



Ракитский В.Н., Заволокина Н.Г., Березняк И.В.

Вероятностная модель оценки и прогнозирования риска здоровью операторов при применении пестицидов в сельском хозяйстве

ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 141014, Мытищи, Россия

Введение. Актуальной задачей остаётся влияние комплекса химических и физических стрессоров на механизаторов сельского хозяйства. Процессы появления и взаимодействия вредных факторов носят вероятностный характер. Удобной моделью для описания поведения реальных физических процессов со случайной динамикой являются марковские процессы.

Цель работы – разработать вероятностную модель оценки риска для операторов при применении пестицидов в сельском хозяйстве на основе теории марковских процессов; оценить с помощью разработанной модели вероятности появления, степени выраженности и прогнозирования дальнейшего влияния неблагоприятных факторов на оператора.

Материалы и методы. Процесс механизированной обработки пестицидом представлен в виде системы, состояния которой ранжированы по степени опасности для оператора: от не опасного до недопустимого. Переход осуществляется под влиянием негативных факторов и характеризуется вероятностью перехода p_{ij} . Построен размеченный граф состояний системы, на основании которого составлена стохастическая матрица $P[ij]$ переходных вероятностей за один шаг. Приведены формулы для расчёта состояний системы через k шагов для однородной и неоднородной цепи Маркова.

Результаты. На основе теории марковских цепей смоделировано поведение системы при применении однокомпонентных препаратов на основе имидаклоприда для штангового опрыскивания полевых культур. Получен вектор распределения вероятностей возможных состояний опасности для работающего после каждого часа опрыскивания в течение 10 ч. После 6 ч работы вероятностный риск для оператора остаться в неопасном состоянии определён на уровне 50%, а вероятностный риск перейти в опасное – на уровне 24%. Получено стационарное распределение вероятностей, указывающее на неизбежность окончательного перехода системы в опасное состояние при достаточном количестве шагов.

Заключение. Рассмотренная модель дополняет существующую систему оценки рисков здоровью оператора, позволяя анализировать, сравнивать и обобщать результаты многолетних исследований. Рассчитанные статистические вероятности могут быть использованы в разработке новых гигиенических регламентов при применении пестицидов.

Ключевые слова: пестициды; оценка риска; случайный процесс; вероятностный риск; цепь Маркова

Для цитирования: Ракитский В.Н., Заволокина Н.Г., Березняк И.В. Вероятностная модель оценки и прогнозирования риска здоровью операторов при применении пестицидов в сельском хозяйстве. *Гигиена и санитария*. 2021; 100 (9): 969–974. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-9-969-974>

Для корреспонденции: Заволокина Наталья Геннадьевна, науч. сотр. отд. гигиена труда ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи. E-mail: zavolokinang@ferisman.ru

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов: Ракитский В.Н. – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи; Заволокина Н.Г. – концепция и дизайн исследования, сбор материала и обработка данных, написание текста; Березняк И.В. – редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Поступила 15.06.2021 / Принята к печати 17.08.2021 / Опубликовано 20.09.2021

Valerii N. Rakitskii, Natalya G. Zavolokina, Irina V. Bereznyak

A probabilistic model for risk assessment and predicting the health risk of occupational exposure to pesticides in agriculture

Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman of the Federal Service for Supervision in Protection of the Rights of Consumer and Man Wellbeing, Mytishchi, 141014, Russian Federation

Introduction. The main point is the influence of a complex of chemical and physical stressors on agricultural machine operators. The processes of occurrence and interaction of harmful factors are probable. Markov processes are a convenient model that can describe the behaviour of physical processes with random dynamics. **Purpose of the work:** was to develop a probabilistic model of risk assessment for agriculture workers during the application of pesticides based on Markov processes' theory and evaluate with the help of the developed model the probability of occurrence, the degree of severity and the prediction of the different influence of adverse factors on the operator.

Materials and methods. The mechanized treatment of pesticide is presented in the form of a system, the states of which are ranked according to the degree of danger to the operator: from non-dangerous to dangerous. The transition occurs under the influence of negative factors and is characterized by the probability of p_{ij} transition. Based on the marked graph of the system states, a stochastic matrix $P[ij]$ of transition probabilities was constructed in one step. There are formulas by which it is possible to calculate the state of systems in k steps for a homogeneous and non-homogeneous Markov chain.

