ISSN 2686-9667. Вестник российских университетов. Математика

Том 29, № 148 2024

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
© Бурлаков Е.О., Ярема В.А., 2024
https://doi.org/10.20310/2686-9667-2024-29-148-381-390
УДК 51-76, 519.62

О задачах импульсного управления, возникающих при разработке автоматизированных систем контроля численности вредителей в тепличных комплексах

Евгений Олегович БУРЛАКОВ[1,2,3], **Виталий Алексеевич ЯРЕМА**[3]

[1] ФГБУН «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН»
117997, Российская Федерация, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65

[2] ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина»
392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33

[3] ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет»
625003, Российская Федерация, г. Тюмень, ул. Володарского, 6

Аннотация. В работе предлагается математическая модель на основе непрерывной динамической системы, формализующая взаимодействие популяций насекомого-вредителя тепличной агрокультуры и энтомофага. В рамках модели энтомофаг, согласно концепции комплексной борьбы с вредителями, выступает агентом экологического контроля популяции насекомого-вредителя. Проводится идентификация параметров модели на основе экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях для тепличной системы «огурец обыкновенный — паутинный клещ — клещ-акарифаг». Для предложенной модели формулируется задача импульсного управления, отвечающая реализации контроля популяции вредителя при помощи энтомофага, исследуются вопросы существования решений и их непрерывной зависимости от управления. На основе исследованной управляемой системы обсуждаются вопросы построения экономически эффективных управляющих стратегий, позволяющих реализовывать востребованное при проектировании «умных» теплиц математическое обеспечение программно-аппаратных средств автоматизированных систем контроля численности вредителей.

Ключевые слова: математическое моделирование экологических систем, идентификация параметров математических моделей, импульсное управление, корректность

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-11-20131, https://rscf.ru/project/20-11-20131/).

Для цитирования: *Бурлаков Е.О., Ярема В.А.* О задачах импульсного управления, возникающих при разработке автоматизированных систем контроля численности вредителей в тепличных комплексах // Вестник российских университетов. Математика. 2024. Т. 29. № 148. С. 381–390. https://doi.org/10.20310/2686-9667-2024-29-148-381-390

SCIENTIFIC ARTICLE
© E. O. Burlakov, V. A. Yarema, 2024
https://doi.org/10.20310/2686-9667-2024-29-148-381-390

On impulse control problems arising in automatization of pests control in greenhouses

Evgenii O. BURLAKOV[1,2,3], **Vitaly A. YAREMA**[3]

[1] V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences
65 Profsoyuznaya St., Moscow 117997, Russian Federation

[2] Derzhavin Tambov State University
33 Internatsionalnaya St., Tambov 392000, Russian Federation

[3] Tyumen State University
6 Volodarskogo St., Tyumen 625003, Russian Federation

Abstract. The paper proposes a mathematical model based on a continuous dynamic system that formalizes the interaction of populations of a greenhouse agricultural insect pest and an entomophage acting as an agent of environmental control of the pest population in the framework of the concept of integrated pest management paradigm. The model parameters are identified based on experimental data obtained in laboratory conditions for the greenhouse system "cucumber — spider mite — acariphage mite". For the proposed system, an impulse control problem that corresponds to the implementation of the pest population control using an entomophage is formulated, and the issues of the existence of solutions and their continuous dependence on control are investigated. Based on the studied control system, the issues of constructing cost-effective control strategies that allow implementing the mathematical software for automated pest control systems in greenhouses are discussed.

Keywords: mathematical models in ecology, parameters identification, impulse control problems, well-posedness

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation (project no. 20-11-20131, https://rscf.ru/project/20-11-20131/).

Mathematics Subject Classification: 37N25, 34H05.

For citation: Burlakov E.O., Yarema V.A. On impulse control problems arising in automatization of pests control in greenhouses. *Vestnik rossiyskikh universitetov. Matematika = Russian Universities Reports. Mathematics*, **29**:148 (2024), 381–390.
https://doi.org/10.20310/2686-9667-2024-29-148-381-390 (In Russian, Abstr. in Engl.)

