{50}
1	Гамма-цигалотрин	Бета-цифлутрин	Гамма-цигалотрин	Бифентрин	Дифлюфеникан
2	Тефлутрин	Бифентрин	Тефлутрин	Гамма-цигалотрин	Флумиоксазин
3	Бета-цифлутрин	Альфа-циперметрин	Хлорпирифос	Дельтаметрин	Прометрин
4	Эсфенвалерат	Циперметрин	Бифентрин	Тефлутрин	Флуфенацет
5	Лямбда-цигалотрин	Дельтаметрин	Абамектин	Зета-циперметрин	Додин
6	Бифентрин	Тау-флювалинат	Зета-циперметрин	Пирипроксифен	Спироксамин
7	Дельтаметрин	Перметрин	Пиримифос-метил	Альфа-циперметрин	Фамоксадон
8	Бета-циперметрин	Гамма-цигалотрин	Альфа-циперметрин	Дифлубензурон	Пендиметалин
9	Зета-циперметрин	Хлорпирифос	Эсфенвалерат	Циперметрин	Флуорохлоридон
10	Пиридабен	Фенпироксимат	Бета-цифлутрин	Эсфенвалерат	Трифлуксистробин
11	Тау-флювалинат	Лямбда-цигалотрин	Циперметрин	Малатион	Прохлораз
12	Хлорпирифос	Эсфенвалерат	Лямбда-цигалотрин	Пиримифос-метил	Эсфенвалерат
13	Альфа-циперметрин	Бета-циперметрин	Бета-циперметрин	Пиридабен	Эмаектин бензоат
14	Циперметрин	Зета-циперметрин	Дельтаметрин	Фенитротрион	Ленацил
15	Абамектин	Феназахин	Перметрин	Люфенурон	С-Метолахлор
16	Феназахин	Фамоксадон	Малатион	Бета-цифлутрин	Просульфурон
17	Пиракlostробин	Манкоцеб	Фозалон	Фозалон	Флорасулам
18	Фамоксадон	Тебуфенпирад	Клофентизин	Тау-флювалинат	Меди гидроксид
19	Перметрин	Проквиназид	Хлорфлуазурон	Спиромезифен	Этабоксам
20	Клофентизин	Хлороталонил	Пиридабен	Бета-циперметрин	Азимсульфурон

новании информации, взятой из *PPDB* [9], были составлены рейтинги острой и хронической токсичности 200 действующих веществ пестицидов (80 гербицидов, 73 фунгицида и 47 инсектицидов), разрешенных для применения в Российской Федерации [2]. В табл. 4 в порядке убывания токсичности представлены двадцатки наиболее токсичных пестицидов для 3-х групп гидробионтов: рыб (показатели острой и хронической токсичности LC_{50} и $NOEC$ соответственно), беспозвоночных — дафний (EC_{50} и $NOEC$) и водорослей (EC_{50}). Подавляющее большинство среди перечисленных пестицидов — инсектициды (80%), фунгицидов и гербицидов примерно по 10%, причем последние, как и ожидалось, токсичнее всего для водорослей.

При классификации опасности веществ для водной среды в целом обычно используют показатели их токсичности для наиболее чувствительной группы гидробионтов. Пример такого обобщения данных приведен в табл. 5, где представлены данные для 20 наиболее токсичных пестицидов. В приведенных двадцатках оказались только инсектициды, единственное исключение — гербицид дифлюфеникан, а среди наиболее чувствитель-

ных гидробионтов заметно преобладали дафнии. Согласно классификациям опасности химической продукции для водной среды (табл. 2 и 3), большинство пестицидов (137 из двухсот, разрешенных для применения в РФ) относятся к 1-му классу опасности по острой токсичности. Опасностью 1-го класса по хронической токсичности обладают 90 пестицидов. Несмотря на то что многие пестициды относятся к 1-му классу опасности, реализация этой опасности в конкретных условиях применения пестицидов не всегда очевидна и зависит от их концентраций в воде водоемов.

