

# Spis treści

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | <i>Wprowadzenie</i> . . . . .                            | 1  |
| 1.1   | Streszczenie . . . . .                                   | 1  |
| 1.2   | Abstract . . . . .                                       | 1  |
| 1.3   | Cel pracy . . . . .                                      | 1  |
| 1.4   | Układ pracy . . . . .                                    | 1  |
| 2.    | <i>Wstęp</i> . . . . .                                   | 3  |
| 2.1   | Procesy nowotworowe . . . . .                            | 3  |
| 2.2   | Sposoby leczenia nowotworów . . . . .                    | 3  |
| 2.2.1 | Znaczenie układu immunologicznego . . . . .              | 3  |
| 2.2.2 | Immunoterapia . . . . .                                  | 6  |
| 2.2.3 | Chemioterapia . . . . .                                  | 7  |
| 2.2.4 | Leczenie skojarzone . . . . .                            | 8  |
| 3.    | <i>Model</i> . . . . .                                   | 9  |
| 3.1   | Opis modelu . . . . .                                    | 9  |
| 3.2   | Założenia modelu . . . . .                               | 9  |
| 3.3   | Równania modelu . . . . .                                | 10 |
| 3.4   | Parametry modelu . . . . .                               | 11 |
| 4.    | <i>Symulacje</i> . . . . .                               | 13 |
| 4.1   | Brak leczenia . . . . .                                  | 13 |
| 4.1.1 | Warunki początkowe . . . . .                             | 13 |
| 4.2   | Leczenie metodą immunoterapii . . . . .                  | 14 |
| 4.3   | Leczenie metodą chemioterapii . . . . .                  | 14 |
| 4.4   | Połączenie metod immunoterapii i chemioterapii . . . . . | 14 |
| 5.    | <i>Rezultaty</i> . . . . .                               | 15 |
| 6.    | <i>Analiza wyników</i> . . . . .                         | 16 |
| 7.    | <i>Podsumowanie</i> . . . . .                            | 17 |

# Spis rysunków

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Różnice pomiędzy odpornością wrodzoną a nabytą. . . . .   | 4  |
| 4.1 | Symulacja odpowiedzi układu immunologicznego na nowotwór, dla warunków początkowych: liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1 * 10^6$ , liczba komórek NK $N(0) = 1 * 10^5$ , liczba limfocytów T CD8+ $L(0) = 1 * 10^2$ , liczba krążących limfocytów $C(0) = 6 * 10^{10}$ . . . . . | 13 |
| 4.2 | Symulacja odpowiedzi układu immunologicznego na nowotwór, dla warunków początkowych: liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1 * 10^6$ , liczba komórek NK $N(0) = 1 * 10^3$ , liczba limfocytów T CD8+ $L(0) = 1 * 10^1$ , liczba krążących limfocytów $C(0) = 6 * 10^8$ . . . . .    | 14 |

# Spis tabel

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 3.1 Parametry modelu. . . . . | 12 |
|-------------------------------|----|

# 1. Wprowadzenie

## 1.1 Streszczenie

W pracy przedstawiono model opisujący leczenie nowotworu skojarzonymi metodami immunoterapii i chemioterapii. Model ten oparty jest na modelu de Pillis'a oraz modelu Isaeva i Osiopov'a [1]. Uwzględnia on rozwój komórek nowotworowych w organizmie, odpowiedź układu immunologicznego – limfocytów naciekających nowotwór (TIL), komórek naturalnie bójczych (komórek NK), limfocytów CD8+ – na nowotwór oraz leczenie metodą chemioterapii i immunoterapii z użyciem cytokin: interleukin-2 (IL-2) i interferonów alpha (INF- $\alpha$ ).

## 1.2 Abstract

## 1.3 Cel pracy

Celem pracy było:

- utworzenie modelu rozwoju nowotworu w organizmie z uwzględnieniem leczenia skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii,
- przeprowadzenie symulacji leczenia nowotworu metodą chemioterapii, immunoterapii oraz skojarzonych metod chemioterapii i immunoterapii,
- analiza rozwiązań modelu opisującego leczenie wyłącznie metodą chemioterapii,
- analiza rozwiązań modelu opisującego leczenie wyłącznie metodą immunoterapii,
- analiza rozwiązań modelu opisującego leczenie zarówno metodą chemioterapii, jak i immunoterapii.