Введение

Современные инновационные решения в сельском хозяйстве направлены на то, чтобы потребители получали качественную агропродукцию, выращенную с минимальным применением химических средств. Одним из подходов к решению этой задачи является использование концепции комплексной борьбы с вредителями (Integrated Pest Management). Данная концепция подразумевает защиту агрокультур, основанную на применении комплекса мероприятий, учитывающих циклы совместного развития представленных в теплице растений, насекомых и микроорганизмов, а также их взаимодействия с питательными веществами [1, 2]. Современные подходы, направленные на снижение зависимости агрокультур от пестицидов, требуют от тепличных экосистем способности самостоятельно восстанавливаться [3]. Для создания подобных устойчивых экосистем в институте X-BIO Тюменского государственного университета ведется разработка программно-аппаратного комплекса для выработки и реализации мер профилактики и борьбы с наиболее распространенными вредителями сельскохозяйственно значимых растений, выращиваемых в закрытом грунте. Одним из модулей данного комплекса должен стать программный комплекс автоматизации экологического контроля вредителей тепличных агрокультур, использующий биопрепараты на основе энтомофагов. В основу математического обеспечения программного комплекса будут положены дифференциальные системы типа «хищник-жертва», содержащие управляющие параметры. В настоящей работе рассматривается подобная дифференциальная модель, содержащая импульсное управление, формализующее серию управляющих внесений биопрепарата-энтомофага в тепличную систему.

В первом разделе данной работы решается задача восстановления параметров не содержащей управления модели «хищник-жертва» на основе экспериментальных данных, полученных для тепличной системы «огурец обыкновенный — паутинный клещ — клещ-акарифаг». Второй раздел работы посвящен исследованию корректности задачи импульсного управления для изученной в первом разделе системы, а также вопросу построения экономически эффективных управляющих стратегий на основе рассматриваемой модели.

1. Математическая модель

Рассмотрим систему

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x(t) &= a\Big(1-\frac{x(t)}{K}\Big)x(t) - f(x(t))y(t), \\ \frac{d}{dt}y(t) &= cf(x(t),y(t))y(t) - my(t), \end{aligned} \tag{1.1}$$

где $t \in [0,T]$ $(T>0)$, $x(t)$ и $y(t)$ — значения плотности популяции вредителя и энтомофага, соответственно (в таблице 1 приведена интерпретация параметров модели). Функция f — трофическая функция Холлинга второго типа [4], имеющая вид $f(x) = \dfrac{bx}{d+x}$.

Восстановим значения параметров модели (1.1), опираясь на данные полевых экспериментов, проведенных сотрудниками Института исследования растений в Департаменте сельского хозяйства округа Виктория, Австралия (экспериментальные данные, а также подробное описание постановки экспериментов доступны в работе [5]), где роли тепличной агрокультуры, вредителя и энтомофага играли обыкновенный огурец *Cucumis sativus*, паутинный клещ *Tetranychus urticae* и клещ-акарифаг *Tetranychus persimilis*, соответственно.

Таблица 1

Описание параметров модели (1.1)

Параметр	Описание
$a > 0$	Скорость прироста популяции вредителя
$K > 0$	Плотность популяции вредителя, приводящая к полному поражению им агрокультуры
$b > 0$	Максимальная скорость истребления вредителя энтомофагом
$0 < c < 1$	Эффективность конверсии питания энтомофага вредителем в прирост популяции энтомофага
$0 < b/d < 1$	Эффективность поиска вредителем энтомофага
$m > 0$	Скорость естественной гибели энтомофага

Запишем систему (1.1) в сокращенном виде

$$\dot{\overline{X}}(t) = G(\overline{X}(t), \overline{P}), \tag{1.2}$$

где $\overline{X}(t) = (x(t), y(t))^T = (x(t, \overline{P}), y(t, \overline{P}))^T$, $G : \mathbb{R}^2 \times M \to \mathbb{R}^2$ — функция, соответствующая правой части (1.1), $M \subset \mathbb{R}^5$ — множество допустимых значений параметров. Для решения задачи идентификации параметров системы (1.1) используем метод максимального правдоподобия. Введем функционал $\mathcal{F}$, определяющий отклонение решения модели от экспериментальных данных:

$$\mathcal{F}(\overline{X}) = \sum_{t_i \in \mathbb{I}} \left| \overline{X}(t_i, \overline{P}) - \overline{X}_i \right|.$$