Концентрации пестицидов в воде. Токсичность пестицида для гидробионтов негативно проявится, если он будет присутствовать в достаточной концентрации в водоеме. Концентрация пестицида в воде поверхностного водоема зависит от нормы применения пестицида, особенностей его поведения и распределения в окружающей среде после применения. Пестицид может поступать в водоем за счет воздушного сноса, передвижения по поверхности почвы с жидким и твердым стоком, с дренажными водами. Все эти факторы и процессы при прогнозе концентраций пестицида в водоеме учитывает модель STEP2 [21]. Модель

Таблица 4. Рейтинги токсичности пестицидов для наиболее чувствительной группы гидробионтов и их биоаккумуляции в рыбах

Рейтинг, баллы	Острая токсичность			Хроническая токсичность			Биоаккумуляция	
	Пестицид	LC_{50} (EC_{50}), мкг/л	Гидробионт	Пестицид	$NOEC$, мкг/л	Гидробионт	Пестицид	BCF
1	Гамма-цигалотрин	0.035	Рыбы	Бифентрин	0.0013	Дафнии	Люфенурон	5300
2	Тефлутрин	0.06	Рыбы	Гамма-цигалотрин	0.002	Дафнии	Пендиметалин	5100
3	Бета-цифлутрин	0.068	Рыбы	Дельтаметрин	0.0041	Дафнии	Лямбда-цигалотрин	4982
4	Хлорпирифос	0.1	Дафнии	Тефлутрин	0.008	Дафнии	Эсфенвалерат	3250
5	Эсфенвалерат	0.1	Рыбы	Бета-цифлутрин	0.01	Рыбы	Фамоксадон	3000
6	Бифентрин	0.11	Дафнии	Зета-циперметрин	0.01	Дафнии	Гамма-цигалотрин	2240
7	Абамектин	0.12	Дафнии	Пирипроксифен	0.015	Дафнии	Клетодим	2100
8	Зета-циперметрин	0.14	Дафнии	Альфа-циперметрин	0.03	Рыбы	Тау-флювалинат	1979
9	Лямбда-цигалотрин	0.21	Рыбы	Циперметрин	0.03	Рыбы	Бифентрин	1703
10	Пиримифос-метил	0.21	Дафнии	Дифлубензурон	0.04	Дафнии	Оксифлуорфен	1637
11	Альфа-циперметрин	0.22	Дафнии	Эсфенвалерат	0.052	Дафнии	Пропаргит	1635
12	Дифлюфеникан	0.25	Водоросли	Малатион	0.06	Дафнии	Фенпироксимат	1601
13	Дельтаметрин	0.26	Рыбы	Тау-флювалинат	0.064	Рыбы	Дельтаметрин	1400
14	Циперметрин	0.3	Дафнии	Пиримифос-метил	0.08	Дафнии	Тефлутрин	1400
15	Бета-циперметрин	0.39	Рыбы	Пиридабен	0.086	Дафнии	Пирипроксифен	1379
16	Перметрин	0.6	Дафнии	Фенитроион	0.087	Дафнии	Хлорпирифос	1374
17	Малатион	0.7	Дафнии	Люфенурон	0.1	Дафнии	Дифлюфеникан	1276
18	Пиридабен	0.72	Рыбы	Перметрин	0.12	Рыбы	Гекситазокс	1100
19	Фозалон	0.74	Дафнии	Фозалон	0.14	Дафнии	Флуазинам	1025
20	Клофентизин	0.8	Дафнии	Хлорпирифос	0.14	Рыбы	Тебуфентипирад	953

Таблица 5. Прогнозируемые концентрации пестицидов в воде и риски их токсичности для гидробионтов

