Геоэкология

DOI: 10.35634/UDSU.2026.31.73.008

УДК 004.42 + 595.7:502/504

А.Б. Третьякова, А.Р. Гордон, М.Н. Мукминов

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ МОТОРНОЙ АКТИВНОСТИ НАСЕКОМЫХ В ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Аннотация. В условиях интенсификации аграрного сектора пестицидная нагрузка становится ключевым фактором антагонизма техносферы и биосферы, приводящим к деградации популяций насекомых-опылителей. Цель исследования – разработка и апробация программного комплекса на базе алгоритмов компьютерного зрения для количественной оценки изменений локомоторной активности медоносных пчел (*Apis mellifera* L.) под воздействием пестицидов. Установлено, что воздействие пестицида имидаклоприда в сублетальной концентрации 0,001 мкг/объект вызывает статистически значимые изменения поведенческих метрик. Наиболее чувствительным индикатором стресса оказался индекс периферийного таксиса, достигший 99,8 % в опытной группе против 0,0 % в контроле. Разработанный программный комплекс обеспечивает объективную количественную оценку сублетальных эффектов пестицидов, не фиксируемых традиционными методами.
Ключевые слова: медоносная пчела, пестициды, имидаклоприд, локомоторная активность, компьютерное зрение, трекинг объектов.

Для цитирования: Третьякова А.Б., Гордон А.Р., Мукминов М.Н. Разработка программного комплекса для количественной оценки моторной активности насекомых в экотоксикологических исследованиях // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т. 9. Вып. 3. С. 692 – 705. DOI: 10.35634/UDSU.2026.31.73.008

Введение

Глобальная трансформация сельскохозяйственного ландшафта в условиях роста потребности в продовольственной безопасности приводит к неизбежному расширению техносферы и усилению её давления на биосферу. Одним

из наиболее острых проявлений антагонизма техногенных и природных систем является массовое применение средств химической защиты растений. Пестицидная нагрузка, является неотъемлемым элементом современной аграрной техносферы, оказывает системное воздействие на биоразнообразие, приводя к деградации популяций ключевых видов-опылителей, в частности медоносной пчелы [1–2]. Снижение численности опылителей угрожает устойчивости агроэкосистем и ставит под риск эффективность биосферных функций, что противоречит концепции устойчивого развития. Традиционные подходы к экотоксикологической оценке безопасности агрохимикатов преимущественно опираются на летальности – смертность особей за фиксированный период. Однако современные исследования показывают, что сублетальные эффекты, проявляющиеся в нарушении нейромоторных функций, изменении когнитивных способностей и дезориентации, возникают при значительно более низких концентрациях загрязнителей. Именно эти скрытые нарушения служат ранними маркерами неблагополучия природно-техногенных комплексов, но их регистрация методами визуального наблюдения затруднена из-за высокой субъективности, трудоемкости и низкой пропускной способности.

В контексте задач экологизации техносферы существует потребность во внедрении объективных инструментальных методов контроля, способных фиксировать малейшие отклонения в поведении биообъектов [3]. Цифровизация экологических наук открывает новые возможности для решения данной проблемы. Информационные и компьютерные технологии, в частности методы компьютерного зрения и машинного обучения, позволяют автоматизировать процесс сбора и анализа этологических данных. Использование алгоритмов трекинга и цифровой обработки видеопоследовательностей обеспечивает переход от качественных описаний к точным количественным метрикам

двигательной активности [4]. Разработка специализированного программного комплекса, учитывающего биологические особенности насекомых и оптические артефакты экспериментальной среды, становится актуальной научно-технической задачей.

Целью данной работы является разработка и апробация программного комплекса на базе методов компьютерного зрения для количественной оценки изменений двигательной активности насекомых-опылителей под воздействием пестицидов, что позволит повысить точность экотоксикологического мониторинга и обоснованность регуляторных решений в сфере охраны окружающей среды.