## 1.4 Układ pracy

Praca składa się z następujących części:

- wstępu teoretycznego zawierającego informacje na temat rodzajów i sposobów rozwoju nowotworów oraz niektórych metod ich leczenia, a także dotyczących budowy i sposobu działania układu immunologicznego,

- 
- przedstawienia zaimplementowanego modelu, na którym przeprowadzano symulacje,
  - opisu dokonanych symulacji i scenariuszy, według których zostały przeprowadzone,
  - analizy wyników symulacji i wynikających z nich wniosków,
  - podsumowania.

## 2. Wstęp

### 2.1 Procesy nowotworowe

Nowotworem określa się nieprawidłowe komórki w organizmie, których wzrost odbywa się w sposób niekontrolowany [1,2]. W zdrowym organizmie występuje równowaga pomiędzy tempem podziałów komórkowych a ich utratą. W przypadku nowotworu ginie mniej komórek niż przybywa [3]. W efekcie ich spontanicznego mnożenia się struktura, która się z nich składa zaczyna niszczyć narząd, w którym wystąpił proces nowotworowy. Niektóre z tych komórek mogą oderwać się od pozostałych, przedostać do naczyń krwionośnych i limfatycznych, a w konsekwencji dawać przerzuty do innych narządów [2]. Powstawanie nowotworu wiąże się z wieloma zmianami materiału genetycznego. Rozpoczęcie tego procesu zależy zarówno od wagi, jak i miejsca, w którym dana zmiana wystąpiła. Warto zwrócić uwagę na zmiany systemów naprawy DNA oraz systemów regulujących podstawowe procesy komórek (na przykład wzrost, różnicowanie, apoptoza). Na skutek zmian systemów naprawczych dochodzi do szybkiej i dużej niestabilności genomu, natomiast w przypadku zmian w systemach regulujących proces zaburzenia homeostazy komórki jest powolny, a niestabilność narasta stopniowo. Choroby nowotworowe w większości rozwijają się zgodnie z powolnym mechanizmem, dlatego od pojawienia się początkowej zmiany do klinicznego ujawnienia guza mija zazwyczaj wiele lat [3].

### 2.2 Sposoby leczenia nowotworów

#### 2.2.1 Znaczenie układu immunologicznego

##### *Budowa układu immunologicznego*

Na układ immunologiczny składają się mechanizmy odporności swoistej (nabytej) i nieswoistej (wrodzonej) [4,5]. Najważniejsze różnice pomiędzy tymi dwoma rodzajami odporności zostały przedstawione na rys. 2.1 Funkcjonowanie mechanizmów nieswoistych jest niezależne od wcześniejszej styczności organizmu z czynnikami patogennymi i pełni funkcję obronną przed infekcjami i chorobami będącymi skutkiem działania czynników środowiskowych. Mechanizmy te cechuje mniejsza precyzja, ale są one zdolne do szybkiego rozpoznawania i niszczenia wnikających drobnoustrojów. Odporność wrodzoną warunkują między innymi: komórki NK, makrofagi, granulocyty, monocyty. Do mechanizmów swoistej odporności należą [6]:

- aktywność cytokin i chemokin,

- cytokinozależna wrodzona oporność leukocytów i innych komórek,
- zabijanie zakażonych lub nowotworowych komórek przez komórki NK, komplement aktywowany lektynami lub drogą alternatywną,
- opsonizacja i fagocytoza.

Odporność swoista rozpoznaje antygeny bardzo precyzyjnie. Jej ważnymi elementami są limfocyty T, limfocyty B, cytokiny, przeciwciała. Komórki tego typu są zdolne do wytwarzania nieograniczonej liczby receptorów. Dodatkowo, jeśli dojdzie do ich kontaktu z antygenem wytwarza się pamięć immunologiczną, dzięki czemu przy ponownym zetknięciu wytwarzana jest odpowiedź immunologiczna. W przypadku limfocytów T, typ odpowiedzi swoistej określany jest jako komórkowy, natomiast dla limfocytów B – humoralny. Pomimo bardzo dużego znaczenia układu immunologicznego dla organizmu, wiele mechanizmów jego działania pozostaje niewyjaśnionych [4].