Рейтинг, баллы	Концентрация в воде				Риск			
	$C_{\text{макс}}$		$C_{21 \text{ сут}}$		Острая токсичность		Хроническая токсичность	
	Пестицид	мкг/л	Пестицид	мкг/л	Пестицид	б/р*	Пестицид	б/р*
1	Метамитрон	227	Метамитрон	123	Хлорпирифос	0.017	Дифлубензурон	0.033
2	Бентазон	99	Бентазон	91	Прометрин	0.029	Хлорпирифос	0.042
3	Ленацил	81	Ленацил	75	Диазинон	0.034	Диазинон	0.057
4	Прометрин	72	Прометрин	61	Тефлутрин	0.057	Тефлутрин	0.093
5	С-Метолахлор	69	Хлоридазон	57	Ленацил	0.097	Фозалон	0.117
6	Пропизохлор	67	Метрибузин	43	Малатион	0.111	Бифентрин	0.126
7	Просульфокарб	66	Пропизохлор	42	Дифлюфеникан	0.113	Пирипроксифен	0.165
8	Хлоридазон	65	Метазахлор	41	Фозалон	0.115	Фенитротион	0.172
9	МЦПА	60	Этофумезат	37	Клофентизин	0.121	Карбендазим	0.235
10	Этофумезат	52	МЦПА	36	С-Метолахлор	0.134	Малатион	0.329
11	Метрибузин	51	С-Метолахлор	36	Флуорохлоридон	0.134	Гамма-цигалотрин	0.408
12	Хлороталонил	47	Напропамид	34	Бета-цифлутрин	0.139	Бета-цифлутрин	0.476
13	Метазахлор	44	Флуорохлоридон	32	Пропизохлор	0.198	Дельтаметрин	0.482
14	Напропамид	41	Диметенамид-П	27	Абабектин	0.324	Хлороталонил	0.588
15	Пропамокарб	39	Пропамокарб	23	Хлороталонил	0.364	Пиридабен	0.653
16	Флуорохлоридон	37	Диметоат	21	Метазахлор	0.374	Диметоморф	0.873
17	Диметенамид-П	36	Кломазон	18	Метрибузин	0.407	Метомил	0.933
18	Тербутилазин	33	Изопротурон	18	Пиридабен	0.423	Тебуконазол	0.935
19	2,4-Д	33	Клопиралид	16	Лямбда-цигалотрин	0.431	Циперметрин	1.167
20	Диазинон	29	Ацифлуорфен	15	Тербутилазин	0.441	Пендиметалин	1.208

*Безразмерная величина.

STER2 обычно завышает концентрации пестицидов в воде водоемов по сравнению с реально измеренными, например, для инсектицидов это наблюдалось в 86% случаев [22]. Это связано с использованием в модели упрощенных механизмов описания распределения пестицида в системе почва–водоем, а также применением сценариев входных данных, отражающих (как в данной работе) вариант “худшего случая” — максимальную норму применения пестицида, небольшой перехват его растениями, минимальную сорбцию пестицида почвой. Однако эти упрощения и допущения в равной мере касаются всех пестицидов и поэтому данные прогноза концентраций в воде вполне пригодны при сравнительной оценке риска пестицидов для водных организмов.

Прогноз концентраций пестицидов в водоеме по модели STER2 (табл. 5) показал, что поверхностные воды в первую очередь будут загрязняться гербицидами — они занимают первые 11 позиций в рейтинге концентраций. Фунгицидов и инсектицидов в топовых двадцатках — всего 3 и 2

наименования соответственно. Миграции гербицидов в водоемы, помимо высоких норм применения, способствуют их низкая сорбционная способность и умеренная стойкость в почве, а также то, что их применяют в ранних фазах развития защищаемой культуры.

Биоаккумуляция. Пестициды могут не только загрязнять водоемы и отравлять водные организмы, но и, накапливаясь в тканях гидробионтов (прежде всего, рыб), причинять им дополнительный вред, не только гидробионтам, но и наземным организмам, таким как рыбацкие птицы и млекопитающие. Способность пестицида к биоаккумуляции в рыбах обычно оценивают в лабораторных опытах [15] и характеризуют коэффициентом биоаккумуляции (BioConcentration Factor — *BCF*) — чем больше его величина, тем больше склонность пестицида к накоплению в тканях рыб. В топ-двадцатке пестицидов по способности к биоаккумуляции (табл. 4), как и в рейтинге токсичности, существенно преобладают

Таблица 6. Топ-двадцатка рейтинга агрегированного риска пестицидов для гидробионтов

Позиция в рейтинге	Пестицид	Показатели, баллы			
		Риск острый	Риск хронический	BCF	Агрегированный риск (индекс <i>HARIP</i>)
1	Хлорпирифос	1	2	15	18
2	Тефлутрин	4	4	13	21
3	Диазинон	3	3	21	27
4	Фозалон	8	5	26	39
5	Бифентрин	25	6	9	40
6	Бета-цифлутрин	11	12	20	43
7	Малатион	6	10	28	44
7	Гамма-цигалотрин	27	11	6	44
8	Пендиметалин	23	20	2	45
8	Дифлубензурон	21	1	23	45
9	Дельтаметрин	30	13	13	56
10	Хлороталонил	14	14	29	57
10	Эсфенвалерат	24	29	4	57
11	Дифлюфеникан	7	35	16	58
12	Лямбда-цигалотрин	18	40	3	61
13	Циперметрин	22	19	22	63
13	Люфенурон	38	24	1	63
14	Клофентизин	9	30	25	64
15	Тау-флювалинат	31	27	8	66
16	Пропаргит	35	22	11	68
17	Пиридабен	17	15	38	70
18	Флуорхлоридон	10	39	24	73
19	Пирипроксифен	53	7	14	74
20	Прометрин	2	44	30	76

инсектициды — их 14, гербицидов — 4, фунгицидов — 2.