Материалы и методы

В качестве модельного объекта выступали рабочие особи медоносной пчелы (*Apis mellifera* L.). Для минимизации возрастной вариативности в эксперименте использовались пчелы в возрасте 10–15 дней, отобранные из благополучной семьи в Верхнеуслонском районе Республики Татарстан, не имеющей признаков заболеваний. Перед началом тестирования особи подвергались пероральному воздействию сублетальных доз пестицида с активным веществом имидаклоприд (доза 0,001 мкг/объект) [5–6]. Контрольная группа обрабатывалась дистиллированной водой без активного вещества. После обработки пчелы помещались в садки для акклиматизации на 1 час перед началом видеорегистрации. Регистрация локомоторной активности проводилась в лабораторных условиях *in vitro* с использованием оптико-цифрового комплекса [7]. Экспериментальная арена представляла собой стандартную стеклянную чашку Петри (диаметр 90 мм), установленную на матовую подложку из политетрафторэтилена для обеспечения равномерного диффузного отражения. Для предотвращения побега насекомых использовалась прозрачная крышка с микроперфорацией, обеспечивающей газообмен.

Видеофиксация осуществлялась цифровой камерой разрешением не менее 2 Мп с частотой кадров 30 fps, закрепленной на штативе строго вертикально над ареной с оптической осью $\leq 2°$. Освещение формировалось кольцевым светодиодным источником (цветовая температура 5500 К) коаксиально объективу, что позволяло минимизировать теневые эффекты. Видеозапись сохранялась в формате MP4 для последующей оффлайн-обработки.

Для обработки видеопоследовательностей был разработан специализированный программный модуль на базе алгоритмов компьютерного зрения. Ключевым этапом являлась предварительная обработка кадров, включающая преобразование в полярные координаты относительно центра чашки Петри и применение медианной фильтрации для подавления оптических артефактов отражения. Трекинг объекта реализован через адаптивную фоновую модель с экспоненциальным сглаживанием и фильтром Калмана, что обеспечило устойчивость сопровождения цели при быстрых перемещениях и временных перекрытиях [8]. В случае потери визуального контакта применялся механизм морфологического восстановления контура объекта. Система автоматически рассчитывала комплекс этологических метрик (табл. 1).

Таблица 1

Этологические метрики, рассчитываемые программным комплексом

Метрика	**Описание**
Локомоторные параметры	Суммарный пройденный путь, средняя и пиковая скорость.
Поведенческие состояния	Классификация на основе спектрального анализа дисперсии смещения центра масс. Состояния «покой», «вибрация», «активное движение».
Пространственное распределение	Индекс зонирования (время пребывания в центральной, средней и периферийной зонах арены) и индекс периферийного таксиса как маркера стрессовой реакции.

Длительность непрерывной видеозаписи для каждой особи составляла 10 минут. Полученные массивы координат и метрик экспортировались в формат

CSV для статистической обработки. Визуализация результатов построения графиков и тепловых карт плотности перемещений осуществлялась также средствами языка Python с использованием библиотек Matplotlib и Seaborn. Сравнение показателей между контрольной и опытной группами проводилось с применением методов непараметрической статистики (критерий Манна-Уитни), так как распределение поведенческих данных отличалось от нормального. Различия считались статистически значимыми при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты

В рамках экспериментальной верификации разработанного программного комплекса было проведено комплексное исследование локомоторной активности медоносных пчел (*Apis mellifera* L.). Была проведена валидация технических характеристик программного комплекса. Анализ показал, что применение адаптивной фоновой модели с экспоненциальным сглаживанием в сочетании с контрастно–ограниченной адаптивной эквализацией гистограммы (CLAHE) позволило обеспечить устойчивую детекцию объекта при варьировании освещенности в диапазоне 800–1200 люкс (табл. 2).

Эффективность продемонстрировал механизм морфологического восстановления объекта, при временном перекрытии пчелы бликами от стенок посуды или при замирании особи система корректно восстанавливала трек в 98,3 % случаев, что критически важно для длительных непрерывных наблюдений.