Здесь t_i — i-ая неделя эксперимента, $\widetilde{X}_i$ — вектор экспериментальных данных по численностям популяций на неделю t_i, $\overline{P}$ — вектор параметров модели (см. таблицу 1), $\overline{X}(t_i, \overline{P})$ — значение $\overline{X}$ в момент времени t_i при значениях параметров $\overline{P}$, полученное в результате решения системы (1.1), символом $|\cdot|$ обозначено евклидово расстояние в $\mathbb{R}^2$. Для идентификации параметров модели необходимо минимизировать функционал $\mathcal{F}$ относительно переменной $\overline{P}$, предварительно оценив области определения ее компонент (границы множества M).

Исходя из биологического смысла параметра K, примем его значение $K = 1$ (100%). Отметим, что действительная плотность популяции вредителя может достигать значений, превышающих 1, однако в настоящем исследовании нас интересует режим работы системы (1.1), при котором $x(t) < K$ при всех $t \in [0, T]$, что соответствует сохранению тепличной культуры на рассматриваемом интервале времени (вышеупомянутые экспериментальные данные также согласуются с условием $x(t) < K$).

Оценим скорость a прироста популяции вредителя исходя из данных, собранных на экспериментальных площадках до момента введения в эксперимент клеща-акарифага (см. таблицу 2). Проинтегрируем первое уравнение системы уравнение (1.1) в отсутствие энтомофага (т. е. при $y \equiv 0$). Получим

$$a = \ln\left(\frac{x(0)(K - x(1))}{x(1)(K - x(0))}\right).$$

Будем использовать в наших вычислениях среднее значение $a = 0.6159$ скорости прироста популяции вредителя.

Таблица 2

Экспериментальные данные по приросту численности паутинного клеща в отсутствие клеща-акарифага

Номер эксперимента	$x(0)$	$x(1)$	a
I	0.65	0.76	0.5336
II	0.36	0.56	0.8165
III	0.94	0.96	0.4265
IV	0.64	0.70	0.6897

Для биологически релевантной оценки границ скорости b максимального потребления добычи энтомофагом, будем опираться на данные по потреблению клещом *P. persimilis* яиц (см. [6–9]), личинок (см. [8,10]) и взрослых особей (см. [8]) паутинного клеща, а также на сведения о типичной пропорции представленности вышеуказанных стадий развития паутинного клеща в популяции (см. [8]). Получим оценку $b \in [3.49, 4.92]$.

Согласно [6], эффективность конверсии питания *P. persimilis* в прирост популяции имеет приблизительное значение $c \approx 0.7$. В наших расчетах выберем диапазон $c \in [0.6, 0.8]$.

Оценку значений параметра d в терминах биологически интерпретируемого параметра b/d, характеризующего в рассматриваемой тепличной экосистеме эффективность поиска добычи хищником, произвести довольно затруднительно ввиду существенной зависимости этого параметра от ряда условий эксперимента (например, от температуры в тепличной системе), не представленных в формализации (1.1). В связи с этим, при восстановлении параметра d будем использовать стандартную для *P. persimilis* оценку $b/d \in [0.2, 0.65]$ (см. [5]), откуда получим $d \in (1.53b, 5b)$.

Коэффициент смертности клеща-акарифага m полагается нами варьирующимся от 1.4 до 2.8 на основе сведений, содержащихся в работах [11, 12].

Для решения задачи поиска компонент вектора $\overline{P}$, соответствующих минимуму функционала $\mathcal{F}$, используем метод Нелдера–Мида [13]. Интегральные кривые системы (1.1) при найденном минимизирующем функционал значении $\overline{P}_0$ (см. таблицу 3) изображены на рисунке 1. Система (1.1) обладает единственным (неустойчивым) положением равновесия E, имеющим координаты $(32.67, 4.99)$ на фазовой плоскости и порождающим предельный цикл.