Риски острой и хронической токсичности пестицидов для гидробионтов. Показателем негативного воздействия пестицида на водные организмы, учитывающим его токсичность и концентрацию в водоеме, обычно является их соотношение, которое характеризует риск пестицида для гидробионтов: чем меньше это соотношение, тем выше риск. Для целей регулирования принято считать низким (приемлемым) риск острой токсичности, если его показатель $LC_{50}(EC_{50})/C_{\text{макс}} > 100$ для рыб и беспозвоночных и > 10 — для водорослей, а риск хронической токсичности будет низким при отношении $NOEC/C_{21 \text{ сутки}} > 10$ [23]. В табл. 5 приведены показатели риска топовых двадцаток пестицидов по 2-м видам токсичностей для наиболее чувствительной группы гидробионтов. Из двухсот рассмотренных пестицидов к категории низкого риска острой и хронической токсичности

для гидробионтов отнесены соответственно 122 и 127 действующих веществ. Для таких пестицидов при регистрации обычно требуется меньший объем данных по водной токсикологии и сведены к минимуму ограничения по их применению в буферных водоохранных зонах водоемов.

Индикатор агрегированного риска HARIP. Для расчета индексов *HARIP* (Hydrobionts Aggregate Risk Indicator for Pesticides) суммировали баллы — нормализованные величины показателей острой, хронической токсичности и биоаккумуляции. В табл. 6 в порядке убывания агрегированного риска представлены 20 позиций рейтинга, куда вошли 24 пестицида: 19 инсектицидов, 4 гербицида и один фунгицид. С заметным отрывом от остальных пестицидов в данном рейтинге расположились 3 инсектицида с максимальным уровнем агрегированного риска для водных организмов — хлорпирифос, тефлутрин и диазинон. Их можно рассматривать в качестве первоочеред-

ных кандидатов среди возможных пестицидов-загрязнителей водной среды, подлежащих государственному регулированию и мониторингу.

ВЫВОДЫ

1. Систематизированы данные о токсичности для гидробионтов и биоаккумуляции 200 действующих веществ пестицидов, зарегистрированных в Российской Федерации. Установлены классы опасности пестицидов для водной среды в соответствии с современными классификациями опасности химической продукции для окружающей среды. Примерно 2/3 пестицидов относятся к первому классу опасности. Среди наиболее опасных пестицидов преобладают инсектициды, а самая чувствительная к пестицидам группа гидробионтов – беспозвоночные (дафнии).

2. С помощью модели STEP2 спрогнозированы концентрации пестицидов в воде условного поверхностного водоема. Эти данные использованы при оценке рисков проявления острой и хронической токсичностей пестицидов для гидробионтов. В целом, исходя из уровней спрогнозированных концентраций пестицидов в воде, основными загрязнителями поверхностных вод являются гербициды.

