

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МИГРАЦИИ ПЕСТИЦИДОВ: АНАЛИЗ, СРАВНЕНИЕ, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРИ ОЦЕНКЕ РИСКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ³

В.Н. Колупаева

ФГБНУ ВНИИ фитопатологии, Большие Вяземы, Московская область, Россия

Эл. почта: amulanya@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24.10.2022; принята к печати 25.11.2022

Загрязнение грунтовых вод пестицидами затронуло все страны на всех континентах. Важной задачей исследователей и регулирующих органов всех стран является разработка методов и инструментов, позволяющих прогнозировать риски применения пестицидов для грунтовых вод. В настоящей статье рассмотрены общепринятые методы изучения миграции пестицидов, проведен их анализ с точки зрения применимости для оценки риска воздействия пестицидов на грунтовые воды. На примерах показано, что имеющиеся методы можно разделить на две категории – прямые и косвенные. Косвенные методы (индексы подвижности или полевые исследования транспорта пестицидов) позволяют сравнивать миграционную способность молекулы пестицида или определять глубину проникновения пестицида в почву. Прямые методы (моделирование, лизиметрические исследования и мониторинг) разрешают определять концентрации пестицида в стоке грунтовых вод или грунтовых водах, что делает их полезными при оценке риска применения пестицидов. Так, сравнивая полученные концентрации в воде с допустимыми пороговыми значениями, можно определить уровень риска пестицида. Примеры расчета индексов подвижности говорят о том, что их оценки различаются между собой. Недостатки полевых опытов миграции связаны с аналитическими проблемами и краткосрочностью исследования. Моделирование миграции пестицидов является эффективным инструментом, позволяющим в краткие сроки получить концентрации пестицидов в водном стоке и определить пестициды, способные в изучаемых условиях загрязнять грунтовые воды. Расчеты показали, что для 40 пестицидов из 180 разрешенных к применению в РФ прогнозные концентрации составляют более 1 мкг/л. Вторым методом, позволяющим прямое определение концентраций в стоке, являются лизиметрические опыты. Многолетнее изучение миграции 4 пестицидов показало, что все токсиканты мигрируют за пределы почвенного профиля. Третьим пригодным инструментом является мониторинг пестицидов в грунтовых водах. Развитие и распространение этого способа контроля пестицидов в грунтовых водах является важной задачей регулирующих органов и научного сообщества РФ на ближайшее время.

Ключевые слова: пестициды, грунтовые воды, миграция, сорбция, модели поведения пестицидов, лизиметр, мониторинг.

METHODS FOR STUDYING PESTICIDES MIGRATION: ANALYSIS, COMPARISON, AND RECOMMENDATIONS FOR USE IN ASSESSING THE RISK OF PESTICIDES IMPACT ON GROUNDWATER

V.N. Kolupaeva

All-Russian Research Institute of Phytopathology, Bolshiye Viazemy, Moscow Region, Russia

Email: amulanya@gmail.com

Groundwater pollution with pesticides has affected every country on every continent. An important challenge for researchers and regulatory bodies in all countries is to develop methods and tools for predicting the risks to groundwater that are associated with pesticide use. In this paper, the generally accepted methods for studying pesticides migration are reviewed and analyzed from the point of view of their applicability for assessing the risk of pesticides impact on groundwater. Using examples, it is shown that the available methods may be divided into two categories, direct and indirect ones. The indirect methods (mobility indices and field studies of pesticide migration) make it possible to compare the migration ability of a pesticide molecule and to determine the depth of penetration of the pesticide into the soil. The direct methods (modeling, lysimetric studies, and monitoring) provide for the determination of pesticide concentrations in groundwater or groundwater leachate, which makes such methods useful in assessing the risk of pesticide use. Thus, by comparing the measured pesticide concentrations in water with acceptable threshold values, it is possible to determine the risk level of a pesticide. Examples of calculating the mobility indices indicate that their estimates differ from each other.

³ По материалам сообщения на II Международной научно-практической конференции «Проблемы экологии и сельское хозяйство в XXI веке», посвященной 135-летию со дня рождения Н.И. Вавилова. Москва, 3–6 октября 2022 года.