Таблица 3

Восстановленные по экспериментальным данным значения параметров системы (1.1)

a	b	c	d	m
0.6159	4.31	0.68	20.52	1.8

2. Задача импульсного управления

Продемонстрируем применимость модели (1.1) для автоматизации экологического контроля вредителей тепличных агрокультур. Для всякого начального условия $(x(0), y(0)) = (x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$, уравнение (1.2) можно представить в виде

$$\overline{X}(t) = \overline{X}_0 + \int_a^t G_0(\overline{X}(s))ds, \ t \in [0, T], \tag{2.1}$$

где $\overline{X}(0) = (x_0, y_0)^T$, $G_0(\overline{X}) = G(\overline{X}, \overline{P}_0)$.

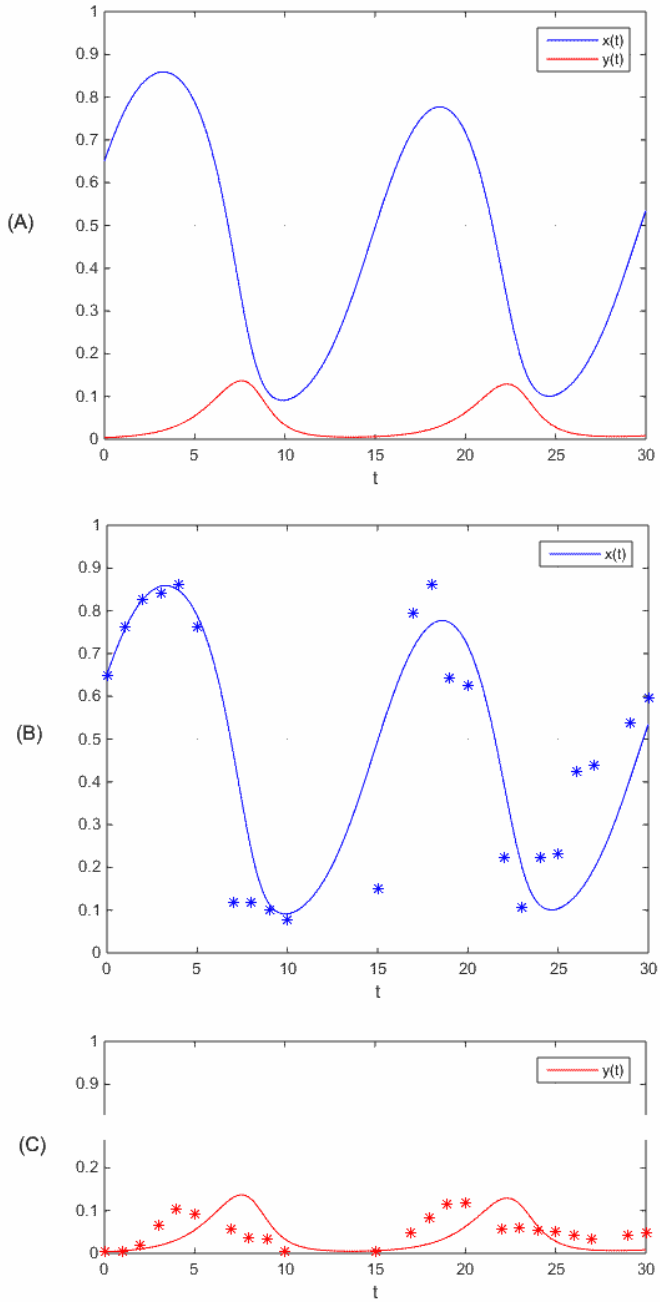

Рис. 1. Динамика компонент системы (1.1) при идентифицированных значениях параметров (A). Сравнение восстановленной динамики компонент $x(t)$ (B) и $y(t)$ (C) системы (1.1) с соответствующими экспериментальными данными (отмечены символами " $*$ ")

Для системы (2.1) возможность контроля численности вредителей, основанная на внесении в тепличную систему биопрепаратов на основе энтомофагов, может быть формализована следующим образом:

$$\overline{X}(t) = \overline{X}_0 + \int_a^t G_0(\overline{X}(s))ds + \overline{U}(t), \tag{2.2}$$