Таблица 2

Технические метрики работы программного комплекса

Параметр	**Значение**	**Комментарий**
Точность детекции положения	±0,48 мм	Соответствует заявленным ±0,5 мм; обеспечено мультимасштабной детекцией
Частота потери трека	1,73 % кадров	Снижение с 22 % (базовый алгоритм) до < 2 % благодаря фильтру Калмана и морфологическому восстановлению
Время обработки 1 минуты видео	12,4 ± 1,8 с	Обработка на ПК с процессором Intel Core i5, 8 Гб ОЗУ; возможно ускорение при использовании GPU
Точность определения границ чашки Петри	±2 пикселя	Автоматический метод на основе преобразования Хафа показал сопоставимую с ручной разметкой точность

Анализ двигательной активности выявил выраженные различия между контрольной и опытной группами по всем ключевым метрикам (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительная характеристика локомоторных параметров

Параметр	Группа воздействия пестицидов	Контрольная группа	p (U–критерий Манна–Уитни)
Суммарный путь, пикс	6650,7	10351,00	< 0,001
Средняя скорость, пикс/сек	36,40	17,19	< 0,001
Время покоя, %	73,0	97,00	< 0,001
Число смен направления	1705	4970	< 0,001
Индекс периферийного таксиса, %	99,8	0,00	< 0,001

Суммарный путь, пройденный пчелами опытной группы, составил 6650,7 пикселей, что на 35,7 % ниже показателя контрольной группы. При этом средняя скорость перемещения в группе воздействия пестицидов достоверно превысила контрольные значения на 111,7 %. Данная динамика свидетельствует

о качественном изменении паттерна двигательной активности, переход от размеренного исследовательского поведения к стереотипным быстрым перемещениям без выраженной пространственной цели, что характерно для нейротоксического возбуждения при сублетальном воздействии агрохимикатов [9]. Показатель времени покоя также продемонстрировал значимые межгрупповые различия. В контрольной группе пчелы находились в состоянии покоя 97,0 % времени наблюдения, тогда как в опытной группе этот параметр снизился до 73,0 % (рис. 1).

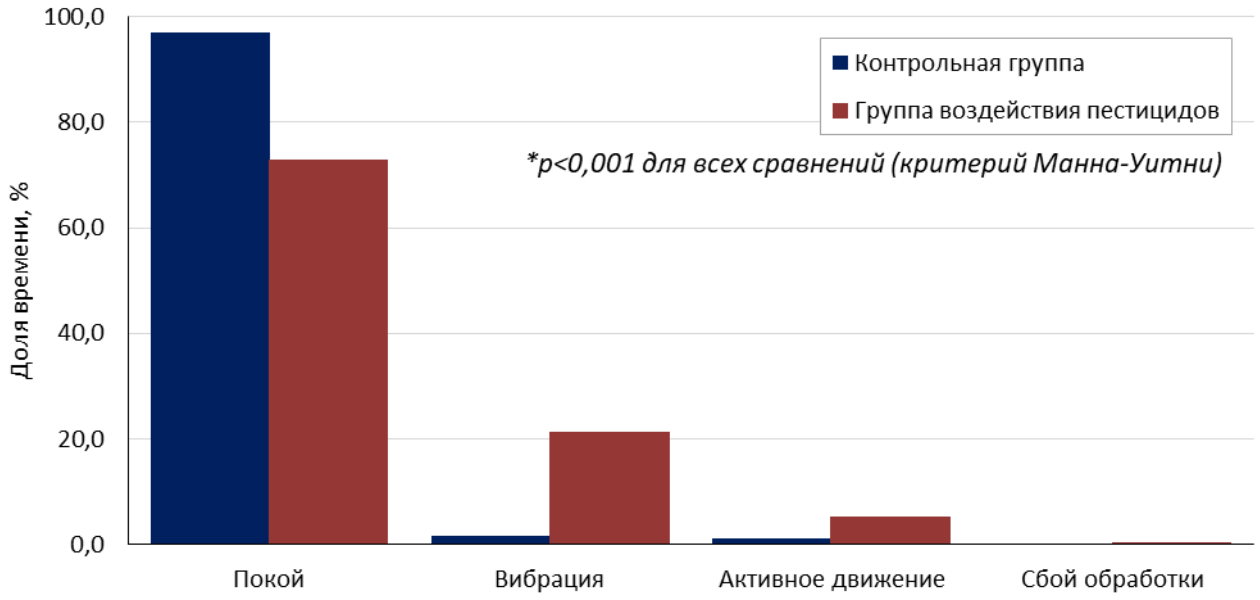
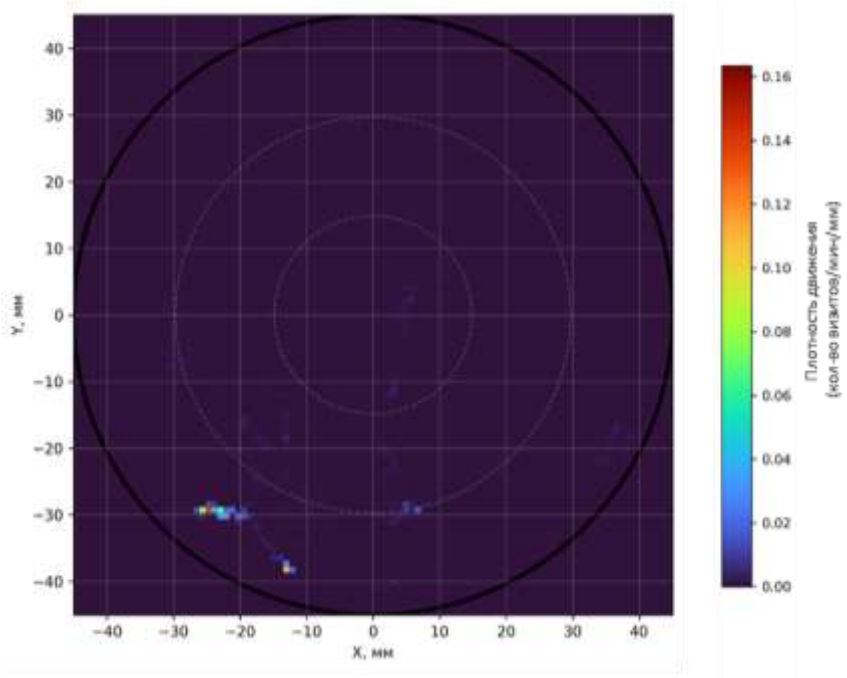


