

Изследване на ефектите на човешката мобилност в малариен модел с две местообитания и употреба на репелент срещу комари

изготвил: Калоян Стоилов
ръководител: Петър Рашков

Софийски университет
"Свети Климент Охридски"



Факултет по математика и информатика

9 юли 2025 г.

Съдържание

- 1 Въведение
- 2 Модел
- 3 Свойства на модела
- 4 Задача за здравна политика
- 5 Числени симулации

Термини от епидемиологията

- Патоген е причинител на зараза (напр. вирус, бактерия, прион).
- Вектор е носител на патоген, който може да зарази други индивиди.
- S (Susceptible - Податливи) - податливи са тези, които не носят патогена и могат да бъдат заразени с него
- I (Infected - Заразени) - заразени са носители на патогена
- Заболяване има ендемичен характер, когато има (приблизително) константен ненулев брой заразени.

Малария

Симптоми са периодичен пароксизъм(продължителни спазми, потене, треска), умора, главоболие, хепатомегалия (разрастнал се черен дроб), белодробен оток, анемия (намалено количество еритроцити), мозъчек оток, смърт.

Патогенът е един 4 вида от рода *Plasmodium* маларийни плазмодии, които са едноклетъчни еукариоти, т.е. едноклетъчни с ядро.

Интензивността на симптомите зависи от вида плазмодий.

В края на XIX век Ross доказва, че вектора на маларията са комарите от род *Anopheles*. В началото на XX век моделира маларията с две диференциални уравнения, като модела му е основа за моделирането на векторнопредавани заболявания и до днес.

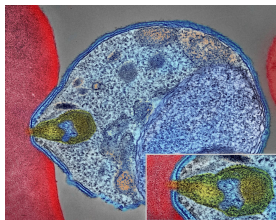
Разпространение на маларията

Хората могат да оздравеят, като организмът им се прочисти от плазмодиите. Не развиват траен имунитет, но обикновено повторни заболявания се претърпяват по-лесно.

Комарите са насекоми и нямат имунна система, така че не могат да се предпазват от паразити.

Затова в моделите на Ross динамиката се описва чрез прехода между класове:

- $S \rightarrow I \rightarrow S$ (SIS) при хората
- $S \rightarrow I$ (SI) при комарите



Фигура 1: Оцветена снимка от електронен микроскоп на плазмодий нападащ еритроцит

Допускания

- ❶ Човешката популация и популацията комари е постоянна, като са разпределени равномерно в местообитанията.
- ❷ Смъртността от заразата се пренебрегва, както при хората, така и при комарите.
- ❸ Веднъж заразени, комарите не се възстановяват.
- ❹ Само податливи се заразяват (няма свръхзаразяване).
- ❺ Хората не придобиват никакъв имунитет.
- ❻ Смъртността на комарите е независима от възрастта им и съответно продължителността им на живот е експоненциално разпределена.
- ❼ Разглежда се само предаването на патогена между хора и комари.
- ❽ Латентният период при комарите е константен.
- ❾ Мобилността на хората между местообитанията е константна.
- ❿ Репелентът има линеен ефект върху честотата на ухапванията върху предпазените с него и не увеличава тази върху непредпазените.

Означения

Променлива	Описание
t	Време [ден]
X_i	Брой заразени жители
Y_i	Брой заразени комари
u_i	Пропорция защитени с репелент жители
Параметър	Описание
β_{vh}	Вероятност на прехвърляне на патогена от комар на човек
β_{hv}	Вероятност на прехвърляне на патогена от човек на комар
a_i	Честота на ухапвания [ден ⁻¹]
M_i	Популация на женски комари
μ_i	Смъртност на комари [ден ⁻¹]
τ	Инкубационен период при комарите [ден]
N_i	Човешка популация (население)
γ_i	Скорост на оздравяване на хора [ден ⁻¹]
p_{ij}	Мобилност на хора от местообитание i в j
κ	Ефективност на репелент
\bar{u}_i	Максимална възможна предпазена част жители с репелент
\bar{l}_i	Максимална част на заразени хора