Results. Based on Markov chains' theory, the system's behaviour is modelled when using single-component preparations based on imidacloprid for rod spraying of field crops. Received vector of probabilities of possible hazardous conditions for the employee after each hour of spraying within 10 hours. After 6 hours of working, the probabilistic risk for the operator to stay in a non-dangerous state is about 50 %, and the probability risk of going into a dangerous – at 24 %. The stationary probability distribution results show the inevitability of the transition to a hazardous state of the system if enough steps have been taken.

Conclusion. With this model, you can supplement the operator's health risk assessment system, analyze, compare and summarize the results of years of research. The calculated statistical probabilities can be used in the development of new hygiene regulations with using pesticides.

Keywords: pesticides; risk assessment; random process; probabilistic risk; Markov chains

For citation: Rakitskii V.N., Zavolokina N.G., Bereznyak I.V. A probabilistic model for risk assessment and predicting the health risk of occupational exposure to pesticides in agriculture. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100 (9): 969–974. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-9-969-974> (In Russ.)

For correspondence: Natalya G. Zavolokina, MD, researcher of the department of occupational health Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman of the Federal Service for Supervision in Protection of the Rights of Consumer and Man Wellbeing. E-mail: zavolokinang@fferisman.ru

Information about authors:

Rakitskii V.N., <https://orcid.org/0000-0002-9959-6507> Zavolokina N.G., <https://orcid.org/0000-0002-4506-2761>
Bereznyak I.V., <https://orcid.org/0000-0001-9501-092X>

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment. The study had no sponsorship.

Contribution: Rakitskii V.N. – responsibility for the integrity of all parts of the manuscript, approval of the final version of the article; Zavolokina N.G. – concept and design of the study, collection and processing of material, writing a text; Bereznyak I.V. – editing, responsibility for the integrity of all parts of the article. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version

Received: June 15, 2021 / Accepted: August 17, 2021 / Published: September 20, 2021

Введение

Хорошо известно, что в процессе трудовой деятельности механизаторы сельского хозяйства подвергаются воздействию комплекса разнообразных динамичных факторов окружающей среды физического и химического характера [1]. Физические факторы, такие как шум, вибрация или неблагоприятный микроклимат, способны усиливать токсичность воздействия применяемых пестицидов и агрохимикатов, образуя сложную систему совместно действующих стрессоров.

Воздействующие факторы можно условно разделить:

- на объективные, повлиять на которые невозможно;
- зависимые, которыми можно управлять;
- неизвестные влияющие факторы, придающие процессу случайный характер.

Исследование поведения системы, состоящей из совокупности переменных, возможно с использованием двух видов моделирования – физического и математического. Физические модели, такие как эксперименты на животных или полевые испытания, позволяют получить наиболее полную информацию об изучаемом объекте. Если проведение эксперимента по ряду причин оказывается экономически неэффективным или физически невозможным, например, слишком долговременным, на помощь приходит математическое описание поведения исследуемой системы. Математическая модель заменяет реальное исследование, устанавливая законы, связывающие переменные между собой.

Процесс изменения во времени состояния какой-либо системы в соответствии с вероятными закономерностями называется случайным, или вероятностным, процессом. Удобной моделью для достаточно точного описания поведения реальных физических процессов со случайной динамикой являются марковские процессы. Благодаря хорошо разработанным алгоритмам математических расчётов марковские модели нашли применение в самых разных отраслях – радиотехнике, автоматике, теории надёжности и массового обслуживания, физике, биологии, а также в различных областях медицины [2]. Например, с помощью цепей Маркова описана вероятностная модель оценки риска профессиональных заболеваний под влиянием вредных факторов производства [3], предложено моделирование кумулятивного воздействия нескольких вредных факторов на оператора радиоэлектронных средств [4], составлен прогноз эффективности лечебно-диагностических мероприятий при первичной открытоугольной глаукоме [5]. Для механизаторов, работающих с пестицидами, вопросы совместного воздействия многих факторов также остаются актуальными.