Рис. 1. Распределение времени по поведенческим состояниям медоносных пчел, % от общего времени наблюдения

Сокращение времени покоя на 24,7 % коррелирует с литературными данными о стимулирующем эффекте сублетальных концентраций неоникотиноидов на активность насекомых, проявляющемся в двигательном беспокойстве и утрате нормальных циклов активности [10]. Особую диагностическую ценность представляет анализ вариативности траекторий. Число смен направления движения в контрольной группе составило

4970 событий, тогда как в группе воздействия пестицидов данный показатель снизился до 1705. Выраженное сокращение маневренности интерпретируется как утрата поискового поведения и переход к линейным или циркулярным стереотипам перемещения, что служит надежным маркером дезориентации и нарушения когнитивных функций под воздействием нейротоксиканта [11]. Наиболее показательным индикатором стрессовой реакции оказался индекс периферийного таксиса, рассчитанный как отношение времени пребывания в периферийной зоне арены к общему времени наблюдения. В контрольной группе данный индекс составил 0,0 %, что соответствует равномерному распределению активности по всей площади чашки Петри и свидетельствует о спокойном исследовательском поведении. В то же время, в опытной группе индекс периферийного таксиса достиг экстремального значения 99,8 %, указывая на практически полное смещение локомоторной активности к стенкам экспериментальной камеры. Такой паттерн интерпретируется как выраженный тигмотаксис – защитная поведенческая реакция при потере пространственной ориентации, что согласуется с концепцией периферийного таксиса как раннего биомаркера нейротоксического поражения у насекомых-опылителей [12–13]. Визуализация результатов в виде тепловых карт плотности перемещений наглядно подтверждает количественные данные (рис. 2).