**Rys. 2.1:** Różnice pomiędzy odpornością wrodzoną a nabytą.

| Różnice                                  | Odporność wrodzona nieswoista   | Odporność nabyta swoista   |
|--|---|--|
| Kinetyka rozwoju reakcji immunologicznej | rozwija się bardzo szybko (minuty); nie wymaga wstępnej aktywacji   | rozwija się powoli, nawet do 6 dni   |
| Pochodzenie receptorów                   | nabyte w rozwoju ewolucyjnym, niezmiennie, dziedziczone z pokolenia na pokolenie, rozpoznają struktury wspólne i obecne na dużej liczbie patogenów  | powstają de novo poprzez rearanżację genów na skutek kontaktu z nowym antygenem, nie dziedziczą się  |
| Typy receptorów                          | toll-like (TLRs)<br>lektynowe<br>scavenger<br>receptory komórek NK  | swoiste dla poszczególnych struktur patogenu   |
| Rozpoznawane struktury patogenu          | niezmiennie, obecne na dużej grupie patogenów<br>np. LPS Gram-ujemne, sekwencje CpG DNA, wirusowe, dwuniciowe replikacyjne postaci dsRNA, struktury osłonki wirusów   | poszczególne domeny struktur patogenu  |
| Komórki                                  | NK, DC, limfocyty $\gamma\delta$ T, makrofagi, granulocyty, limfocyty B-1a  | APC, limfocyty T (CD4+, CD8+) i B  |
| Ekspansja                                | nieklonalna   | klonalna   |
| Pamięć immunologiczna                    | brak  | trwała   |
| Aktywacja                                | rozwija się niezależnie od swoistej, może być wspomagana przez swoistą  | do rozwoju wymaga odpowiedzi nieswoistej   |
| Mechanizmy efektorowe                    | cytotoksyczność (niezależna od MHC) zależna od NK, makrofagów, DC, komplementu, wytwarzanie cytokin: IFN ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ ), rodziny TNF, interleukin, chemokin, cytokinozależna odporność komórek | cytotoksyczność limfocytów TCD8+ zależna od MHC, przeciwciała, cytotoksyczność oparta na komplemencie, zależna od przeciwciał, aktywność cytokin |

### *Limfocyty T CD8+*

Limfocyty T wytwarzane są w szpiku kostnym, natomiast dojrzewają w grasicy. Te oznaczane jako CD8+ dzielą się na:

- $T_c$  – cytotoksyczne – odpowiadają za niszczenie komórek i odrzucanie przeszczepów,
- $T_s$  – supresyjne – odpowiadają za hamowanie działania innych limfocytów, reakcji alergicznych i utrzymanie tolerancji immunologicznej na własne antygeny [7].

Odpowiedź immunologiczna swoista typu komórkowego, w którą zaangażowane są subpopulacje limfocytów T polega na wywołaniu reakcji zwalczania antygeny. Możliwe są dwa typy tej reakcji. W pierwszym z nich funkcję efektorów pełnią limfocyty CD4+, a makrofagi są komórkami pomocniczymi. Drugi typ reakcji zakłada, że limfocyt cytotoksyczny CD8+ jest komórką efektorową, a limfocyt CD4+ pomocniczą. Odporność komórkowa ma za zadanie, przede wszystkim walczyć z zakażeniami będącymi efektem namnażających się drobnoustrojów, ale również spełnia ważną rolę w reakcji kontaktowej ze związkami chemicznymi, odrzuceniu przeszczepu czy tkanek zmienionych nowotworowo i w niektórych reakcjach autoimmunologicznych [4]. Między 5 a 6 dekadą życia ustaje czynność grasicy, czego skutkiem są zmiany w subpopulacjach limfocytów T. Z wiekiem głównie wzrasta liczba limfocytów CD4+, natomiast zmniejsza się liczba limfocytów supresorowych i cytotoksycznych CD8+ [4].