Таблица 1: Таблица с променливи и параметри

Първа форма на модела

$$\begin{aligned}\dot{X}_1 &= \beta_{vh}(N_1 - X_1)(1 - \kappa u_1) \left(\frac{p_{11}e^{-\mu_1\tau} a_1 Y_1}{p_{11}N_1 + p_{21}N_2} + \frac{p_{12}e^{-\mu_2\tau} a_2 Y_2}{p_{12}N_1 + p_{22}N_2} \right) - \gamma_1 X_1 \\ \dot{X}_2 &= \beta_{vh}(N_2 - X_2)(1 - \kappa u_2) \left(\frac{p_{21}e^{-\mu_1\tau} a_1 Y_1}{p_{11}N_1 + p_{21}N_2} + \frac{p_{22}e^{-\mu_2\tau} a_2 Y_2}{p_{12}N_1 + p_{22}N_2} \right) - \gamma_2 X_2 \\ \dot{Y}_1 &= \beta_{hv} a_1 (M_1 - Y_1) \frac{p_{11}(1 - \kappa u_1)X_1 + p_{21}(1 - \kappa u_2)X_2}{p_{11}N_1 + p_{21}N_2} - \mu_1 Y_1 \\ \dot{Y}_2 &= \beta_{hv} a_2 (M_2 - Y_2) \frac{p_{12}(1 - \kappa u_1)X_1 + p_{22}(1 - \kappa u_2)X_2}{p_{12}N_1 + p_{22}N_2} - \mu_2 Y_2 \\ u_i &\in \mathcal{U}_i = \{u_i : \mathbb{R}_+ \rightarrow [0, \bar{u}_i] | u_i \text{- измерима}\}\end{aligned}\tag{1}$$

Моделът е развитие на тези на Bichara [11] (мобилност) и Rashkov [24] (репелент).

Скалирана форма на модела

Моделът подлежи на скалиране на променливите чрез смяната $(X_1, X_2, Y_1, Y_2) \rightarrow (\frac{X_1}{N_1}, \frac{X_2}{N_2}, \frac{Y_1}{M_1}, \frac{Y_2}{M_2}) = (x_1, x_2, y_1, y_2)$ и след полагания на коефициентите има вида:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= (1 - x_1)(1 - \kappa u_1) (b_{11}y_1 + b_{12}y_2) - \gamma_1 x_1 \\ \dot{x}_2 &= (1 - x_2)(1 - \kappa u_2) (b_{21}y_1 + b_{22}y_2) - \gamma_2 x_2 \\ \dot{y}_1 &= (1 - y_1) (c_{11}(1 - \kappa u_1)x_1 + c_{12}(1 - \kappa u_2)x_2) - \mu_1 y_1 \\ \dot{y}_2 &= (1 - y_2) (c_{21}(1 - \kappa u_1)x_1 + c_{22}(1 - \kappa u_2)x_2) - \mu_2 y_2\end{aligned}\tag{2}$$

Надолу (2) ще се записва и във векторен вид по следния начин:

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{y}} \end{pmatrix} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}), \quad \mathbf{x} = (x_1, x_2)^T, \quad \mathbf{y} = (y_1, y_2)^T, \quad \mathbf{f} = (f_{x_1}, f_{x_2}, f_{y_1}, f_{y_2})^T\tag{3}$$

Или пък във вида:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{f}(\mathbf{z}, \mathbf{u}), \quad \mathbf{z} = (\mathbf{x}, \mathbf{y})^T, \quad \mathbf{z}(0) = \mathbf{z}_0 = (x_1^0, x_2^0, y_1^0, y_2^0)^T\tag{4}$$

Допълнителни означения

Задачата се разглежда в $\Omega = \{x_i \in [0, 1], y_i \in [0, 1]\} = \{z \in [0, 1]^4\}$.

Означаваме $U = [0, \bar{u}_1] \times [0, \bar{u}_2]$, $\mathcal{U} = \mathcal{U}_1 \times \mathcal{U}_2$.

Нека $\bar{l}_i \in [0, 1]$ - максималната част от населението в съответното местообитание, което може да получи адекватна здравна помощ при заразяване с малария.

Означаваме $\bar{l} = (\bar{l}_1, \bar{l}_2)^T$ $\mathcal{J} = [0, \bar{l}_1] \times [0, \bar{l}_2] \times [0, 1] \times [0, 1]$.

Твърдение

Съществува единствено решение на (2).

Доказва се с Липшицовост на \mathbf{f} по \mathbf{z} . Сметката се основава на свойства на нормата (хомогенност и неравенство на триъгълника) и е дълга, затова тук се пропуска.

Твърдение

Ω е положително инвариантно за (2).