Disadvantages of migration field experiments are related to analytical problems and to the short duration of a study. Modeling the migration of pesticides is an effective tool that makes it possible to quickly determine pesticides concentration of in water runoff and to identify the pesticides that can pollute groundwater under specific soil and climatic conditions. Calculations show that for 40 pesticides out of 180 licensed for use in the Russian Federation, their predicted concentrations exceed 1 µg/l. The second method that allows to directly determine concentrations in leachate is lysimetric experiments. A long-term study of the migration of 4 pesticides showed that all toxicants migrate beyond the soil profile. A third useful tool is pesticides monitoring in groundwater. Further development and dissemination of this method for controlling pesticides in groundwater is an important task for the regulatory authorities and the scientific community of the Russian Federation in the near future.

Key words: pesticides, groundwater, migration, sorption, pesticide fate model, lysimeter, monitoring.

Введение

На Всемирном экономическом форуме в Давосе в 2022 году были определены глобальные риски для человечества на ближайшие 10 лет – экономические, геополитические, социальные, технологические и экологические: на 7 месте стоит ущерб окружающей среде, причиняемый человеком. Ранее в 2015 году всеми государствами-членами ООН были приняты 17 целей в рамках «Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», в которой сформулирован 15-летний план по их достижению. И цель номер 6 – это обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов.

Несмотря на все предпринимаемые меры по предотвращению загрязнения грунтовых вод, в них регулярно обнаруживают пестициды и их метаболиты. Эффект от мероприятий по снижению риска для подземных вод от пестицидов наступает очень медленно. Так, например, в Швеции по результатам двадцатилетнего мониторинга пестицидов в грунтовых и поверхностных водах на фоне мероприятий по минимизации риска применения пестицидов для здоровья и окружающей среды выяснилось, что количество образцов с концентрациями пестицидов выше 0,5 мкг/л постепенно снижалось в поверхностных водах, в то время как в грунтовых водах не было отмечено заметное снижение концентраций и частоты встречаемости пестицидов. Авторы объясняют этот факт более коротким путем поступления токсикантов в поверхностные воды, а также недостаточностью принимаемых для предотвращения загрязнения грунтовых вод мер [1-3].

Кроме того, пестициды являются единственными из всех загрязнителей, которые преднамеренно вносятся в почву человеком, поэтому имеется возможность контролировать и регулировать этот процесс. Анализ литературных данных позволил определить 24 пестицида, которые чаще всего обнаруживают в грунтовых водах. Из них 11 веществ запрещены к использованию в РФ, а 13 применяются в сельском хозяйстве, среди них значатся широко применяемые бентазон, изопротурон, МЦПА, тербутилазин, имидаклоприд, клопиралид, метрибузин, хлоротолурон. Именно в отношении последних должны предприниматься усилия, чтобы не допустить их попадания в грунтовые воды.

Целью настоящей работы было проанализировать современные методы изучения миграции пестицидов, сравнить их между собой, выделить наиболее информативные, позволяющие определять пестициды с высоким риском для грунтовых вод с учетом всех факторов их применения.

Материалы и методы исследования

Расчет индексов подвижности

Коэффициент сорбции K_d определяется как распределение пестицида между твердой и жидкой фазами в равновесном состоянии: $C_s = K_d \times C_{aq}$, где C_s – концентрация адсорбированного пестицида, C_{aq} – концентрация пестицида в жидкой фазе, K_d – коэффициент адсорбции.

Индекс *GUS* оценивает вероятность миграции пестицида на основании параметров сорбции (K_{oc}) и разложения (DT_{50}): $GUS = \log(DT_{50}) \cdot (4 - \log(K_{oc}))$.

SCI-GROW рассчитывается пошагово с использованием ряда логарифмических и экспоненциальных зависимостей в зависимости от величины и DT_{50} и K_{oc} .

Моделирование миграции пестицидов

При проведении расчетов полагали, что пестициды вносят в почву путем опрыскивания (без культуры) в максимальной рекомендованной дозе ежегодно в течение 20 лет. В результате моделирования рассчитывали средневзвешенные годовые концентрации пестицидов на глубине 1 м за 20 лет, которые далее ранжировали в порядке возрастания для определения 80%-го перцентиля погодных условий (или 90%-го перцентиля уязвимости всех возможных почвенных и погодных ситуаций, где 80%-й перцентиль почвенных свойств был определен экспертами при разработке стандартных сценариев).

Лизиметрический эксперимент

Лизиметрический опыт проводили в 2015-2020 годах. В июне на поверхность лизиметров вносили пестициды с помощью ранцевого опрыскивателя в максимальной рекомендованной икратно увеличенной дозах. Воду отбирали по мере заполнения мерных сосудов круглогодично.