А)



а)

Б)

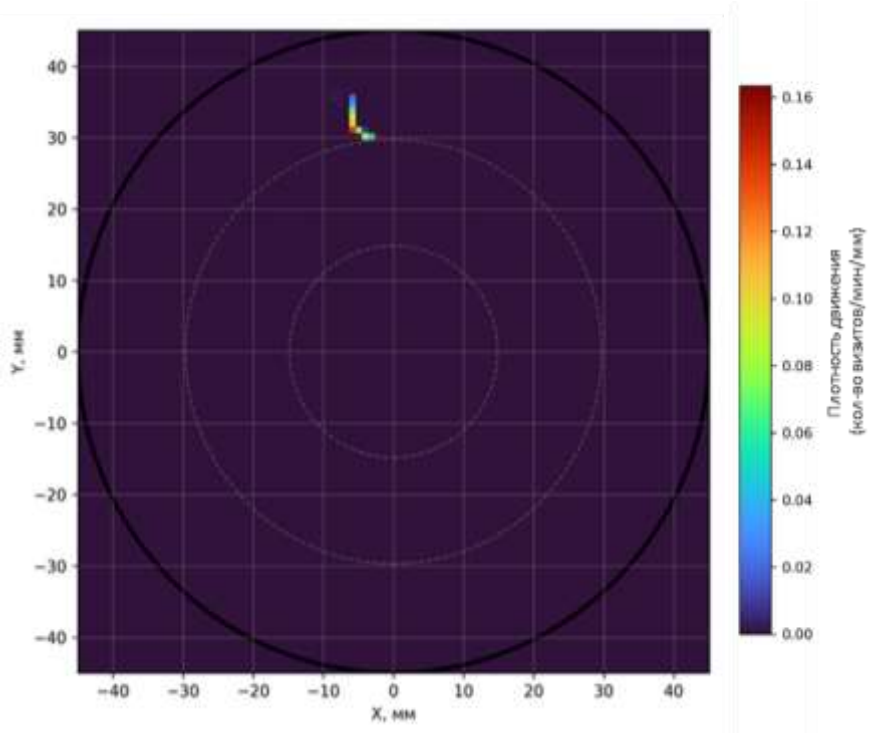


Рис. 2. Тепловые карты плотности перемещений: (А) Контрольная группа; (Б) Группа воздействия пестицидов

Если контрольная группа демонстрирует равномерное распределение активности с минимальным смещением от центра арены, то опытная группа формирует характерный красный кольцевой паттерн вдоль периферии чашки Петри. Данные подтверждают высокую чувствительность разработанного программного комплекса к сублетальным эффектам пестицидов, которые не фиксируются традиционными методами экотоксикологической оценки, ориентированными преимущественно на летальные исходы. Выявленный комплекс поведенческих изменений – рост скорости при снижении общего пути, сокращение времени покоя, утрата вариативности траекторий и экстремальный периферийный таксис – может служить системой ранних биомаркеров нейротоксического воздействия при концентрациях, не вызывающих гибели насекомых в течение стандартного периода наблюдения.