3. Предложен агрегированный показатель риска пестицидов для водных организмов – индикатор *HARIP*, учитывающий риски их токсичности и биоаккумуляцию. Рассчитаны его численные показатели – индексы и составлен рейтинг пестицидов, который можно использовать при выборе приоритетных пестицидов-загрязнителей поверхностных водоемов Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 08.07.2015 г. № 1316-р “Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды”.
2. Справочник пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. М.: Изд-во “Агрорус”, 2018. 853 с.
3. 74-ФЗ от 03.06.2006 г. “Водный кодекс Российской Федерации” (редакция от 29.07.2017).
4. Reus J., Leendertse P., Bockstaller C., Fomsgaard I., Gutsche V., Lewis K., Nilsson C., Pussemier L., Trevisan M., van der Welf H., Alfarroba F., Blumel S., Isart J., McGrath D., Seppala T. Comparison and evaluation of eight pesticide environmental risk indicators developed in Europe and recommendation for future use // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2002. V. 90. P. 177–187.
5. Соколов М.С., Стрекозов Б.П. Последовательность и некоторые принципы нормирования пестицидов в почве // *Химия в сел. хоз-ве*. 1975. Т. 13. № 7. С. 63–66.
6. Pease W.S., Liebman J., Landy D., Albright D. Pesticide use in California. Strategies for reducing environmental health impacts. Berkeley: University of California, 1996. 116 p.
7. Swanson M.B., Davis G.A., Kincaid L.E., Schults T.W., Bartmess J.E., Jones S.L. and George E.L. CHEMS 1: Screening method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts // *Environ. Toxicol. Chem.* 1997. V. 16. № 2. P. 372–383.
8. Report of the OECD Pesticide Aquatic Risk Indicators Expert Group. Paris: OECD, 2002. 58 p.
9. Pesticide Property Database (PPDB). The Agricultural & Environmental Research Unit (AERU) at the University of Hertfordshire. Hatfield, Herts, UK., 2010. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/en/index.htm>
10. ГОСТ 32428-2013. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Определение хронической токсичности для рыб: 14-дневный тест (OECD, Test No 204: 1984, IDT). М.: Стандартинформ, 2014. 8 с.
11. ГОСТ 32473-2013. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Определение острой токсичности для рыб (OECD, Test No 203: 1992, IDT). М.: Стандартинформ, 2014. 11 с.
12. ГОСТ 32536-2013. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Определение острой токсичности для дафний (OECD, Test No 202: 1992, IDT). М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
13. ГОСТ 32367-2013. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Угнетение репродуктивной способности Дафнии магна (OECD, Test No 211: 2008, IDT). М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.
14. ГОСТ 32293-2013. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Испытание водорослей и цианобактерий на задержку роста (OECD, Test No 201: 2011, IDT). М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.
15. ГОСТ 32538-2013. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Определение биоконцентрации на рыбах в проточных аквариумах (OECD, Test No 305: 1996, IDT). М.: Стандартинформ, 2014. 23 с.
16. ГОСТ 32424-2013. Классификация опасности химической продукции по воздействию на окружающую среду. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2014. 14 с.
17. ГОСТ 31340-2013. Предупредительная маркировка химической продукции. М.: Стандартинформ, 2014. 40 с.

18. Согласованная на глобальном уровне система классификации опасности и маркировки химической продукции (СГС). 4 изд-е, Нью-Йорк—Женева: ООН, 2011. 684 с.
19. FOCUS surface water scenarios in the EU evaluation process under 91/414/EEC. Report of the FOCUS working group on surface water scenarios. EC Document Reference SANCO/4802/2001-rev.2. 2001. 245 p.
20. Горбатов В.С., Кононова А.А. Использование математических моделей прогноза концентраций пестицидов в поверхностных водах с целью оценки их риска для водных организмов // Агрохим. вестн. 2010. № 1. С. 27–30.
21. Surface water tool for exposure predictions – Step 1 and Step 2 – developed by the FOCUS surface water group. Version. 3.2. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/stepsonetwo>
22. Knabel A., Stehle S., Schahafer R., Schulz R. Regulatory FOCUS surface water models fail to predict insecticide concentration in the field // Environ. Sci. Technol. 2012. V. 46. P. 8397–8404.
23. EC (European Commission) Guidance Document on Aquatic Ecotoxicology. Sanco/32/68/2001, rev.4, 2002. 61 p.

Comparative Hazard and Risk Assessment of Pesticides to Aquatic Organisms

V. S. Gorbатов^a, A. A. Astaikina^{b, #}, R. S. Aptikaev^b, and V. V. Tikhonov^c

^aAll-Russian Research Institute of Phytopathology

ul. Institute posses. 5, Moscow region, r.p. Bolshye Vyazemy 143050, Russia

^bM.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science

Leninskie Gory, 1, bld. 12, Moscow 119991, Russia

^cLLC Centre for Ecopesticide Research

ul. Bashilovskaya 1, bld. 1, Moscow 127220, Russia

[#]E-mail: astaikina-anzhel@mail.ru

Data on toxicity for hydrobionts of two hundred active substances of pesticides registered in the Russian Federation were systematized. It were established the classes of pesticide hazard for aquatic organisms in accordance with modern classifications of chemical products hazard. An hydrobionts aggregate risk indicator for pesticides *HARIP* taking into account the risks of toxicity and bioaccumulation was supposed. Calculated *HARIP* indexes can be used in the selection of priority pesticide pollutants in surface water bodies of the Russian Federation.

Key words: pesticides, aquatic organisms, toxicity, hazard, bioaccumulation, indicator of aggregated risk.