Материалы и методы

Для оценки риска здоровью операторов при применении пестицидов ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана разработана и успешно используется физическая модель – полевые исследования применяемых препаратов в натуральных условиях. В соответствии с методом риск* воздействия пестицида на

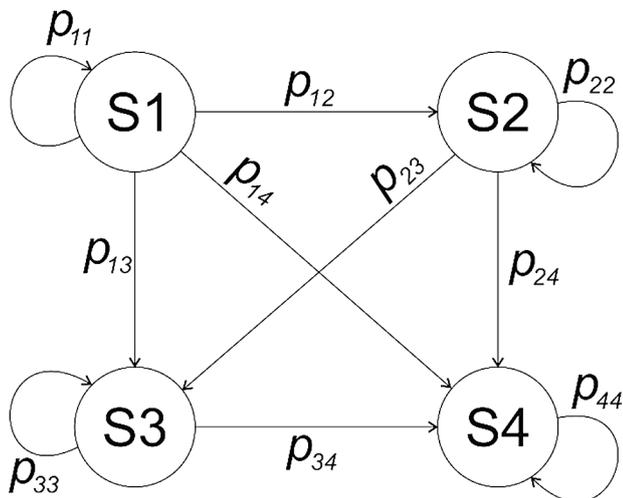
работающих определяется коэффициентами безопасности комплексного (ингаляционного и дермального) воздействия действующего вещества по экспозиции (КБсумм) и по поглощённой дозе (КБп). Расчёт этих коэффициентов опирается на гигиенические нормативы и данные, полученные в ходе токсикологических и натуральных исследований. Данные полевых испытаний имеют особую ценность, поскольку помимо измеренных концентраций действующего вещества пестицида в воздухе рабочей зоны и на коже работающих позволяют оценить влияние сопутствующих полученным результатам условий, таких как параметры микроклимата, метеосостояния, марка применяемой техники, продолжительность работы с пестицидом и используемые средства защиты. Риск здоровью оператора оценивается количественно, при воздействии определённого химического вещества в конкретных условиях применения, и в результате опыта может принимать различные, заранее неизвестные значения. В реальных условиях сельскохозяйственного производства механизм формирования экспозиционных уровней пестицидов в воздухе рабочей зоны и на коже работающих имеет в большинстве случаев хаотичный характер и зависит от множества факторов: физико-химических свойств препарата, многокомпонентности препаративной формы, направления и скорости ветра, герметичности тракторной кабины, технических особенностей опрыскивающих систем, температурно-влажностного режима, испарений с поверхности почвы и растений, вида обрабатываемой культуры, профессиональных навыков и гигиенической грамотности оператора [6]. Таким образом, совокупность воздействующих на оператора факторов образует сложную динамическую систему, процессы в которой взаимосвязаны, взаимодействуют и при многократных повторениях протекают по-разному, обнаруживая случайный характер. Установить закономерности в такой системе возможно, используя вероятностные характеристики составляющих её факторов.

Протекание какого-либо процесса и прогнозирование его будущего состояния в любой момент времени на основании известного настоящего описывается марковскими процессами, где появление случайных событий представлено в виде вероятностей переходов из одного состояния в другое. При этом предполагается, что переход в каждое следующее состояние зависит только от предыдущего, образуя последовательность (цепь). В теории марковских цепей основными вероятностными характеристиками являются не математическое ожидание и корреляционная функция, а вектор начальных состояний и матрица перехода [7].

Переход осуществляется под влиянием воздействующих негативных факторов и характеризуется вероятностью перехода p_{ij} . Каждая величина p_{ij} является переменной и показывает вероятность попадания в j -е состояние из i -го.

Для моделирования поведения системы можно рассчитывать, например, аксиоматические вероятности [8]. Согласно аксиомам Колмогорова, вероятность есть функция множества случайных событий. Такие модели могут учитывать совместное воздействие вредных факторов различной природы, кумулятивные свойства химических веществ и т. д. Переход происходит в результате развивающихся событий, в нашем случае это – повышение концентрации пестицида

* МУ 1.2.3017-12. Оценка риска воздействия пестицидов на работающих: Методические указания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора; 2012. 15 с.



Размеченный граф состояний системы, моделирующий процесс механизированной обработки пестицидом, возможные переходы и вероятности, соответствующие этим переходам.

A labeled system state graph simulated the process of mechanized pesticide treatment, possible transitions and probabilities corresponding to these transitions.