Доказва се с теоремата на Nagumo, че $\mathbf{f}|_{\partial\Omega}$ е насочен към Ω .

$$\begin{aligned} f_{x_1}|_{\Omega \cap \{x_1=0\}} &= (1 - \kappa u_1)(b_{11}y_1 + b_{12}y_2) \geq 0, & f_{x_1}|_{\Omega \cap \{x_1=1\}} &= -\gamma_1 < 0 \\ f_{x_2}|_{\Omega \cap \{x_2=0\}} &= (1 - \kappa u_2)(b_{21}y_1 + b_{22}y_2) \geq 0, & f_{x_2}|_{\Omega \cap \{x_2=1\}} &= -\gamma_2 < 0 \\ f_{y_1}|_{\Omega \cap \{y_1=0\}} &= c_{11}(1 - \kappa u_1)x_1 + c_{12}(1 - \kappa u_2)x_2 \geq 0 & f_{y_1}|_{\Omega \cap \{y_1=1\}} &= -\mu_1 < 0 \\ f_{y_2}|_{\Omega \cap \{y_2=0\}} &= c_{21}(1 - \kappa u_1)x_1 + c_{22}(1 - \kappa u_2)x_2 \geq 0 & f_{y_2}|_{\Omega \cap \{y_2=1\}} &= -\mu_2 < 0 \end{aligned}$$

Свойства на модела

Твърдение

Системата (2) е кооперативна, т.е. Якобианът ѝ има неотрицателни компоненти извън главния диагонал.

Твърдение

Системата (2) е силно вдлъбната, т.е. за Якобианът Df е в сила $0 < z_1 < z_2 \implies Df(z_2) < Df(z_1)$.

Твърдение

Системата (2) е неразложима, т.е. ненулевите компоненти на Якобиана образуват матрица на съседство на силно свързан ориентиран граф.

Якобиан на (2)

Якобианът за системата (2) може да се представи във вида:

$$D\mathbf{f}(x_1, x_2, y_1, y_2) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_{x_1}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial x_2} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial y_1} & \frac{\partial f_{x_1}}{\partial y_2} \\ \frac{\partial f_{x_2}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{x_2}}{\partial x_2} & \frac{\partial f_{x_2}}{\partial y_1} & \frac{\partial f_{x_2}}{\partial y_2} \\ \frac{\partial f_{y_1}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial x_2} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial y_1} & \frac{\partial f_{y_1}}{\partial y_2} \\ \frac{\partial f_{y_2}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{y_2}}{\partial x_2} & \frac{\partial f_{y_2}}{\partial y_1} & \frac{\partial f_{y_2}}{\partial y_2} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial f_{x_1}}{\partial x_1} = -(1 - \kappa u_1)(b_{11}y_1 + b_{12}y_2) - \gamma_1 < 0, \quad \frac{\partial f_{x_1}}{\partial x_2} = 0$$

$$\frac{\partial f_{x_1}}{\partial y_1} = (1 - x_1)(1 - \kappa u_1)b_{11} \geq 0, \quad \frac{\partial f_{x_1}}{\partial y_2} = (1 - x_1)(1 - \kappa u_1)b_{12} \geq 0$$

\vdots

Твърдение

За система (2) при фиксирано $\mathbf{u}(t) \equiv \mathbf{u} = \text{const}$ е в сила точно едно от:

- ❶ $\mathbf{0}$ е единствена равновесна точка (глобално асимптотично устойчива).
- ❷ $\mathbf{0}$ е неустойчива равновесна точка и съществува точно една друга равновесна точка $\mathbf{E}^* = (x_1^*, x_2^*, y_1^*, y_2^*)$ (глобално асимптотично устойчива).

Твърдението се доказва с помощта на изведените свойства на (2).

Задача за здравна политика

Питаме се има ли такива управления \mathbf{u} , за които във всеки момент всички заразени да имат възможност да получат помощ от здравната система, т.е. :

$$\forall t \geq 0 (x_1(t) \leq \bar{l}_1 \wedge x_2(t) \leq \bar{l}_2) \iff \forall t \geq 0 (\mathbf{z}(t) \in \mathcal{J}) \quad (5)$$

Тъй като първоначалният брой заразени хора и комари влияят на развитието на системата ще търсим **ядрото на слаба инвариантност на Белман**:

$$V(\bar{\mathbf{l}}, \bar{\mathbf{u}}) = \{\mathbf{z}_0 \text{ начално условие} | \exists \mathbf{u}((5) \text{ е изпълнено})\} \quad (6)$$

$\mathbf{0}$ е равновесна за (2) - за нея винаги е изпълнено (5), т.е. $\mathbf{0} \in V(\bar{\mathbf{l}}, \bar{\mathbf{u}})$.
Ако $\mathbf{z}_0 \notin \mathcal{J}$, то (5) не е изпълнено и съответно $\mathbf{z}_0 \notin V(\bar{\mathbf{l}}, \bar{\mathbf{u}})$, т.е.
 $V(\bar{\mathbf{l}}, \bar{\mathbf{u}}) \subseteq \mathcal{J}$.