где $\overline{U}$ — импульсное управление вида $(0, \sum_{\forall k} \chi_{[t_k,T]}(t)y_k)^T$, χ_A — характеристическая функция множества $A \subset [0,T]$, $\{t_k\} \subset [0,T]$ и $y_k > 0$ — моменты времени и величины импульсных воздействий, соответственно, причем $0 \leqslant k \leqslant \widehat{K} \in \mathbb{N}$. Таким образом,

различные управления $\overline{U}$ могут состоять из разного количества импульсных воздействий, общее количество которых для каждого управления не превосходит $\widehat{K}$.

Определим множество $\mathcal{Y}$ функций вида $\overline{Y} = \overline{X} + \overline{U}$, где $\overline{X}$ — функция из класса непрерывных двумерных вектор-функций. Множество $\mathcal{Y}$ образует полное метрическое пространство относительно метрики

$$\rho_{\mathcal{Y}}(\overline{Y}_1, \overline{Y}_2) = \|\overline{X}_1 - \overline{X}_2\|_C + \int_0^T \Big| \sum_{k:t_k^1 \in [a,b]} \chi_{[t_k^1,b]}(t) y_k^1 - \sum_{k:t_k^2 \in [a,b]} \chi_{[t_k^2,b]}(t) y_k^2 \Big| dt, \qquad (2.3)$$

где символом $\|\cdot\|_C$ обозначена норма в соответствующем пространстве непрерывных функций (см. [14]). Подобная метрика была использована работе [15] при исследовании отклика нейронных систем на зрительные стимулы.

Решением задачи управления (2.2) будем считать функцию $\overline{Y} \in \mathcal{Y}$, удовлетворяющую уравнению (2.2).

Утверждение 2.1. *При любом управлении $\overline{U}$ задача (2.2) имеет единственное решение. Кроме того, если некоторая последовательность управлений $\overline{U}^i$ сходится к управлению $\overline{U}^0$ в смысле сходимости $\int_0^T \Big| \sum_{k:t_k^i \in [0,T]} \chi_{[t_k^i,T]}(t) V_k^i dt - \sum_{k:t_k^0 \in [0,T]} \chi_{[t_k^0,T]}(t) V_k^0 \Big| dt \to 0$ при $i \to \infty$, то последовательность решений $\overline{Y}^i$ системы (2.2), соответствующих управлениям $\overline{U}^i$, сходится к решению $\overline{Y}^0$, соответствующему управлению $\overline{U}^0$, в метрике (2.3).*

Справедливость утверждения 2.1 следует из основного результата работы [14].

Наибольший практический интерес представляет использование результатов данного исследования для решения задач экономической оптимизации экологического контроля вредителей, значимость которых неоднократно подчеркивалась в профильной литературе по направлению комплексной борьбы с вредителями (см., например, работы [16, 17], а также обзор [18] и библиографию). Утверждение 2.1 обосновывает корректность задачи импульсного управления для рассматриваемой системы «хищник-жертва», открывая возможности отыскания наиболее эффективных с экономической точки зрения управляющих стратегий, в том числе, с использованием численных методов. Подобные задачи оптимизации могут быть формализованы, например, следующим образом:

$$\begin{aligned} &\overline{X}(t) = \overline{X}_0 + \int_a^t G(\overline{X}(s))ds + \sum_{\forall k} \chi_{[t_k,T]}(t) y_k, \ t \in [0,T], \\ &\|(\overline{X}, (1,0)^T)\|_C < \Theta, \\ &\textstyle\sum_{\forall k} y_k \to \min, \end{aligned}$$

где $\Theta > 0$ — критический уровень поражения тепличной агрокультуры вредителем, символом $(\cdot,\cdot)$ обозначено скалярное произведение векторов.