в воздухе рабочей зоны, увеличение температуры в кабине трактора, ошибка оператора (человеческий фактор), отказ техники и др. Каждый негативный фактор имеет свою вероятность проявления, которую можно задать, опираясь на известные литературные или технические данные. Например, нарушение температурного режима вероятнее в летнее время, в кабине трактора, не оборудованного кондиционером; вероятность превышения допустимых уровней шума и вибрации выше у старой техники; вероятность загрязнения пестицидом воздуха рабочей зоны и кожных покровов повышается при нарушении герметизации кабины и отсутствии средств защиты и т. д. Переходные вероятности в этом случае рассчитываются как совместные вероятности появления различных стрессоров с учётом характера их взаимодействия. Поскольку с ростом числа учитываемых факторов количество возможных состояний и переходов системы быстро возрастает, расчёты достаточно сложны и требуют привлечения специалистов в области математической статистики и использования компьютерных программ.

Моделирование также возможно на основе вероятностей, полученных экспериментально, то есть статистических. В этом случае за реальную вероятность принимается относительная частота осуществления некоторого события в испытаниях, многократно проведённых при одних и тех же условиях [8]. В нашем случае это – данные большого количества однотипных наблюдений, полученных в ходе натуральных исследований.

Представим процесс механизированной обработки пестицидом как некоторую физическую систему S, которая может находиться в одном из состояний, ранжированных по степени опасности для работающего (оператора): S1 – не опасное, S2 – умеренно опасное, S3 – высокоопасное, S4 – недопустимое.

Система меняет своё состояние в моменты времени t , называемые шагами процесса, зафиксированные временем отбора проб.

Поскольку время отбора одной пробы непродолжительно, интервалом времени при отборе каждой пробы можно пренебречь: $t + \Delta t \rightarrow t$. Количество состояний системы чётко определено, число зафиксированных моментов времени является конечным (счётным), а значит, имеем дискретный марковский процесс с дискретным временем или цепь Маркова.

Таблица 1 / Table 1

Матрица P[ij] вероятностей перехода за один шаг дискретного марковского процесса с состояниями S1, S2, S3, S4

The matrix P[ij] of transition probabilities over one step of the discrete Markov's process with states S1, S2, S3, S4

	S1	S2	S3	S4
S1	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}
S2	0	p_{22}	p_{23}	p_{24}
S3	0	0	p_{33}	p_{34}
S4	0	0	0	1

Дискретное (счётное) время выбирается для упрощения расчётов. Для описания системы с непрерывным временем наблюдения вероятности перехода заменяются функцией – плотностью распределения вероятностей, и описываются системой дифференциальных уравнений Колмогорова, где производная вероятности состояния приравняется к сумме произведений плотности вероятности перехода, умноженной на вероятность соответствующего состояния [8].

Для описания цепи Маркова разметим граф состояний (см. рисунок). Вершины этого графа обозначают возможные состояния системы, стрелками указаны возможные переходы, а число над стрелкой – вероятность такого перехода.

Заметно, что переход может или не происходить вовсе (состояние системы не меняется), или осуществляться только в состояния с возрастающей опасностью. Состояние S4 является поглощающим – если система пришла в это состояние, она останется в нём со 100%-й вероятностью.

На основе размеченного графа составим матрицу P[ij] переходных вероятностей за один шаг, представленную в виде таблицы (табл. 1).

Размер матрицы совпадает с числом состояний цепи. Матрица является стохастической: числа в ней не отрицательны, а сумма каждой строки равна единице. Другими словами, в любой момент времени система должна находиться в каком-то из указанных состояний, но только в одном.

Зная начальное состояние системы и заполненную матрицу переходных вероятностей, можно определить состояние цепи в любой заданный момент времени с помощью уравнения марковской цепи, выведенного из формулы полной вероятности [8]:

$$p_j(k) = \sum_{j=1}^n p_j(k-1) p_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

где $p_j(k)$ – вероятности состояний системы на k -м шаге; p_{ij} – вероятности переходов из состояния i в состояние j .

Переписав формулу (1) в матричном виде, получим выражение для состояния однородной цепи на k -м шаге:

$$\{p_j(k)\} = \{p_j(0)\} \cdot P^k, \quad (2)$$

где $p_j(0)$ – вектор начального распределения; P – стохастическая матрица.