Тривиални случаи за $V(\bar{l}, \bar{u})$

Твърдение

Ако съществува $\mathbf{E}^* = (x_1^*, x_2^*, y_1^*, y_2^*)^T$ за $\mathbf{u}(t) \equiv \bar{\mathbf{u}}$, като $x_1^* > \bar{l}_1$ или $x_2^* > \bar{l}_2$, то ядрото на слаба инвариантност на Белман е тривиалното, т.е. $V(\bar{l}, \bar{u}) = \{\mathbf{0}\}$.

Доказва се с кооперативността и непрекъснатостта на решението на (2).

Твърдение

Ако (5) е изпълнено за решението на система (2) с $\mathbf{u} \equiv \mathbf{0}$ и начално условие $\mathbf{z}_0 = (\xi_1, \xi_2, 1, 1)^T$, то $\Xi = [0, \xi_1] \times [0, \xi_2] \times [0, 1]^2 \subseteq V(\bar{l}, \bar{u})$.
Ако е изпълнено за $\xi_i = \bar{l}_i$, то ядрото на слаба инвариантност на Белман е максималното, т.е. $V(\bar{l}, \bar{u}) = \mathcal{I}$.

Доказва се с кооперативността на (2).

Преформулировка на (6) като вариационна задача

Дефинираме значна функция на разстоянието Γ до $\partial\mathcal{J}$:

$$\Gamma(\mathbf{z}) = \begin{cases} \inf_{\mathbf{z}' \in \mathcal{J}} |\mathbf{z} - \mathbf{z}'|, & \mathbf{z} \in \Omega \setminus \mathcal{J} \\ -\inf_{\mathbf{z}' \in \Omega \setminus \mathcal{J}} |\mathbf{z} - \mathbf{z}'|, & \mathbf{z} \in \mathcal{J} \end{cases} \quad (7)$$

Фиксираме $\lambda > L > 0$ (L - константата на Липшиц за (2)) и въвеждаме функция на Белман v :

$$v(\mathbf{z}_0) = \inf_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}} \sup_{t \in (0, +\infty)} e^{-\lambda t} \Gamma(\mathbf{z}(t; \mathbf{z}_0; \mathbf{u})) \quad (8)$$

Ако започнем с $\mathbf{z}_0 \notin V(\bar{\mathbf{l}}, \bar{\mathbf{u}})$, то $v(\mathbf{z}_0) > 0$ и обратното.

Ако започнем с $\mathbf{z}_0 \in V(\bar{\mathbf{l}}, \bar{\mathbf{u}})$, то $v(\mathbf{z}_0) \leq 0$ и обратното.

$$V(\bar{\mathbf{l}}, \bar{\mathbf{u}}) = \{\mathbf{z}_0 \in \Omega | v(\mathbf{z}_0) \leq 0\}, \quad \partial V(\bar{\mathbf{l}}, \bar{\mathbf{u}}) = \{\mathbf{z}_0 \in \Omega | v(\mathbf{z}_0) = 0\}$$

Уравнение на Хамилтон-Якоби-Белман

В сила е принцип за динамично програмиране:

$$v(z_0) = \inf_{u \in \mathcal{U}} \max \{ e^{-\lambda t} v(z_0), \sup_{s \in (0, t]} e^{-\lambda t} \Gamma(z(s; z_0; u)) \} \quad (9)$$

Може да се покаже, че v е вискозното решение на **уравнението на Хамилтон-Якоби-Белман**:

$$\begin{aligned} \min \{ \lambda v(z) + \mathcal{H}(z, \nabla v), v(z) - \Gamma(z) \} &= 0, \quad z \in \mathbb{R}^4 \\ \mathcal{H}(z, w) &= \max_{u \in U} \langle -f(z, u), w \rangle \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathcal{H}(z, \nabla v) =$$

$$\begin{aligned} & [\gamma_1 x_1 - (1 - x_1) (b_{11} y_1 + b_{12} y_2)] \frac{\partial v}{\partial x_1} + [\gamma_2 x_2 - (1 - x_2) (b_{21} y_1 + b_{22} y_2)] \frac{\partial v}{\partial x_2} \\ & + [\mu_1 y_1 - (1 - y_1) (c_{11} x_1 + c_{12} x_2)] \frac{\partial v}{\partial y_1} + [\mu_2 y_2 - (1 - y_2) (c_{21} x_1 + c_{22} x_2)] \frac{\partial v}{\partial y_2} \\ & \max \left\{ 0, \kappa \bar{u}_1 (1 - x_1) (b_{11} y_1 + b_{12} y_2) \frac{\partial v}{\partial x_1} + c_{11} \kappa \bar{u}_1 x_1 (1 - y_1) \frac{\partial v}{\partial y_1} + c_{21} \bar{u}_1 x_1 (1 - y_2) \frac{\partial v}{\partial y_2} \right\} + \\ & \max \left\{ 0, \kappa \bar{u}_2 (1 - x_2) (b_{21} y_1 + b_{22} y_2) \frac{\partial v}{\partial x_2} + c_{12} \bar{u}_2 x_2 (1 - y_1) \frac{\partial v}{\partial y_1} + c_{22} \bar{u}_2 x_2 (1 - y_2) \frac{\partial v}{\partial y_2} \right\} \end{aligned}$$

Числено решение на уравнението на Х-Я-Б

Диференциалното уравнение се разглежда като стационарно решение на диференциална задача с добавено числено време само в околност на \mathcal{J} . Началното условие взимаме $v_0 = \Gamma$.