Настоящая работа не преследует цели отыскания оптимальных управляющих стратегий, однако мы приведем эвристическую схему построения стратегии импульсного управления системой «хищник-жертва», исследованной в предыдущем параграфе. Пусть $\Theta = 0.5$, $\overline{X}_0 = (0.01, 0)$. Фазовый портрет данной системы изображен на рисунке 2 (А). С учетом имеющегося знания о координатах положения равновесия $E = (32.67, 4.99)$ рассматриваемой системы, применим операцию внесения энтомофагов в тепличную систему в количестве $y_1 = 4.99$ в такой момент времени t_1, что $x(t_1) \approx 32.67$. В силу того, что численность

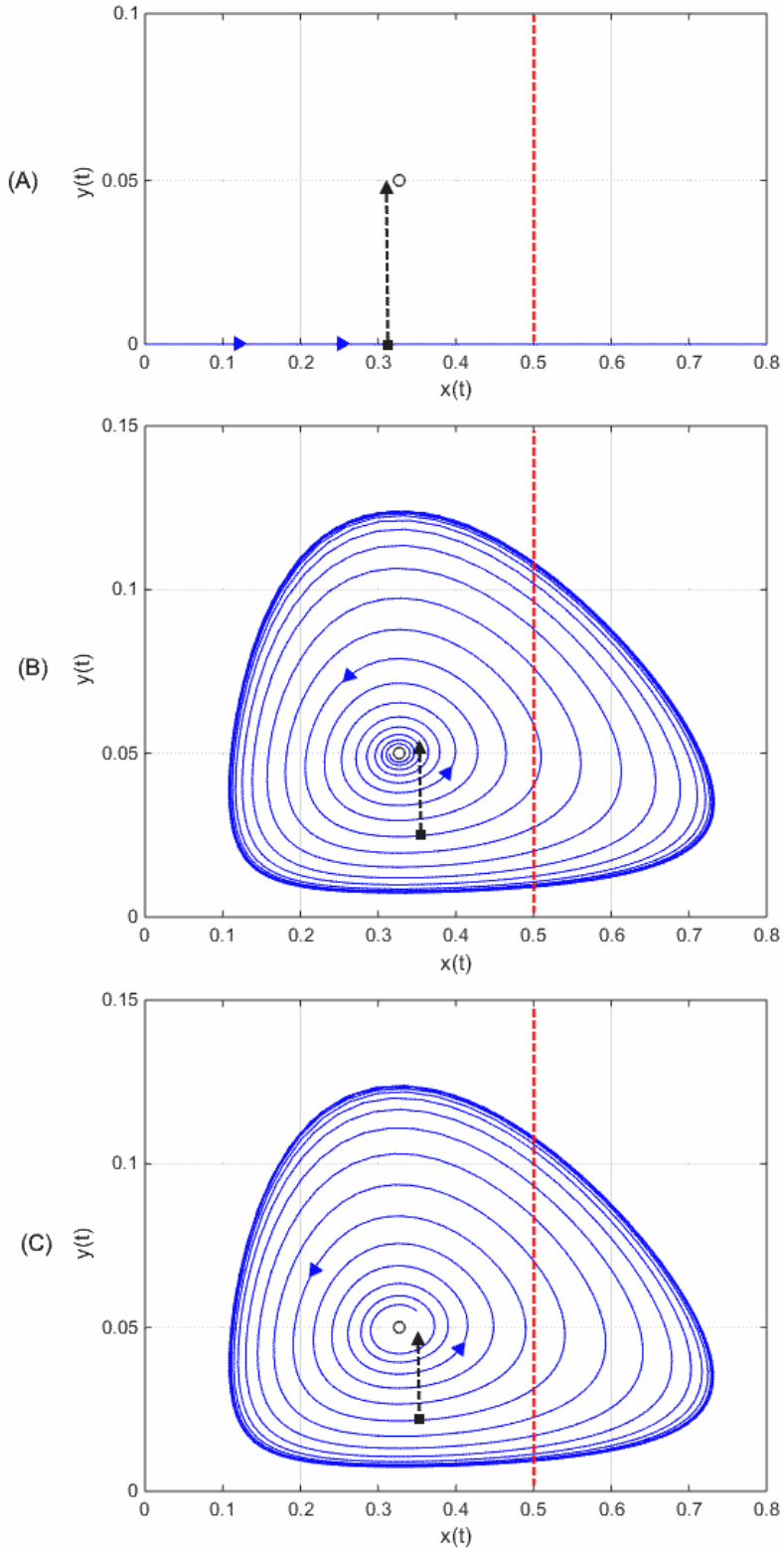

Рис. 2. Шаги построения допустимого управления в рамках системы (2.2). Синие стрелки показывают направление движения по кривым фазового состояния. Черной окружностью изображено положение равновесия E системы (1.1), красной пунктирной линией изображено пороговое значение Θ поражения агрокультуры, черные пунктирные векторы отображают импульсные воздействия на экосистему теплицы. Рисунки (A), (B) и (C) отвечают первому, второму и третьему импульсному воздействию, соответственно

популяций в тепличной экосистеме может быть оценена при помощи системы (1.1) лишь приближенно, будем полагать, что момент реализации импульсного воздействия определяется квадратом на конце черного пунктирного вектора (при этом длина вектора равна величине $y_1 = 4.99$, см. рисунок 2 (A)). Фазовое состояние системы, таким образом (с учетом погрешностей), переместилось в окрестность положения равновесия E (положение равновесия изображено черной окружностью, см. рисунок 2 (B)). Следующим моментом применения управления предлагается наибольшее значение t_2, $x(t_2) \approx 32.67$, предшествующее возникновению общих точек кривой фазового состояния и линии порогового значения поражения агрокультуры (отображена красным пунктиром). С учетом неизбежных погрешностей, будем полагать, что момент импульсного воздействия определяется квадратом на конце черного пунктирного вектора (при этом длина вектора равна величине $y_2 = 4.99 - y(t_2)$, см. рисунок 2 (B)). Фазовое состояние системы переместилось в окрестность положения равновесия E (изображено черной окружностью, см. рисунок 2 (C)). Следующим моментом