Результаты и обсуждение

В процессе регистрации препаративной формы пестицида происходит его всестороннее изучение с целью экологической оценки. Под экологической оценкой пестицида понимается процедура установления его опасностей и рисков применения. Под опасностью пестицида понимают способность загрязнять окружающую среду и наносить вред живым организмам. Мерой экологической опасности пестицида часто служат классы в различного рода классификациях. Понятие экологического риска содержится в статье 1 Федерального закона «Об охране окружающей среды», согласно которой это вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности. Экологический риск пестицида – вероятность проявления его экологической опасности в реальных условиях окружающей среды и регламента применения [4-5].

Все методы изучения миграции пестицидов могут быть разделены на две категории: первая – это методы определения опасности миграции (косвенные методы, когда экспозицию пестицида не определяют или определяют в почве, в результате исследования получают значения индексов подвижности или глубину миграции токсиканта в почве), вторая – это методы, позволяющие определить концентрацию пестицидов в водном стоке, они являются одним из этапов оценки риска воздействия пестицидов на грунтовые воды.

Наиболее простым показателем подвижности пестицида в системе почва-вода является коэффициент сорбции K_d , который определяется как распределение пестицида между твердой и жидкой фазами в равновесном состоянии. Значение коэффициента сорбции пестицида зависит от структуры его молекулы и определяет степень его сорбционной способности, но также учитывает свойства почвы. Степень подвижности вещества определяют с помощью классификации по величине константы сорбции, нормированной на содержание органического вещества. В настоящее время коэффициент сорбции – самый понятный и удобный показатель подвижности пестицидов [6].

Агрегированный индекс GUS оценивает вероятность миграции пестицида в грунтовые воды на основании параметров сорбции (K_{oc}) и разложения (DT_{50}). Он был разработан путем анализа графиков зависимости логарифма периода полуразложения DT_{50} от логарифма K_{oc} для подвижных, неподвижных и средне-подвижных соединений с последующей проверкой по данным мониторинга содержания пестицидов в грунтовых водах [7]. В настоящее время этот индекс также широко используется.

Скрининговая модель SCI-GROW [8] была разработана на основе данных многочисленных полевых регистрационных испытаний пестицидов в США. Она представ-

ляет собой эмпирически набор регрессионных уравнений. С 1997 по 2011 год она использовалась Агентством по охране природы (EPA) США для грубой скрининговой оценки концентраций пестицидов в грунтовых водах, однако позже была заменена имитационной моделью PRZM. Кроме K_{oc} и DT_{50} (как и в GUS), в SCI-GROW учитывается также норма расхода препарата.

В табл. 1 показаны индексы подвижности для 19 пестицидов с высоким миграционным потенциалом. Как видно из таблицы, индексы K_{oc} и SCI-GROW занижают миграционную опасность по сравнению с индексом GUS. Также все индексы не учитывают влияние погодных условий на миграцию.

Миграцию пестицидов также изучают в полевых условиях. В качестве показателя подвижности используют максимальную глубину миграции или же центр масс распределения пестицида. Однако по нашим данным [9] и данным других авторов [10], глубина проникновения пестицида в почву редко превышает 30 см. Вместе с тем известно, что эти же вещества часто обнаруживают в грунтовых водах. Это говорит о том, что однолетнего полевого эксперимента недостаточно для оценки подвижности пестицида; ограничения метода анализа часто не позволяют определять пестициды в нижних горизонтах; наличие движения пестицида по так называемым преимущественным путям миграции приводит к тому, что вещество движется с током воды по трещинам и макропорам, не задерживаясь в почвенной толще, и попадает сразу в водный сток.

Таким образом, индексы подвижности не учитывают, как правило, влияние климатических факторов на судьбу пестицида в окружающей среде, а полевые методы имеют свои значительные ограничения, которые снижают информационную ценность этих данных.

Вторая категория методов имеет своей целью определение концентраций пестицидов непосредственно в стоке грунтовых вод или в самих грунтовых водах. Она включает в себя такие методы, как моделирование миграции пестицидов, лизиметрические опыты и мониторинг.