Поскольку в начале опыта система находится в состоянии S1, вектор начального распределения имеет вид: $p_j(0) = \{1; 0; 0; 0\}$.

Тогда распределение переходных вероятностей нашей системы после первого шага:

$$\{p_j(1)\} = \{p_j(0)\} \cdot P = (1; 0; 0; 0) \cdot P \quad (3)$$

После второго шага:

$$\{p_j(2)\} = \{p_j(1)\} \cdot P = \{p_j(0)\} \cdot P^2 \quad (4)$$

После третьего:

$$\{p_j(3)\} = \{p_j(2)\} \cdot P = \{p_j(1)\} \cdot P^2 = \{p_j(0)\} \cdot P^3 \text{ и т. д.} \quad (5)$$

Смысл этих преобразований заключается в возможности по известным исходным данным дать вероятностный прогноз для оператора оказаться в одном из состояний опасности в течение, например, рабочего дня при условии дальней-

Таблица 2 / Table 2

Средние концентрации имидаклоприда, обнаруженного в воздухе рабочей зоны и на коже работающих
The average imidacloprid concentration in the air inhaled by workers and on their cutis

Препарат Preparation	Воздух рабочей зоны Inhaling exposure		Смывы с кожных покровов Cutaneous exposure	
	общее количество проб/из них положительных total number of samples /including positive ones	средняя концентрация, мг/м ³ average concentration, mg/m ³	общее количество проб/из них положительных total number of samples/ including positive ones	среднее содержание, мг/см ² average concentration, mg/cm ²
1	8/2	0.0036 ± 0.0008	6/1	0.00000039 ± 0.00000009
2	8/0	0.0025	6/3	0.00000042 ± 0.0000001
3	8/0	0.0025	5/4	0.00000043 ± 0.0000004
4	8/0	0.0025	7/7	0.0000004 ± 0.000001
5	7/2	0.0026 ± 0.0001	5/2	0.00000043 ± 0.0000002
6	8/0	0.0025	5/1	0.00000036 ± 0.0000001
7	6/0	0.0025	6/0	0.00000016 ± 0.00000005
8	8/0	0.0025	5/5	0.00000019 ± 0.0000006
9	8/2	0.0028 ± 0.00017	7/0	0.00000016 ± 0.00000004
10	8/0	0.0025	7/0	0.00000015 ± 0.000000737
11	8/0	0.0025	6/0	0.00000019 ± 0.00000005
12	8/0	0.0025	6/0	0.00000018 ± 0.00000005
13	8/0	0.0025	6/0	0.00000018 ± 0.00000005
14	8/0	0.0025	6/0	0.00000018 ± 0.00000005
15	8/2	0.0035 ± 0.00069	6/0	0.00000018 ± 0.00000005
16	8/0	0.0025	7/0	0.00000015 ± 0.000000737
17	8/0	0.0025	5/0	0.00000018 ± 0.00000005
18	6/0	0.0025	7/0	0.00000018 ± 0.00000005
19	8/0	0.0025	6/0	0.00000018 ± 0.00000005
20	8/0	0.0025	7/0	0.00000015 ± 0.00000037

шей работы с этим же препаратом. По тому, на каком шаге система придёт в состояние «недопустимое», можно определить максимально возможную длительность работы без риска здоровью. При этом предполагается, что цепь Маркова является однородной, или стационарной, то есть вероятность перехода p_{ij} зависит не от номера шага, а от последовательности состояний при переходе.

Если в течение рабочего дня оператор обрабатывает поле различными препаратами, нужно использовать алгоритм расчётов для неоднородной цепи Маркова:

$$\{p_j(k)\} = \{p_j(0)\} P(1) P(2) \dots P(k), \quad (6)$$

где $P(1), P(2), \dots P(k)$ — стохастические матрицы переходов, рассчитанные для каждого из применяемых препаратов.