Чрез WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) метода се получават по-точни приближения за разлика напред и назад v_{η}^{\pm} на производните $\frac{\partial v}{\partial \eta}$, $\eta = x_1, x_2, y_1, y_2$.

Численият Хамилтонян от вида Lax-Friedrichs $\hat{\mathcal{H}}$ е:

$$\hat{\mathcal{H}} = \mathcal{H} \left(\mathbf{z}, \frac{v_{x_1}^+ + v_{x_1}^-}{2}, \frac{v_{x_2}^+ + v_{x_2}^-}{2}, \frac{v_{y_1}^+ + v_{y_1}^-}{2}, \frac{v_{y_2}^+ + v_{y_2}^-}{2} \right) - \sum_{\eta=x_1, x_2, y_1, y_2} \alpha^{\eta} \frac{v_{\eta}^+ - v_{\eta}^-}{2} \quad (12)$$

Множителите α^{η} са от вида:

$$\begin{aligned} \alpha^{x_1} &= \max \left| \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial w_1} (\mathbf{z}, \mathbf{w}) \right|, \quad \alpha^{x_2} = \max \left| \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial w_2} (\mathbf{z}, \mathbf{w}) \right|, \\ \alpha^{y_1} &= \max \left| \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial w_3} (\mathbf{z}, \mathbf{w}) \right|, \quad \alpha^{y_2} = \max \left| \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial w_4} (\mathbf{z}, \mathbf{w}) \right| \end{aligned} \quad (13)$$

Числено решение на уравнението на Х-Я-Б

Използваната дискретизацията по пространството е равномерна със стъпки h_η , $\eta = x_1, x_2, y_1, y_2$.

Използваната дискретизация по времето е равномерна със стъпка τ и по него се апроксимира с подобрения метод на Ойлер.

За да може методът да е TVD трябва да е изпълнено условието на Courant-Friedrichs-Lewy:

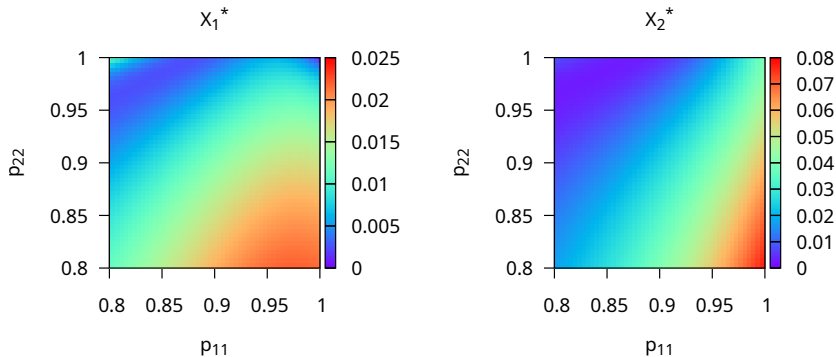
$$\tau \max \left(\frac{\left| \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial w_1} \right|}{h_{x_1}} + \frac{\left| \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial w_2} \right|}{h_{x_2}} + \frac{\left| \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial w_3} \right|}{h_{y_1}} + \frac{\left| \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial w_4} \right|}{h_{y_2}} \right) < 1 \quad (14)$$

Стойности на параметри

Параметър	Набор 1		Набор 2		Набор 3	
	М. 1	М. 2	М. 1	М. 2	М. 1	М. 2
β_{vh}		0.5		0.5		0.5
β_{hv}		0.1		0.1		0.1
a_i	0.12	0.18	0.158	0.159	0.15	0.24
M_i	6×10^7	1.6×10^8	7320950	4695340	7320950	4695340
μ_i	$\frac{1}{21}$	$\frac{1}{15}$	0.032	0.046	0.0397	0.0335
τ		10		10		10
N_i	8×10^6	2×10^7	9377980	4467650	755440	3945290
γ_i		$\frac{1}{14}$	0.0627	0.0576	0.0735	0.0622
ρ_{ij}			различни ($p_{i1} + p_{i2} = 1$)			
κ		0.44		0.37		0.38
\bar{u}_i	0.15	0.3	0.39	0.12	0.35	0.3
\bar{l}_i	0.1	0.14	0.065	0.12	0.09	0.09