Моделирование пестицидов является эффективным и современным инструментом для оценки риска воздействия пестицидов на грунтовые воды, так как экспериментальными полевыми испытаниями невозможно охватить все разнообразие почвенно-климатических условий регионов, где применяются пестициды. Математическое моделирование передвижения пестицидов в грунтовые воды – это первый этап оценки их миграционного риска. Он необходим для определения риска миграции пестицида в конкретном регионе и принятия решения о необходимости более детального изучения его перемещений в лизиметрических и мониторинговых исследованиях. В Европейском союзе для этой цели используются 4 математические модели: MACRO, PEARL, PRZM и PELMO, в РФ – модель PEARL.

Величины индексов подвижности пестицидов

	Вещество	K_{oc} или K_{foc}	GUS	SCI-GROW, мкг/л
Гербициды	Бентазон	55	3,74	1,64
	Имазетапир	52	6,19	2,32
	Клопиралид	5	5,06	0,82
	Метамитрон	78	2,70	0,69
	МЦПА	74	2,94	0,30
	Напропамид	839	2,68	0,33
	Тербутилазин	231	3,07	0,29
	Топрамезон	171	4,13	0,43
	Хлоридазон	120	3,14	1,02
Фунгициды	Боскалид	772	2,66	0,14
	Гимексазол	57	2,63	0,52
	Оксадиксил	36	5,75	15,38
	Прохлораз	500	3,06	0,24
	Фенаримол	734	3,23	0,10
	Флуопиколид	321	3,63	0,36
	Флуопирам	279	4,97	3,60
	Флутриафол	205	4,20	0,58
Инсектициды	Имидаклоприд	225	3,74	0,31
	Тиаметоксам	56	4,69	0,53
	Хлорантранилипрол	362	4,00	0,18

	очень подвижный, подвижный по K_{oc} ; подвижный по GUS, SCI-GROW
	среднеподвижный по K_{oc} ; умеренно подвижный по GUS, SCI-GROW
	малоподвижный, неподвижный по K_{oc} ; малоподвижный по GUS, SCI-GROW

Были проведены расчеты концентраций в стоке для 180 пестицидов (это практически все действующие вещества, разрешенные для применения в РФ). Расчет концентраций проводили для сценария «Москва» с помощью модели PEARL и определяли средневзвешенные годовые концентрации пестицидов на глубине 1 м.

Расчет показал, что прогнозная концентрация для 40 пестицидов превысила 1 мкг/л, а для 19 составила более 10 мкг/л. Следует сказать, что это высокие концентрации с учетом того, что в ЕС допустима концентрация 0,1 мкг/л [11]. В РФ концентрации в питьевой воде принято сравнивать с гигиеническими нормативами – ПДК в воде [12], которые варьируют в пределах от 0,2 до 1000 мкг/л. Для 19 пестицидов прогнозная концентрация превысила уровень ПДК. Здесь нужно отметить, что расчет проводился для стандартного сценария Москва, который входит в четверку наиболее уязвимых сценариев из 9 разработанных нами [13].

Следующим методом исследования миграции пестицидов являются лизиметрические исследования. Иерархически они стоят выше моделирования и в от-

сутствии мониторинга способны поставлять качественные сведения о концентрации пестицидов в стоке грунтовых вод на глубине нижней границы данного устройства. Лизиметрические опыты максимально приближены к природным условиям, но, как и любой метод, наряду с очевидными достоинствами имеют свои недостатки. Так, например, в лизиметрах наблюдается пристеночный эффект, связанный с движением воды возле стенок монолита. Эта проблема решается путем выбора оптимального соотношения высоты лизиметра к длине его основания при сохранении структуры и влажности почвы [14]. Также на результаты лизиметрического опыта (объем водного стока и концентрация пестицида в элюате) накладываются отпечаток индивидуальные особенности строения порового пространства почвенного монолита: в соседних лизиметрах эти показатели могут отличаться. К числу преимуществ лизиметрических опытов можно отнести контроль условий на верхней и нижней границах, возможность составления водного баланса и послышного наблюдения температуры и влажности. Эти достоинства делают такие эксперименты полезными для

сбора экспериментальных данных для калибровки и валидации моделей поведения пестицидов.