Результаты

Проанализированы данные натурных испытаний, проведённых ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана за период с 2006 по 2020 г. по определению экспозиционных уровней инсектицида имидаклоприда в воздухе рабочей зоны и на коже работающих. Для моделирования выбраны исследования условий труда при применении 20 однокомпонентных препаратов в жидкой препаративной форме: водорастворимый концентрат (12 препаратов), суспензионный концентрат (3), концентрат эмульсии (3), концентрат суспензии (2). Содержание имидаклоприда в каждом препарате варьировалось от 150 до 300 г/л. Все препараты применялись для наземного штангового опрыскивания полевых культур с нормой расхода от 0,25 до 0,6 л/га, расход по действующему веществу — 50–60 г/га. Обработка каждым препаратом проводилась в течение 1 ч. Использованы опрыскиватели ОП-2000,

агрегатированные с трактором МТЗ-80 или МТЗ-82. Метеоусловия при исследованиях — температура воздуха 20–25 °С, относительная влажность — 40–72%. Температура в кабине трактора — 22–32 °С.

В результате определения экспозиционных уровней установлено, что в процессе опрыскивания под действием совокупности различных неблагоприятных факторов система с вышеуказанными параметрами может переходить в состояния, классифицируемые по степени опасности здоровью оператора:

- не опасное (S1) — имидаклоприд не обнаружен ни в одной из проб, концентрация действующего вещества учитывается на уровне ½ пределов обнаружения;
- малоопасное (S2) — имидаклоприд присутствует менее чем в половине проб воздуха рабочей зоны или смывов, в концентрациях на уровне предела обнаружения;
- умеренно опасное (S3) — имидаклоприд обнаружен в половине или более отобранных проб воздуха рабочей зоны или смывов; средние концентрации в 2–3 раза выше, чем в состоянии S2;
- опасное (S4) — имидаклоприд обнаруживается в каждой отобранной пробе смыва, средние концентрации в 10–20 раз выше, чем в состоянии S3.

Недопустимых состояний, при которых средние концентрации действующего вещества превышают гигиенические нормативы, в результате исследований не установлено. Шагом процесса считаем продолжительность одного исследования — 1 ч.

Всего отобрано 276 проб, из них 155 — пробы воздуха рабочей зоны (кабина трактора), 121 — пробы смывов с кожи работающих. Результаты определения концентраций приведены в табл. 2.

Таблица 3 / Table 3

Стохастическая матрица $P_{[ij]}$ вероятностей перехода за один шаг дискретного марковского процесса с состояниями S1, S2, S3, S4**The stochastic matrix $P_{[ij]}$ of transition probabilities over one step of the discrete Markov's process with states S1, S2, S3, S4**

	S1	S2	S3	S4
S1	0.894928	0.032609	0.054348	0.018116
S2	0	0.607843	0.294118	0.098039
S3	0	0	0.791667	0.208333
S4	0	0	0	1

Вероятности перехода системы за один шаг из состояния S_i в состояние S_j определены статистически как отношение числа перешедших в S_j из S_i исследований к числу всех, находящихся в состоянии S_i в начале исследования. Все расчёты проведены с помощью программы Excel. В результате расчётов получена матрица вероятностей перехода, представленная в виде таблицы (табл. 3).

Начальный вектор распределения вероятностей $P(0) = \{1; 0; 0; 0\}$, то есть изначально система находилась в состоянии S1 (не опасное). Поэтому распределение вероятностей после первого шага совпадает с первой строкой матрицы и имеет вид: $P(1) = \{0,894928; 0,032609; 0,054348; 0,018116\}$.

На практике это означает, что через 1 ч после начала опрыскивания вероятность для оператора остаться в начальном состоянии S1 определена на уровне 0,895, перейти в состояние S2 – 0,033, в состояние S3 – 0,054, в состояние S4 – 0,018.

Пользуясь формулой (1), рассчитаем вероятностный прогноз для оператора оказаться в каком-либо из состояний в течение каждого часа рабочего дня и определим, на каком шаге вероятность опасного состояния превысит вероятность остальных. Для этого поочередно умножаем на матрицу $P_{[ij]}$ вероятностей перехода за один шаг (см. табл. 3) вектор распределения вероятностей после каждого предыдущего шага $P(1), P(2), \dots, P(10)$. Результаты представлены в табл. 4.