Заключение

В рамках данного исследования был разработан и экспериментально апробирован программный комплекс на базе алгоритмов компьютерного зрения для количественной оценки локомоторной активности медоносных пчел (*Apis mellifera* L.) в условиях *in vitro*. Применение адаптивной фоновой модели, фильтра Калмана и спектрального анализа позволило обеспечить высокую точность трекинга и объективную классификацию поведенческих состояний. Экспериментальное воздействие сублетальной дозы имидаклоприда вызвало статистически значимые изменения поведенческих метрик. Отмечается снижение суммарного пути на 35,7 %, рост средней скорости на 111,7 %, сокращение времени покоя на 24,7 % и уменьшение числа смен направления на 65,7 %. Наиболее чувствительным индикатором нейротоксического стресса оказался индекс периферийного таксиса, достигший 99,8 % в опытной группе против 0,0 % в контроле, что свидетельствует о выраженной дезориентации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brühl C.A., Zaller J.G. Biodiversity Decline as a Consequence of an Inappropriate Environmental Risk Assessment of Pesticides. Frontiers in Environmental Science. 2019, vol. 7. art. 177. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00177.
2. Brunet J., Fragoso F.P. What are the main reasons for the worldwide decline in pollinator populations? CABI Reviews, 2024. art. 0016. DOI: 10.1079/cabireviews.2024.0016.
3. Tanigaki K., Otsuka R., Li A. et al. Automatic recording of rare behaviors of wild animals using video bio-loggers with on-board light-weight outlier detector. PNAS Nexus, 2024. vol. 3, no. 1. art. pgad447. DOI: 10.1093/pnasnexus/pgad447.
4. Rozenbaum E., Shrot T., Daltrophe H. et al. Machine learning-based bee recognition and tracking for advancing insect behavior research. Artificial Intelligence Review, 2024. vol. 57. art. 245. https://doi.org/10.1007/s10462-024-10879-z.
5. Paleolog J., Wilde J., Gancarz M. et al. Imidacloprid Pesticide Causes Unexpectedly Severe Bioelement Deficiencies and Imbalance in Honey Bees Even at Sublethal Doses. Animals, 2023, vol. 13, no. 4. art. 615. DOI: 10.3390/ani13040615.
6. Методические рекомендации по оценке действия и потенциальной опасности пестицидов для медоносных пчел. М., 2001.
7. Larson N.R., Anderson T.D. Video Tracking Protocol to Screen Deterrent Chemistries for Honey Bees. Journal of Visualized Experiments, 2017, no. 124. art. 55603. DOI: 10.3791/55603.
8. Li J., Xu X., Jiang Z. et al. Adaptive Kalman Filter for Real-Time Visual Object Tracking Based on Autocovariance Least Square Estimation. Applied Sciences, 2024, vol. 14. art. 1045. https://doi.org/10.3390/app14031045.
9. Legradi J.B., Di Paolo C., Kraak M.H.S. et al. An ecotoxicological view on neurotoxicity assessment. Environmental Sciences Europe, 2018, vol. 30, no. 1. art. 46. DOI: 10.1186/s12302-018-0173-x.
10. Spence S.K., Alharbi S.A.M., Ejomah A. et al. Sublethal Effects of Neonicotinoids: How Physiological and Behavioral Disruptions in Non-Target Insects Threaten Biodiversity and Ecosystem Services. Insects, 2025, vol. 17, no. 1. art. 26. DOI: 10.3390/insects17010026.
11. Tilson H.A. Behavioral indices of neurotoxicity: What can be measured? Neurotoxicology and Teratology, 1987, vol. 9, no. 6, pp. 427–443. https://doi.org/10.1016/0892-0362(87)90055-9.

12. Rigosi E., Tison L., Haase A. Editorial: Effects of pesticides on the brain of pollinating insects. Frontiers in Insect Science, 2022, vol. 2. art. 1113610. DOI: 10.3389/finsc.2022.1113610.

Поступила в редакцию: 13.05.2026

Сведения об авторах

Третьякова Анна Борисовна
аспирант, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань. ул. Кремлевская, 18. Россия.
E-mail: annatretyackowa@yandex.ru

Гордон Алсу Раисовна
аспирант, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань. ул. Кремлевская, 18. Россия.
E-mail: alsu.lancer.x@yandex.ru

Мукминов Малик Нилович
д.б.н., профессор каф. прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань. ул. Кремлевская, 18. Россия.
E-mail: malik-bee@mail.ru

A.B. Tretiakova, A.R. Gordon, M.N. Mukminov

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF INSECT MOTOR ACTIVITY IN ECOTOXICOLOGICAL STUDIES

Annotation. Under conditions of intensification of the agricultural sector, pesticide load is becoming a key factor in the antagonism between the technosphere and the biosphere, leading to the degradation of pollinator insect populations. The aim of the study was to develop and test a software package based on computer vision algorithms for the quantitative assessment of changes in the locomotor activity of honey bees (*Apis mellifera* L.) under the influence of pesticides. It was established that exposure to the pesticide imidacloprid at a sublethal concentration of 0.001 μg per subject causes statistically significant changes in behavioral metrics. The most sensitive indicator of stress proved to be the peripheral taxis index, which reached 99.8% in the experimental group versus 0.0% in the control. The developed software package provides an objective quantitative assessment of sublethal effects of pesticides that are not recorded by traditional methods.
Keywords: honey bee, pesticides, imidacloprid, locomotor activity, computer vision, object tracking.