### *Komórki NK*

Swoją rolę w odpowiedzi immunologicznej mają także komórki NK, które pochodzą z prekursorów dojrzewających w szpiku kostnym [7]. Stanowią one 10-15% limfocytów obecnych w krwi. Ich zadaniem jest niszczenie komórek nowotworowych i zainfekowanych wirusami [5]. Charakterystyczny jest dla nich brak posiadania markerów czy receptorów antygenowych na powierzchni. Ich działanie wpływa na cytotoksyczne uszkodzenie, między innymi komórek nowotworowych. Jest to możliwe dzięki rozpoznawaniu przez receptor pektynowy reszt cukrowych, co wpływa na gotowość komórek NK do zabicia komórki docelowej. Z kolei receptor KIR (Killer Cell Inhibitory Receptor) zmniejsza aktywność komórek NK, jeśli rozpoznają one prawidłowe komórki organizmu [4]. Z wiekiem aktywność komórek NK spada (ze względu na zwiększoną liczbę receptorów KIR [5]), co zwiększa ryzyko umieralności z powodu ciężkich infekcji. Niekorzystnymi czynnikami mającymi wpływ na komórki NK są stres, niska aktywność fizyczna oraz dieta wysokotłuszczowa [4]. Silna aktywność cytotoksyczna komórek NK może być uznana za oznakę dobrego zdrowia [5].

### *Interferony*

Interferony należą do humoralnych mechanizmów obronnych odporności nieswoistej. Ich funkcją jest, między innymi hamowanie replikacji wirusów w komórce i proliferacji komórek (w szczególności nowotworowych), aktywowanie syntezy enzymów (rybonukleazy, syntetazy, kinazy białkowej) i cytotoksyczności makrofagów oraz limfocytów T, a także wzmoczenie aktywności komórek cytotoksycznych [7].



### *Interleukiny*

Interleukiny są jedną z grup cytokin, która służy, między innymi do komunikacji pomiędzy komórkami układu odpornościowego, stanowiącymi elementy odporności wrodzonej i nabytej. Mają one charakter białkowy i są produkowane głównie przez leukocyty. Ze względu na cechy biologiczne, w tym różnice w budowie molekularnej i strukturze, interleukiny zostały zgrupowane w trzy rodziny:

- pierwsza – podzielona na podrodzinę interleukiny-2 i podrodzinę interferonów (reprezentowaną przez interferon- $\alpha$  i interferon- $\beta$ ),
- druga – rodzina interleukiny-1,
- trzecia – zawierająca interleukinę 17A, B, C, D, F oraz IL-8, 25 i 27, a także IL-31, 32 i 33 [8].

## **2.2.2 Immunoterapia**

Podczas immunoterapii dochodzi do ingerencji w układ odpornościowy, co ma na celu wzmocnienie lub modyfikację mechanizmów obronnych walczących z nowotworem. Immunoterapię można podzielić na bierną i czynną o charakterze swoistym albo nieswoistym.

### *Nieswoista bierna immunoterapia*

Immunoterapia tego typu ma za zadanie wywołać nieswoistą aktywację układu immunologicznego, a w konsekwencji działanie przeciwnowotworowe na skutek podawania czynników lub aktywowanych komórek efektorowych. Wykorzystuje się tu, na przykład cytokiny czy komórki LAK (lymphokine activated killers). Aby wywołać efekt biologiczny konieczne jest połączenie cytokiny ze swoistym receptorem na komórkach docelowych (limfocyty T i B, komórki NK, monocyty, makrofagi i granulocyty). Efektami przeciwnowotworowymi cytokin są:

- bezpośredni efekt cytotoksyczny (TNF- $\alpha$ ),
- modyfikacja migracji limfocytów (TNF, IL-1, INF- $\gamma$ ),
- wzrost wrażliwości komórek nowotworowych na efekty cytotoksyczne różnych czynników biologicznych lub chemicznych (INF- $\gamma$ , TNF- $\alpha$ ),
- hamowanie proliferacji komórek nowotworowych (INF- $\alpha$ , INF- $\gamma$ ),
- aktywacja komórek NK (GM-CSF, IL-2, IL-6).