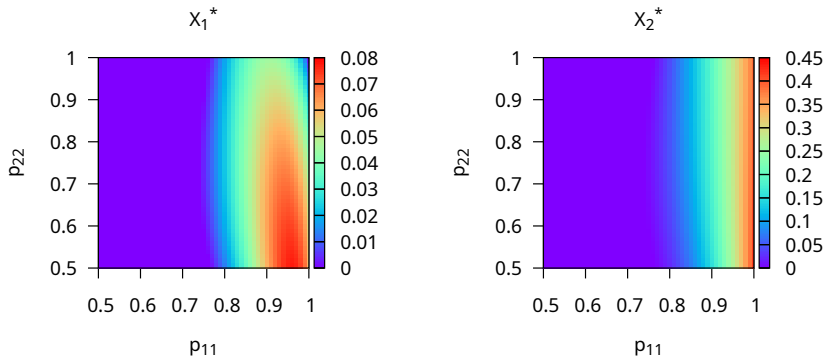
Таблица 2: Таблица със стойностите на параметрите от таблица 1 за числени симулации

Числени симулации на равновесните точки



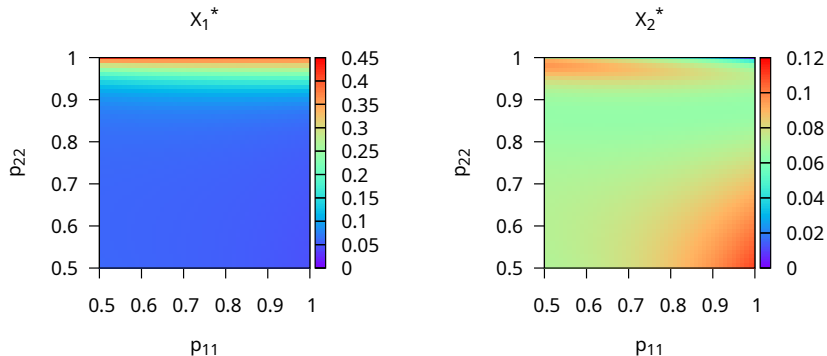
Фигура 2: Равновесните точки на (2)
с параметрите от набор 1 от таблица 2

Числени симулации на равновесните точки



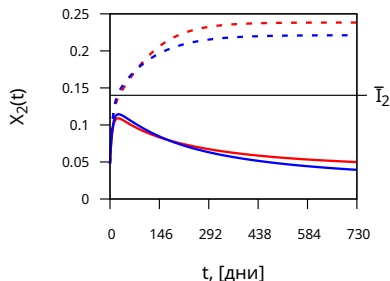
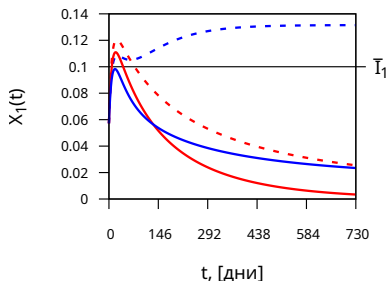
Фигура 3: Равновесните точки на (2)
с параметрите от набор 2 от таблица 2

Числени симулации на равновесните точки



Фигура 4: Равновесните точки на (2)
с параметрите от набор 3 от таблица 2

Числени симулации на решението

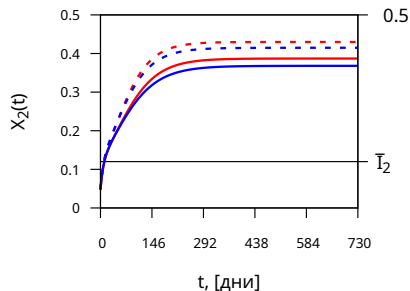
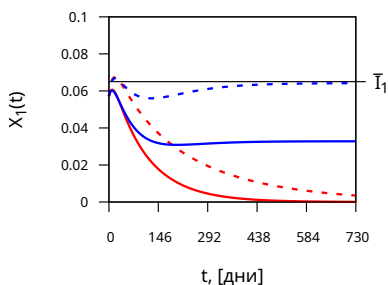


Фигура 5: Решението на (2) с параметрите от набор 1 таблица 2 и $z_0 = (0.0572, 0.048, 0.052, 0.044)^T$.

Пунктирано: без употреба на репелент ($u(t) \equiv 0$), плътно: максимална употреба на репелент ($u(t) \equiv \bar{u}$).