По шагам процесса хорошо видно, как с течением времени, по мере накопления вредных факторов, вектор их совокупного воздействия на оператора смещается в сторону опасного состояния. Вероятность неопасного состояния S1 стабильно уменьшается, а опасного S4 – стабильно увели-

Таблица 4 / Table 4

Распределение вероятностей состояний системы после каждого шага процесса в течение рабочего дня**The probability distribution of the system states after each step of the process during the working day**

Шаги процесса, ч Process steps, hour	S1	S2	S3	S4
1	0.894928	0.032609	0.054348	0.018116
2	0.800895	0.049003	0.101254	0.048848
3	0.716743	0.055903	0.138099	0.089256
4	0.641433274	0.057352029	0.164723509	0.136491188
5	0.574036	0.055777	0.182135	0.188052
6	0.513721	0.052622	0.191793	0.241864
7	0.459743	0.048738	0.195233	0.296286
8	0.411437	0.044617	0.19388	0.350067
9	0.368206	0.040536	0.188972	0.402286
10	0.329517673	0.036646453	0.181536148	0.452299727

чивается; вероятность малоопасного состояния S2 немного возрастает к середине рабочего дня, но к концу его начинает снижаться; вероятность умеренно опасного состояния S3 постепенно увеличивается, но на восьмом шаге также начинает снижаться.

Другой интересный результат – низкая вероятность промежуточных состояний S2 и S3. Если влияние негативных факторов имеется, то оно накапливается достаточно быстро для перехода в опасное состояние; в противном случае система остается в не опасном.

Полученные результаты наглядно показывают обоснованность ограничения для работы с пестицидами в течение 6 ч. Распределение вероятностей после 6-го шага, то есть в конце рабочего дня: $P(6) = \{0,513721; 0,052622; 0,191793; 0,241864\}$.

Понятно, что неопасное состояние практически вдвое вероятнее опасного. Округляя полученные величины до сотых долей, делаем вывод, что с вероятностью 0,51 оператор останется в неопасном состоянии S1, с вероятностью 0,24 – окажется в опасном состоянии S4, с вероятностью 0,19 – окажется в умеренно опасном состоянии S3 и с вероятностью 0,05 – окажется в малоопасном состоянии S2.

Для 8-часового рабочего дня получены сопоставимые величины вероятности состояний S1 и S4 – на уровне 0,41 и 0,35 соответственно.

Вероятность опасного состояния начинает превышать вероятность любого другого начиная с 9-го шага. Распределение вероятностей принимает вид (см. табл. 4): $P(9) = \{0,368206; 0,040536; 0,188972; 0,402286\}$

Эта тенденция сохраняется и в дальнейшем, распространяясь на все последующие шаги, а рассчитанное предельное (стационарное) распределение вероятностей выглядит так: $P(st) = \{0; 0; 0; 1\}$

Полученное стационарное распределение не зависит от начального состояния системы и показывает, что в ней протекает эргодический процесс. Другими словами, через определённое количество шагов система неизбежно и окончательно перейдёт в опасное состояние. На практике это не достижимо, поскольку число таких шагов достаточно велико.

Обсуждение

Предложена универсальная математическая модель вероятностной оценки риска здоровью оператора при применении пестицидов, основанная на теории марковских процессов. В расчётах используются методы стохастического моделирования, результатом которого является вероятностное значение для оператора в процессе работы оказаться в каком-либо из состояний, от не опасного до недопустимого, под влиянием воздействия многочисленных негативных факторов.

На основе предложенного алгоритма рассмотрена модель, основанная на частном случае марковских процессов – цепи Маркова, представляющая обработку пестицидом как дискретный процесс с дискретным временем. Поскольку математическая модель тем точнее, чем однороднее выборка наблюдений, смоделировано поведение системы при применении однокомпонентных препаратов на основе имидаклоприда для штангового опрыскивания полевых культур.

В результате проведённых расчётов для работающего получен вектор распределения вероятностей возможных состояний опасности для каждого часа опрыскивания. Вероятностный риск для оператора остаться в неопасном состоянии после 6-часового рабочего дня (разрешённое время работы с пестицидом) определён на уровне 50%, а вероятностный риск перейти в опасное – на уровне 24%.

После 8 ч работы эти риски сопоставимы – 41 и 35% соответственно. После 9-го часа вероятностный риск опасного состояния составляет 40% и начинает превышать вероятность остальных.

Полученное стационарное распределение вероятностей $P(st)$ подтверждает утверждение центральной предельной теоремы: «сумма случайных величин есть величина неслу-

чайная» [9] и означает неизбежность окончательного перехода системы в опасное состояние при достаточном количестве шагов.