применения управления предлагается наибольшее значение t_3, $x(t_3) \approx 32.67$ (см. рисунок 2 (C)), предшествующее возникновению общих точек кривой фазового состояния и линии порогового значения поражения агрокультуры. Модуль y_3 применяемого импульсного воздействия при этом равен $4.99 - y(t_2)$. И так далее ... Итоговая стоимость поддержания популяции вредителя в допороговом состоянии будет пропорциональна сумме длин черных пунктирных векторов. Естественным образом, ключевую роль в снижении стоимости реализации подобных управляющих стратегий играет высокая точность оценки численности популяций вредителя и энтомофага, позволяющая, путем внесения необходимых количеств особей энтомофага в тепличный комплекс, переводить состояние системы как можно ближе к ее положению равновесия.

References

[1] S. K. Dara, "The new integrated pest management paradigm for the modern age", *Journal of Integrated Pest Management*, **10**:1 (2019), 1–9.

[2] S. E. Naranjo, P. C. Ellsworth, G. B. Frisvold, "Economic value of biological control in integrated pest management of managed plant systems", *Annual Review of Entomology*, **60** (2015), 621–645.

[3] S. Mouden, K. F. Sarmiento, P. G. L. Klinkhamer, K. A. Leiss, "Integrated pest management in western flower thrips: past, present and future", *Pest Management Science*, **73**:5 (2017), 813–822.

[4] C. S. Holling, "Some characteristics of simple types of predation and parasitism", *Canadian Entomologist*, **91**:7 (1959), 385–398.

[5] I. Kozlova, *A Numerical Study of Modelling in Mathematical Biology*, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, 2002.

[6] M. W. Sabelis, *Agricultural Research Report 910*, Pudoc, Wageningen, The Netherlands, 1981.

[7] K. Fujita, T. Inoue, A. Takafuji, "Systems analysis of an acarine predator-prey system. I", *Researches on Population Ecology*, **21** (1979), 105–119.

[8] D. Elliott, *Biological Technical Manual*, Applied Bio-nomics Ltd., Melbourne, Australia, 1993.

[9] A. Takafuji, D. A. Chant, "Comparative studies of two species of predacious phytoseiid mites (Acarina: Phytoseiidae), with special reference to their responses to the density of their prey.", *Researches on Population Ecology*, **17** (1976), 255–310.