Червено: без мобилност ($p_{11} = p_{22} = 1$), синьо: с мобилност ($p_{11} = p_{22} = 0.85$)

Числени симулации на решението

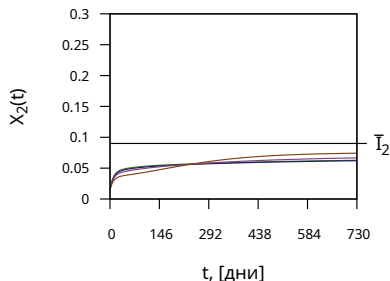
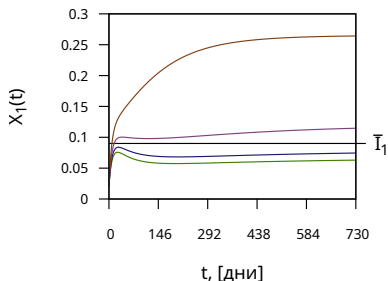


Фигура 6: Решението на (2) с параметрите от набор 2 от таблица 2 и $z_0 = (0.0572, 0.048, 0.052, 0.044)^T$.

Пунктирано: без употреба на репелент ($u(t) \equiv 0$), плътно: максимална употреба на репелент ($u(t) \equiv \bar{u}$).

Червено: без мобилност ($p_{11} = p_{22} = 1$), синьо: с мобилност ($p_{11} = 0.99, p_{22} = 0.9$).

Числени симулации на решението



Фигура 7: Решението на (2) с параметрите от набор 3 от таблица 2 и $z_0 = (0.02, 0.015, 0.04, 0.03)^T$, максимална употреба на репелент ($u(t) \equiv \bar{u}$). За четирите криви е фиксирано $p_{11} = 0.93$, а p_{22} е различно.

Зелено: много висока мобилност ($p_{22} = 0.85$), синьо: висока мобилност ($p_{22} = 0.88$), лилаво: средна мобилност ($p_{22} = 0.92$), кафяво: ниска мобилност ($p_{22} = 0.97$).

Числено приближение на $V(\bar{l}, \bar{u})$

$p_{11} \backslash p_{22}$	0.8	0.85	0.9	0.95
0.95	3.427	3.447	3.467	3.486
0.9	3.468	3.487	3.507	3.527
0.85	3.498	3.517	3.536	3.554
0.8	3.519	3.540	3.559	3.580

Таблица 3: 4-мерната мярка на ядрото на слаба инвариантност на Белман $V(\bar{l}, \bar{u})$ за различни стойности на мобилността с параметрите от набор 1 от таблица 2. Стойността при случая без мобилност е взета за референтна.

- [1] WHO Executive Board 141. Eradication of malaria: report by the Secretariat. *World Health Organization*, 2017. URL: <https://iris.who.int/handle/10665/273662>.
- [2] Folashade Agosto, Amy Goldberg, Omayra Ortega, Joan Ponce, Sofya Zaytseva, Suzanne Sindi, and Sally Blower. How do interventions impact malaria dynamics between neighboring countries? a case study with botswana and zimbabwe. In *Using Mathematics to Understand Biological Complexity: From Cells to Populations*. Springer, 2021. ISBN: 978-3-030-57129-0. DOI: 10.1007/978-3-030-57129-0_5.
- [3] Charalambos D. Aliprantis and Kim C. Border. *Infinite Dimensional Analysis: A Hitchhiker's Guide*. Springer, 2006. ISBN: 978-3-540-29586-0.

- [4] Albert Altarovici, Olivier Bokanowski, and Hasnaa Zidani. A general hamilton-jacobi framework for non-linear state-constrained control problems. *ESAIM: COCV*, 19(2), 2013. DOI: 10.1051/cocv/2012011.
- [5] Mohamed Assellaou, Olivier Bokanowski, Anya Desilles, and Hasnaa Zidani. A hamilton-jacobi-bellman approach for the optimal control of an abort landing problem. In *2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*, 2016. DOI: 10.1109/CDC.2016.7798815.
- [6] Mohamed Assellaou, Olivier Bokanowski, Anya Desilles, and Hasnaa Zidani. Value function and optimal trajectories for a maximum running cost control problem with state constraints. application to an abort landing problem. *ESAIM: M2AN*, 52(1), 2018. DOI: 10.1051/m2an/2017064.