For citation: Tretiakova A.B., Gordon A.R., Mukminov M.N. [Development of a Software Complex for Quantitative Assessment of Insect Motor Activity in Ecotoxicological Research]. *Upravlenie tekhnosferoi*, 2026, vol. 9, issue 3. pp. 692 – 705. DOI: 10.35634/UDSU.2026.31.73.008.

REFERENCES

1. Brühl C.A., Zaller J.G. Biodiversity Decline as a Consequence of an Inappropriate Environmental Risk Assessment of Pesticides. Frontiers in Environmental Science, 2019, vol. 7. art. 177. doi: 10.3389/fenvs.2019.00177.
2. Brunet J., Fragoso F.P. What are the main reasons for the worldwide decline in pollinator populations? CABI Reviews, 2024. art. 0016. doi: 10.1079/cabireviews.2024.0016.
3. Tanigaki K., Otsuka R., Li A. et al. Automatic recording of rare behaviors of wild animals using video bio-loggers with on-board light-weight outlier detector. PNAS Nexus, 2024, vol. 3, no. 1, art. pgad447. doi: 10.1093/pnasnexus/pgad447.
4. Rozenbaum E., Shrot T., Daltrophe H. et al. Machine learning-based bee recognition and tracking for advancing insect behavior research. Artificial Intelligence Review, 2024, vol. 57. art. 245. https://doi.org/10.1007/s10462-024-10879-z.

5. Paleolog J., Wilde J., Gancarz M. et al. Imidacloprid Pesticide Causes Unexpectedly Severe Bioelement Deficiencies and Imbalance in Honey Bees Even at Sublethal Doses. Animals, 2023, vol. 13, no. 4. art. 615. DOI: 10.3390/ani13040615.
6. *Metodicheskie rekomendacii po ocenke dejstviya i potencial'noj opasnosti pesticidov dlya medonosnyh pchel* [Guidelines for assessing the effects and potential hazards of pesticides for honey bees]. Moscow, 2001. (In Russ.).
7. Larson N.R., Anderson T.D. Video Tracking Protocol to Screen Deterrent Chemistries for Honey Bees. Journal of Visualized Experiments, 2017. no. 124. art. 55603. doi: 10.3791/55603.
8. Li J., Xu X., Jiang Z. et. al. Adaptive Kalman Filter for Real-Time Visual Object Tracking Based on Autocovariance Least Square Estimation. Applied Sciences, 2024, vol. 14. art. 1045. https://doi.org/10.3390/app14031045.
9. Legradi J.B., Di Paolo C., Kraak M.H.S. et al. An ecotoxicological view on neurotoxicity assessment. Environmental Sciences Europe, 2018, vol. 30, no. 1. art. 46. DOI: 10.1186/s12302-018-0173-x.
10. Spence S.K., Alharbi S.A.M., Ejomah A. et al. Sublethal Effects of Neonicotinoids: How Physiological and Behavioral Disruptions in Non-Target Insects Threaten Biodiversity and Ecosystem Services. Insects, 2025, vol. 17, no. 1. art. 26. DOI: 10.3390/insects17010026.
11. Tilson H.A. Behavioral indices of neurotoxicity: What can be measured? Neurotoxicology and Teratology, 1987, vol. 9, no. 6, pp. 427–443. https://doi.org/10.1016/0892-0362(87)90055-9.
12. Rigosi E., Tison L., Haase A. Editorial: Effects of pesticides on the brain of pollinating insects. Frontiers in Insect Science, 2022, vol. 2. art. 1113610. doi: 10.3389/finsc.2022.1113610.

Received: 13.05.2026

About the Authors

Tretiakova Anna Borisovna
postgraduate student, Kazan Federal University, Kazan, Russia.
Email: annatretyackowa@yandex.ru

Gordon Alsu Raisovna
postgraduate student, Kazan Federal University, Kazan, Russia.
E-mail: alsu.lancer.x@yandex.ru

Mukminov Malik Nilovich
Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Applied Ecology, Kazan Federal University, Kazan, Russia.
E-mail: malik-bee@mail.ru