INF- $\alpha$  to pierwsza rekombinowana cytokina zarejestrowana do stosowania klinicznego.

### *Swoista bierna immunoterapia*

Swoista bierna immunoterapia to metodą, która polega na podawaniu czynników lub komórek efektorowych swoście skierowanych przeciwko danej komórce nowotworowej. Są to, na przykład:

- przeciwciała podawane przeciwko antygenom, które występują na komórkach nowotworowych,
- terapie komórkowe, które wykorzystują limfocyty naciekające guz (tumor infiltrating lymphocytes – TIL); są one izolowane, następnie namnożone i aktywowane, po czym ponownie przetaczane,
- limfocyty krwi obwodowej stymulowane in vitro komórkami prezentującymi antygen.

### *Nieswoista czynna immunoterapia*

W metodzie tej pobudzany jest układ odpornościowy, a zwłaszcza odpowiedź komórkowa. Wykorzystywane są do tego antygeny, niewystępujące w komórkach nowotworu. Substancjami stymulującymi procesy odpornościowe są nieswoiste immunostymulatory (np. całe mikroorganizmy, elementy ściany komórkowej) i immunomodulatory (m. in. wyciągi z grasicy, syntetyczne hormony grasicy, tuftsynę, enkefaliny, endorfiny, wyciągi z limfocytów).

### *Swoista czynna immunoterapia*

Ostatni rodzaj leczenia metodą immunoterapii polega na pobudzaniu odporności na antygeny swoiste dla danego typu nowotworu. Wykorzystuje się w niej immunizację przy użyciu tzw. terapeutycznych szczepionek nowotworowych. Są to szczepionki:

- niekomórkowe – peptydowe, HSP (heat shock protein – szczepionki na bazie białek szoku cieplnego), szczepionki DNA oraz wirusowe,
- komórkowe – niemodyfikowane i modyfikowane genetycznie oraz komórki DC „karmione” antygenami nowotworowymi [10].

## **2.2.3 Chemioterapia**

Chemioterapia to metoda leczenia, która polega na niszczeniu komórek nowotworowych, drobnoustrojów, bakterii za pomocą środków chemicznych. W przypadku nowotworów, stosuje się różne grupy leków, tzw. cytostatyków. Zależnie od indywidualnych cech pacjenta ma ona ściśle określony przebieg. Leki stosowane są w monoterapii – stosowanie jednego leku cytostatycznego lub polichemioterapii – stosowanie kilku leków w określonym schemacie. Leki podawane są w pewnych sekwencjach – co kilka dni, tygodni czy bez stosowania przerwy w leczeniu. Leki cytostatyczne działają w określonych fazach podziału komórek nowotworowych zmniejszając lub spowalniając ich namnażanie

się. Najczęściej podawane są w postaci dożylnych wlewów, lecz niektóre z nich mają formę tabletek. Skutki uboczne chemioterapii mogą być liczne i zauważalne już po kilku dniach terapii, a czasem nawet po kilku godzinach [9].

## 2.2.4 Leczenie skojarzone

Leczenie skojarzone, polega na połączeniu kilku metod leczniczych u pacjenta. Ten sposób terapii posiada wiele zalet: umożliwia wykonanie zabiegu operacyjnego w wielu przypadkach pierwotnie nieoperacyjnych, pozwala zastąpić okaleczające zabiegi chirurgiczne równie skutecznym leczeniem zachowawczym, zmniejsza ryzyko wznowy miejscowej choroby i rozwoju odległych przerzutów, wpływa na wydłużenie czasu przeżycia chorych. Sposób ten ma również pewne wady: znacznie większa toksyczność w porównaniu z monoterapią, brak współpracy między specjalistami – trudności w przeprowadzeniu optymalnego w danym przypadku leczenia skojarzonego. Można wyróżnić:

- leczenie sekwencyjne – poszczególne metody lecznicze stosowane są po kolei, np.:
  - leczenie wstępne (neoadiuwantowe, indukcyjne) — poprzedza leczenie radykalne. Jego celem jest wczesne oddziaływanie na mikroprzerzuty lub zmniejszenie masy guza u chorych z miejscowo zaawansowanym nowotworem i umożliwienie tym samym przeprowadzenia leczenia radykalnego.
  - uzupełniające (adiuwantowe) — stosowane jest po leczeniu radykalnym, czyli u osób bez cech choroby nowotworowej, u których ryzyko uogólnienia jest duże. Jego celem jest zniszczenie potencjalnie istniejących mikroprzerzutów i zmniejszenie tym samym prawdopodobieństwa nawrotu nowotworu;
- leczenie równoczesne — kojarzenie różnych metod leczenia w tym samym czasie, na przykład równoczesna chemioradioterapia, napromienianie śródoperacyjne.
- leczenie naprzemienne — dotyczy kojarzenia radioterapii i chemioterapii [11].

## 3. Model

### 3.1 Opis modelu

Model matematyczny wykorzystany w pracy oparto na modelu de Pillis'a oraz modelu Isaeva i Osiopov'a [1]. Obejmuje on cztery populacje komórek:

- komórki nowotworowe  $T(t)$ ,
- komórki NK  $N(t)$ ,
- limfocyty T CD8+  $L(t)$ ,
- limfocyty krążące  $C(t)$

oraz stężenie trzech leków:

- interleukin-2  $I(t)$ ,
- interferonów- $\alpha I_\alpha(t)$ ,
- leku użytego w chemioterapii  $M(t)$ .

W równaniach modelu uwzględniono takie czynniki, jak:

- naturalny rozwój i śmierć komórek,
- śmierć komórek nowotworowych pod wpływem komórek NK, limfocytów T CD8+ i leków chemioterapetycznych,
- wytwarzanie komórek NK i limfocytów T CD8+,
- dezaktywację komórek NK i limfocytów T CD8+,
- ilość podawanych leków i czas, w którym zostały podane.

### 3.2 Założenia modelu

1. W przypadku braku odpowiedzi układu immunologicznego liczba komórek nowotworowych wzrasta logistycznie.
2. Limfocyty NK i T CD8+ są zdolne zniszczyć komórki nowotworu.

3. Pod wpływem komórek nowotworowych limfocyty NK i T CD8+ ulegają rozszerzeniu się oraz wzrasta ich aktywność cytalityczna.
4. Limfocyty NK są zawsze obecne w organizmie, także w przypadku braku występowania komórek nowotworowych.
5. Jako część specyficznej odpowiedzi immunologicznej aktywne limfocyty T CD8+ są obecne w dużej liczbie tylko w przypadku obecności komórek nowotworowych.
6. Limfocyty NK i T CD8+ ulegają całkowitej dezaktywacji po pewnej ilości interakcji z komórkami nowotworowymi.
7. Komórki nowotworowe dezaktywują się pod wpływem interferonów  $\alpha$ .
8. Poziom krążących limfocytów może służyć do oceny zdrowia pacjenta.
9. Odsetek komórek nowotworowych zabitych w wyniku chemioterapii zależy od ilości leku obecnego w organizmie. Maksymalny odsetek zabitych komórek wynosi mniej niż 1 – pokonanie komórek nowotworowych wskutek chemioterapii jest możliwe tylko na niektórych etapach ich rozwoju.
10. Część limfocytów NK, T CD8+ i krążących jest również zabijana podczas chemioterapii, zgodnie z krzywą zabijania.
11. Limfocyty NK i T CD8+ uczestniczą w procesie stymulacji i eliminacji aktywowanych komórek (efektorów); uproszczony model ma odzwierciedlać samoregulujący charakter układu immunologicznego.

### 3.3 Równania modelu

$$\frac{dT}{dt} = aT(1 - bT) - cNT - DT - K_T(1 - e^{-M})T - c'TL, \quad (3.1)$$

$$\frac{dN}{dt} = eC - fN + g\frac{T^2}{h + T^2}N - pNT - K_N(1 - e^{-M})N, \quad (3.2)$$

$$\frac{dL}{dt} = -mL + j\frac{D^2T^2}{k + D^2T^2}L - qLT + (r_1N + r_2C)T - uNL^2 - K_L(1 - e^{-M})L + \frac{p_iLI}{g_i} + \nu_L(t), \quad (3.3)$$