Заключение

Рассмотренная модель дополняет существующую систему оценки рисков здоровью оператора, позволяя анализировать, сравнивать и обобщать результаты многолет-

них исследований, не сосредоточиваясь на узком вопросе вредного воздействия отдельных химических веществ в конкретных условиях применения. В дальнейшем на основе статистических вероятностей будет рассмотрена реализация марковского процесса для других пестицидов и технологий их применения в сельском хозяйстве. Результаты таких расчётов могут быть использованы в разработке новых гигиенических регламентов при применении пестицидов.

Литература

1. Варшамов Л.А., Безрукова Г.А., Спиринов В.Ф., Новикова Т.А. Профессиональная заболеваемость работников сельского хозяйства Саратовской области. *Здоровье населения и среда обитания*. 2011; (11): 10–3.
2. Тихонов В.И., Миронов М.А. *Марковские процессы*. М.: Советское радио; 1977.
3. Подгорнов В.В., Нестеренко А.Г. Моделирование риска профессиональных заболеваний с помощью цепей Маркова. *Наука Кубани*. 2007; (3): 19–22.
4. Дзюндзюк Б.В., Наумейко И.В., Сердюк Н.Н. Содержательная модель воздействия нескольких вредных факторов на человека. *Радиоэлектроника и информатика*. 2000; (3): 131–2.
5. Высоккая Е.В., Козина О.А., Страшненко А.Н., Синенко С.А., Соломоко С.Б. Марковская модель лечебно-диагностических мероприятий при первичной открытоугольной глаукоме. *Прикладная радиоэлектроника*. 2010; (2): 225–31.
6. Ракитский В.Н., Березняк И.В., Ильницкая А.В. Модель оценки риска условий труда при применении пестицидов: итоги и развитие. *Гигиена и санитария*. 2016; 95(11): 1041–4. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-11-1041-1044>
7. Петунин Ю.И. *Приложение теории случайных процессов в биологии и медицине*. Киев: Наукова думка; 1981.
8. Кирьянов Б.Ф., Токмачев М.С. *Математические модели в здравоохранении*. Великий Новгород; 2009.
9. Мухин О.И. *Моделирование систем. Электронный учебник*. Пермь: ПГТУ; 2011.

References

1. Varshamov L.A., Bezrukova G.A., Spirin V.F., Novikova T.A. Professional morbidity of agricultural workers of the Saratov region. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2011; (11): 10–3. (in Russian)
2. Tikhonov V.I., Mironov M.A. *Markov Processes [Markovskie protsessy]*. Moscow: Sovetskoe radio; 1977. (in Russian)
3. Podgornov V.V., Nesterenko A.G. Occupational disease risk modeling by Markov chains. *Nauka Kubani*. 2007; (3): 19–22. (in Russian)
4. Dzyundzyuk B.V., Naumeyko I.V., Serdyuk N.N. Substantial model of the impact of several harmful factors on a person. *Radioelektronika i informatika*. 2000; (3): 131–2. (in Russian)
5. Vysotskaya E.V., Kozina O.A., Strashnenko A.N., Sinenko S.A., Solomko S.B. A Markov model of medical and diagnostic measures at primary open-angle glaucoma. *Prikladnaya radioelektronika*. 2010; (2): 225–31. (in Russian)
6. Rakitskiy V.N., Bereznjak I.V., Il'nitskaya A.V. Model of the assessment of the risk of conditions of the work with the use of pesticides: results and development. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2016; 95(11): 1041–4. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-11-1041-1044> (in Russian)
7. Petunin Yu.I. *Application of the Theory of Random Processes in Biology and Medicine [Prilozhenie teorii sluchaynykh protsessov v biologii i meditsine]*. Kiev: Naukova dumka; 1981. (in Russian)
8. Kir'yanov B.F., Tokmachev M.S. *Mathematical Models in Health Care [Matematicheskie modeli v zdravookhraneni]*. Velikiy Novgorod; 2009. (in Russian)
9. Mukhin O.I. *Modeling of Systems. Electronic Textbook [Modelirovanie sistem. Elektronnyy uchebnik]*. Perm': PGU; 2011. (in Russian)