В ходе многолетнего эксперимента, который проходит с 2015 года в Больших лизиметрах МГУ, изучали движение 4 пестицидов – циантранилипрола, паклобутразола, метрибузина и С-метолахлора. Пестициды вносили в почву в установленные регламентом сроки без растений в рекомендованной, а также вратно увеличенной нормах применения. Установлено, что каждый из этих пестицидов был обнаружен в лизиметрическом стоке в обоих вариантах использования (табл. 2) [15, 16]. Причем следует отметить, что максимальная вероятность выноса пестицида за пределы почвенного профиля наблюдалась в первые 1-1,5 месяца после его применения. Обнаруженные концентрации пестицидов в стоке не превысили значений ПДК, принятых в РФ [17].

Мониторинг представляет собой комплексную систему наблюдений за состоянием окружающей среды и является наиболее информативным инструментом контроля пестицидов [18]. Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды в РФ в 1995 г.» определяет мониторинг в РФ как «комплекс выполняемых по научно обоснованным программам наблюдений, оценок, прогнозов, разрабатываемых на их основе рекомендаций и вариантов управленческих решений, необходимых и достаточных для обеспечения управления состоянием окружающей природной среды и экологической безопасностью». Ведомством, ответственным за экологический мониторинг пестицидов в почвах и поверхностных водах РФ, является Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Но мониторинг пестицидов в грунтовых водах практически отсутствует (в 2020 году воды были отобраны из 4 разрезов глубиной до 2 м, в перечне определяемых пестицидов только 16 наименований, и только 3 из них разрешены к применению в настоящее время). Сейчас перечень действующих веществ, по которым проводится мониторинг, нуждается в пересмотре и обновлении. Так, В.Н. Кузьмич с соавт. [19] отмечают, что в список «веществ в системе мониторинга Гидромета входит 48 наименований пестицидов, из которых 21 запрещен к применению в РФ. Этот список не пере-

считывался с 1993 года" Как указывают авторы, в целом, системы регулирования и мониторинга качества воды основаны на принципе «что умеем определять, тем и управляем».

Правительством РФ установлен в 2015 году «Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования». Среди более 300 токсикантов в перечне правительства имеется 15 пестицидов для контроля в воде (альдрин, атразин, гексахлорбензол, ГХЦГ, 2,4-Д, дильдрин, каптан, карбофос, ДДТ и его метаболиты, прометрин, симазин, трифлуралин, ТХАН, фозалон). Логика формирования обоих этих перечней (Гидромета и Правительства) не ясна. В перечне ничтожное количество пестицидов, разрешенных к применению в РФ в настоящее время, в них отсутствуют пестициды из списка чаще всего обнаруживаемых в грунтовых водах и не представлена ясная процедура отбора соединений для контроля. Формирование перечня пестицидов для приоритетного контроля и пострегистрационного мониторинга в грунтовых водах, планирование и разработка программы мониторинга, а также его осуществление требует масштабных усилий специалистов разного профиля, поддержки и финансирования на государственном уровне.

Выводы

Проведенный обзор современных методов изучения миграции пестицидов на основании исследований, проводимых в ФГБНУ ВНИИФ, а также другими авторами, позволил выделить два типа исследований: опыты без и с определением экспозиции пестицидов в водном стоке. Прямые методы определения экспозиции пестицидов в стоке грунтовых вод, в отличие от косвенных (индексы подвижности, глубина распределения в почве), позволяют определить уровень риска, на основании сравнения концентрации с допустимыми пороговыми значениями. Расчеты с помощью имитационной модели PEARL показали, что из 180 действующих веществ для 19 прогнозная концентрация выше ПДК. Многолетнее изучение миграции 4 пестицидов в лизиметрах показало, что все исследованные действующие вещества были обнаружены в стоке грунтовых вод

Табл. 2

Концентрация пестицидов в лизиметрическом стоке и ПДК_{вод.}

Пестицид	Концентрация (максимальная), мкг/л	Концентрация (средняя), мкг/л	ПДК _{вод.} , мкг/л
Циантранилипрол	2,6	0,6	100
Паклобутразол	2,5	0,5	-
Метрибузин	14	0,6	100
С-метолахлор	9,1	0,5	20

на глубине 1,5 м. Их гигиенический риск оценен как низкий. Анализ действующих в РФ мониторинговых мероприятий свидетельствует об их малом объеме и о необходимости пересмотра перечня анализируемых пестицидов с учетом актуального объема их применения, предварительных исследований под-