[10] M. H. Malais, W. J. Ravensberg, *Knowing and Recognizing: The Biology of Glasshouse Pests and Their Natural Enemies*, Reed Business Information, Amsterdam, 2003.

[11] G. Nachman, "Systems analysis of acarine predator-prey interactions. I. A stochastic simulation model of spatial processes", *Journal of Animal Ecology*, **56**:1 (1987), 247–265.

[12] J. S. Bancroft, D. C. Margolie, "An individual-based model of an acarine tritrophic system: lima bean, Phaseolus lunatus L., twospotted spider mite, Tetranychus urticae (Acari: Tetranychidae), and Phytoseiulus persimilis (Acari: Phytoseiidae)", *Ecological Modelling*, **123**:2-3 (1999), 161–181.

[13] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, P. E. Wright, "Convergence properties of the Nelder–Mead simplex method in low dimensions", *SIAM Journal on Optimization*, **9**:1 (1998), 112–147.

[14] E. O. Burlakov, E. S. Zhukovskii, "On well-posedness of generalized neural field equations with impulsive control", *Russian Mathematics (Iz VUZ)*, **60** (2016), 66–69.

[15] Е. О. Бурлаков, В. М. Верхлютов, И. Н. Мальков, "О корректности математической модели вызванной активности первичной зрительной коры", *Вестник российских университетов. Математика*, **29**:145 (2024), 43–50. [E. O. Burlakov, V. M. Verkhlyutov, I. N. Malkov, "On well-posedness of a mathematical model of evoked activity in the primary visual cortex", *Vestnik rossiyskikh universitetov. Matematika = Russian Universities Reports. Mathematics*, **29**:145 (2024), 43–50 (In Russian)].

[16] P. Tiftikci, S. Kök, I. Kasap, "Biological control of twospotted spider mites [Tetranychus urticae Koch (Acari: Tetranychidae)] using Phytoseiulus persimilis Athias-Henriot (Acari: Phytoseidae) at different ratios of release on field-grown tomatos", *Biological control*, **151** (2020), Article number: 104404.

[17] G. P. Opit, J. R. Nechols, D. C. Margolies, "Biological control of twospotted spider mites, Tetranychus urticae Koch (Acari: Tetranychidae), using Phytoseiulus persimilis Athias-Henriot (Acari: Phytoseidae) on ivy geranium: assessment of predator release ratios", *Biological Control*, **29**:3 (2004), 445–452.

[18] M. Jakubowska, R. Dobosz, D. Zawada, J. Kowalska, "A Review of Crop protection methods against the twospotted spider Mite-Tetranychus urticae Koch (Acari: Tetranychidae) – with special reference to alternative methods", *Agriculture*, **12** (2022), Article number: 898.

Информация об авторах

Бурлаков Евгений Олегович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва; научный сотрудник НОЦ «Фундаментальные математические исследования», Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина, г. Тамбов; научный сотрудник института X-BIO, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Российская Федерация. E-mail: eb_@bk.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7286-9456

Ярема Виталий Алексеевич, аспирант, институт X-BIO, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Российская Федерация. E-mail: yaremavertal@mail.ru
ORCID: http://orcid.org/0009-0001-7784-6720

Конфликт интересов отсутствует.

Для контактов:
Бурлаков Евгений Олегович
E-mail: eb_@bk.ru

Поступила в редакцию 29.08.2024 г.
Поступила после рецензирования 01.11.2024 г.
Принята к публикации 22.11.2024 г.

Information about the authors

Evgenii O. Burlakov, PhD, Researcher at the V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow; Researcher at the Scientific and Educational Center "Fundamental Mathematical Research", Derzhavin Tambov State University, Tambov; Researcher at the Insitute X-BIO, Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation. E-mail: eb_@bk.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7286-9456

Vitaly A. Yarema, Post-Graduate Student, Institute X-BIO, Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation. E-mail: yaremavertal@mail.ru
ORCID: http://orcid.org/0009-0001-7784-6720

There is no conflict of interests.

Corresponding author:
Evgenii O. Burlakov
E-mail: eb_@bk.ru

Received 29.08.2024
Revieued 01.11.2024
Accepted for press 22.11.2024