- [7] Jean-Pierre Aubin. *Viability Theory*. Birkhäuser, 1991. ISBN: 978-0-8176-4910-4.
- [8] Nicolas Bacaër. *A short history of mathematical population dynamics*. Springer, 2011. ISBN: 978-0-85729-114-1.
- [9] Martino Bardi and Italo Capuzzo-Dolcetta. *Optimal Control and Viscosity Solutions of Hamilton-Jacobi-Bellman Equations*. Birkhäuser, 1997. ISBN: 978-0-8176-4754-4.
- [10] Samuel Baron, editor. *Medical Microbiology*. University of Texas Medical Branch at Galveston, 1996. ISBN: 978-0-963-11721-2. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK7627/>.
- [11] Derdei Bichara and Carlos Castillo-Chavez. Vector-borne diseases models with residence times – a lagrangian perspective. *Mathematical Biosciences*, September 10, 2016.

- [12] Richard A. Brualdi and Herbert J. Ryser. Volume Combinatorial Matrix Theory of *Encyclopedia of Mathematics and its Applications*. Cambridge University Press, 1991. ISBN: 978-0-521-32265-2.
- [13] Vincenzo Capasso. *Mathematical Structures of Epidemic Systems*. Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-56526-0.
- [14] Cécile Carrère and Hasnaa Zidani. Stability and reachability analysis for a controlled heterogeneous population of cells. *Optimal Control Applications and Methods*, 41(5), 2020. DOI: 10.1002/oca.2627.
- [15] C. Cosner, J.C. Beier, R.S. Cantrell, D. Impoinvil, L. Kapitanski, M.D. Potts, A. Troyo, and S. Ruan. The effects of human movement on the persistence of vector-borne diseases. *Journal of Theoretical Biology*, 258(4), 2009. DOI: 10.1016/j.jtbi.2009.02.016.
- [16] Michel De Lara and Lilian Sofia Sepulveda Salcedo. Viable control of an epidemiological model. *Mathematical Biosciences*, 280, 2016. DOI: 10.1016/j.mbs.2016.07.010.

- [17] Odo Diekmann, J. A. P. Heesterbeek, and J. A. J. Metz. On the definition and the computation of the basic reproduction ratio r_0 in models for infectious diseases in heterogeneous populations. *Journal of Mathematical Biology*, 28(4), 1990. DOI: 10.1007/BF00178324.
- [18] Armin R. W. Elbers, C. J. M. Koenraadt, and Rudy Meiswinkel. Mosquitoes and culicoides biting midges: vector range and the influence of climate change. *Rev Sci Tech*, 34(1), 2015. DOI: 10.20506/rst.34.1.2349.
- [19] Ana Marija Grancarić, Lea Botteri, and Peyman Ghaffari. Combating invasive mosquitoes by textiles and paints. In *AUTEX2019 World Textile Conference on Textiles at the Crossroads*, 2019. URL: <https://openjournals.ugent.be/autex/article/id/63741/>.
- [20] Jack K. Hale. *Ordinary differential equations*. Krieger Publishing Company, 1980. ISBN: 978-0-898-74011-0.

- [21] Stanley Osher and Ronald Fedkiw. *Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces*. Springer, 2003. ISBN: 978-0-387-95482-1.
- [22] Olivia Prosper, Nick Ruktanonchai, and Maia Martcheva. Assessing the role of spatial heterogeneity and human movement in malaria dynamics and control. *Journal of Theoretical Biology*, 303, 2012. DOI: 10.1016/j.jtbi.2012.02.010.
- [23] Peter Rashkov. A model for a vector-borne disease with control based on mosquito repellents: a viability analysis. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 498(1), 2021. DOI: 10.1016/j.jmaa.2021.124958.
- [24] Peter Rashkov. Modeling repellent-based interventions for control of vector-borne diseases with constraints on extent and duration. *Mathematical biosciences and engineering : MBE*, 19(4), 2022. DOI: 10.3934/mbe.2022185.

- [25] Nick W. Ruktanonchai, David L. Smith, and Patrick De Leenheer. Parasite sources and sinks in a patched ross–macdonald malaria model with human and mosquito movement: implications for control. *Mathematical Biosciences*, 279, 2016. DOI: 10.1016/j.mbs.2016.06.012.
- [26] David L. Smith, Katherine E. Battle, Simon I. Hay, Christopher M. Barker, Thomas W. Scott, and F. Ellis McKenzie. Ross, macdonald, and a theory for the dynamics and control of mosquito-transmitted pathogens. *PLoS Pathog*, 8(4), 2012. DOI: 10.1371/journal.ppat.1002588.
- [27] Hal L. Smith. Cooperative systems of differential equations with concave nonlinearities. *Nonlinear Analysis, Theory, Methods & Applications*, 18(10), 1986. DOI: 10.1016/0362-546X(86)90087-8.

- [28] Pauline van den Driessche and James Watmough. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. *Mathematical Biosciences*, 180(1), 2002. DOI: 10.1016/S0025-5564(02)00108-6.

Благодаря за вниманието