вижности и токсичности. Средства для финансирования мониторинга могут быть получены путем реализации принципа «загрязнитель платит» (polluter pays principle), зарекомендовавшем себя в качестве наиболее эффективного способа решения проблем загрязнения окружающей среды.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Adielsson S, Törnquist M, Kreuger J. Pesticide monitoring at the catchment scale in Sweden. In: Del Re AAM, Capri E, Fragoulis G, Trevisan M, eds. *Environmental Fate and Ecological Effects of Pesticides. Proc. XIII Symp. Pesticide Chem. Piacenza*; 2007. P. 743-9.
2. Törnquist M, Kreuger J, Adielsson S. Occurrence of pesticides in Swedish water resources against a background of national risk-reduction programmes - results from 20 years of monitoring. In: Del Re AAM, Capri E, Fragoulis G, Trevisan M, eds. *Environmental Fate and Ecological Effects of Pesticides. Proc. XIII Symp. Pesticide Chem. Piacenza*; 2007. P. 770-7.
3. Steffens K, Jarvis N, Lewan E, Lindström B, Kreuger J, Kjellström E, Moeys J. Direct and indirect effects of climate change on herbicide leaching — A regional scale assessment in Sweden. *Sci Total Environ.* 2015;514:239-49.
4. Швыряев АА, Меньшиков ВВ. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе. М.: Изд-во МГУ, 2004.
5. Горбатов ВС, Матвеев ЮМ, Кононова ТВ. Экологическая оценка пестицидов: источники и формы информации. *АГРО XXI.* 2008;1:7-9.
6. Потапов ИС, Горбатов ВС. Количественные закономерности сорбции имидаклоприда почвами. *Агрохимический вестник.* 2010;3:35-7.
7. Gustafson D. Hazards assessment; Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environ Toxicol Chem.* 1989;8:339-57.
8. Estes TL, Pai N, Winchell MF. Comparison of predicted pesticide concentrations in groundwater from SCI-GROW and PRZM-GW models with historical monitoring data. *Pest Manag Sci.* 2016;72:1187-201.
9. Belik A, Kokoreva A, Kolupaeva V. Migration of cyantraniliprole in fractured soils: calibration of pesticide leaching model by using experimental data. *E3S Web of Conferences.* 2020;169:01008.
10. Сметник АА, Спиридонов ЮЯ, Шейн ЕВ. Миграция пестицидов в почвах. М.; 2005.
11. Колупаева ВН. Формирование перечня пестицидов для их мониторинга в грунтовых водах. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018;29(3):93-106.
12. Сеницына ОО, Хамидулина ХХ, Турбинский ВВ, Трухина ГМ, Башкетова НС, Гильденскильд ОА, Амплеева ГП. Гигиеническое нормирование различных видов вод на современном этапе. *Гигиена и санитария.* 2022;101(10):1151-7.
13. Kolupaeva V, Gorbatov V, Nukhina I. Ecological zoning and assessment of the vulnerability of agricultural regions of the Russian Federation to groundwater pollution by pesticides. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci.* 2020;578:012037.
14. Умарова АБ. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. Автореферат дисс... докт. биол.наук. М.ж 2008.
15. Kolupaeva VN, Kokoreva AA, Belik AA, Pletenev PA. Study of the behavior of the new insecticide cyantraniliprole in large lysimeters of the Moscow State University. *Open Agriculture.* 2019;4(1):599-607.
16. Kolupaeva V, Kokoreva A, Bondareva T. The study of metribuzin migration in lysimeters. *E3S Web of Conferences.* 2020;175.
17. Kolupaeva VN, Belik AA, Kokoreva AA, Astaikina AA. Risk assessment of pesticide leaching into groundwater based on the results of a lysimetric experiment. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Key Concepts of Soil Physics: Development, Future Prospects and Current Applications.* 2019; 012023.
18. Черногаева ГМ, Малеванов ЮА, Журавлева ЛР. Мониторинг загрязнения окружающей среды в Российской Федерации: организация наблюдений, обобщение и распространение информации. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* 2015;26(2):129-38.
19. Кузьмич ВН, Пономарева ЛС, Скурлатов ЮИ. Проблемы химической безопасности водных экосистем и новые подходы к оценке качества воды. *Химическая и биологическая безопасность.* 2015;(1-2):95-102.

Общий список литературы/Reference List

1. Adielsson S, Törnquist M, Kreuger J. Pesticide monitoring at the catchment scale in Sweden. In: Del Re AAM, Capri E, Fragoulis G, Trevisan M, eds. *Environmental Fate and Ecological Effects of Pesticides*. Proc. XIII Symp. Pesticide Chem. Piacenza; 2007. P. 743-9.
2. Törnquist M, Kreuger J, Adielsson S. Occurrence of pesticides in Swedish water resources against a background of national risk-reduction programmes – results from 20 years of monitoring. In: Del Re AAM, Capri E, Fragoulis G, Trevisan M, eds. *Environmental Fate and Ecological Effects of Pesticides*. Proc. XIII Symp. Pesticide Chem. Piacenza; 2007. P. 770-7.
3. Steffens K, Jarvis N, Lewan E, Lindström B, Kreuger J, Kjellström E, Moeys J. Direct and indirect effects of climate change on herbicide leaching – A regional scale assessment in Sweden. *Sci Total Environ*. 2015;514:239-49.
4. Shvyriayev AA, Menshikov VV. *Otsenka Riska Vozdeystviya Zagryazneniya Atmosfery v Issleduemom Regione*. Moscow: MGU; 2004. (In Russ.)
5. Gorbatov VS, Matveev YUM, Kononova TV. [Ecological assessment of pesticides: Information sources and forms]. *AGRO XXI*. 2008;1:7-9. (In Russ.)
6. Potapov IS, Gorbatov VS. [Quantitative regularities in imidacloprid sorption by soils]. *Agrohimiicheskiy Vestnik*. 2010;3:35-7. (In Russ.)
7. Gustafson D. Hazards assessment; Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environ Toxicol Chem*. 1989;8:339-57.
8. Estes TL, Pai N, Winchell MF. Comparison of predicted pesticide concentrations in groundwater from SCI-GROW and PRZM-GW models with historical monitoring data. *Pest Manag Sci*. 2016;72:1187-201.
9. Belik A, Kokoreva A, Kolupaeva V. Migration of cyantraniliprole in fractured soils: calibration of pesticide leaching model by using experimental data. *E3S Web of Conferences*. 2020;169:01008.
10. Smetnik AA, Spiridonov YuYa, Shein YeV. *Migratsiya Pestitsidov v Pochvkah*. Moscow; 2005. (In Russ.)
11. Kolupaeva VN. [Compilation of an inventory of pesticides for their monitoring in groundwaters]. *Problemy Ekologicheskogo Monitoringa i Modelirovaniya Ekosistem*. 2018;29(3):93-106. (In Russ.)
12. Sinitsyna OO, Khamidulina KhKh, Turbinskiy VV, Trukhina GM, Bashketova NS, Gildenskiold OA, Ampleyeva GP. [Current hygienic norm setting for different water types]. *Gigiyena i Sanitariya*. 2022;101(10):1151-7. (In Russ.)
13. Kolupaeva V, Gorbatov V, Nukhina I. Ecological zoning and assessment of the vulnerability of agricultural regions of the Russian Federation to groundwater pollution by pesticides. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*. 2020;578:012037.
14. Umarova AB. *Preimushchestvennye Potoki Vlagi v Pochvakh: Zakonomernosti Formirovaniya i Znachenie v Funktsionirovanii Pochv*. PhD Thesis. Moscow; 2008. (In Russ.)
15. Kolupaeva VN, Kokoreva AA, Belik AA, Pletenev PA. Study of the behavior of the new insecticide cyantraniliprole in large lysimeters of the Moscow State University. *Open Agriculture*. 2019;4(1):599-607.
16. Kolupaeva V, Kokoreva A, Bondareva T. The study of metribuzin migration in lysimeters. *E3S Web of Conferences*. 2020;175.
17. Kolupaeva VN, Belik AA, Kokoreva AA, Astaikina AA. Risk assessment of pesticide leaching into groundwater based on the results of a lysimetric experiment. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Key Concepts of Soil Physics: Development, Future Prospects and Current Applications*. 2019; 012023.
18. Chernogayeva GM, Malevanov YuA, Zhuravleva LP. [Monitoring of environmental pollution in the Russian Federation: the organization of surveillance and the synthesis and dissemination of information]. *Problemy Ekologicheskogo Monitoringa i Modelirovaniya Ekosistem*. 2015;26(2):129-38. (In Russ.)
19. Kuz'mich VN, Onomareva LS, Skurlatov YuI. [The problems of the chemical safety of aqueous ecosystems and the novel approaches to water quality assessment]. *Khimicheskaya i Biologicheskaya Bezopasnost'*. 2015;(1-2):95-102. (In Russ.)