$$\frac{dC}{dt} = \alpha - \beta C - K_C(1 - e^{-M})C, \quad (3.4)$$

$$\frac{dM}{dt} = -\gamma M + \nu_M(t), \quad (3.5)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\mu_i L - j'LI - k'TI + \nu_I(t), \quad (3.6)$$

$$\frac{dI_\alpha}{dt} = V_\alpha(t) - gI_\alpha, \quad (3.7)$$

gdzie:

$$D = d \frac{(\frac{L}{T})^l}{s + (\frac{L}{T})^l} \quad (3.8)$$

$$c' = c_{CTL}(2 - e^{\frac{I_\alpha}{I_{\alpha 0}}}) \quad (3.9)$$

### 3.4 Parametry modelu

W celu przeprowadzenia symulacji dobrano parametry modelu, jak w tabeli 3.1.

| Nazwa | Wartość           | Jednostka                                   | Opis  |
|-------|-------------------|---|---|
| a     | $4,31 * 10^{-1}$  | dzień <sup>-1</sup>                         | Tempo wzrostu nowotworu   |
| b     | $1,02 * 10^{-9}$  | komórka <sup>-1</sup>                       | 1/b – nośność nowotworu   |
| c     | $6,41 * 10^{-11}$ | dzień <sup>-1</sup> * komórka <sup>-1</sup> | Liczba komórek nowotworu zabita przez komórki NK                                    |
| d     | 2,34              | dzień <sup>-1</sup>                         | Stopień zabijania komórek nowotworu przez limfocyty T CD8+                          |
| e     | $2,08 * 10^{-7}$  | dzień <sup>-1</sup>                         | Liczba krążących limfocytów, które stały się komórkami NK                           |
| l     | 2,9               | bezwymiarowe                                | Komórki nowotworowe częściowo zabijane przez limfocyty T CD8+ i przez chemioterapię |
| f     | $4,12 * 10^{-2}$  | dzień <sup>-1</sup>                         | Tempo wymierania komórek NK   |
| g     | $1,25 * 10^{-2}$  | dzień <sup>-1</sup>                         | Maksymalna liczba komórek NK wytwarzanych na skutek obecności komórek nowotworowych |
| h     | $2,02 * 10^7$     | komórka <sup>2</sup>                        | Współczynnik stromości krzywej rekrutacji komórek NK                                |
| j     | $2,49 * 10^{-2}$  | dzień <sup>-1</sup>                         | Maksymalne tempo rekrutacji limfocytów T CD8+                                       |
| k     | $3,66 * 10^7$     | komórka <sup>2</sup>                        | Współczynnik stromości krzywej rekrutacji limfocytów T CD8+                         |

|                |                  |   |   |
|----------------|------------------|---|---|
| m              | $2,04 * 10^{-1}$ | dzień <sup>-1</sup>                         | Tempo wymierania limfocytów T CD8+  |
| q              | $1,42 * 10^{-6}$ | dzień <sup>-1</sup> * komórka <sup>-1</sup> | Tempo dezaktywacji limfocytów T CD8+ przez komórki nowotworu  |
| p              | $3,42 * 10^{-6}$ | dzień <sup>-1</sup> * komórka <sup>-1</sup> | Tempo dezaktywacji komórek NK przez komórki nowotworu   |
| s              | $8,39 * 10^{-2}$ | bezwymiarowe                                | Współczynnik stromości krzywej dezaktywacji nowotworu   |
| $r_1$          | $1,1 * 10^{-7}$  | dzień <sup>-1</sup> * komórka <sup>-1</sup> | Tempo stymulacji wytwarzania limfocytów T CD8+ jako rezultat zabijania komórek nowotworowych przez komórki NK         |
| $r_2$          | $6,5 * 10^{-11}$ | komórka <sup>-1</sup> * dzień <sup>-1</sup> | Tempo stymulacji wytwarzania limfocytów T CD8+ jako rezultat interakcji komórek nowotworowych z krążącymi limfocytami |
| u              | $3 * 10^{-10}$   | komórka <sup>-2</sup> * dzień <sup>-1</sup> | Funkcja regulacyjna limfocytów T CD8+ nadzorowana przez komórki NK  |
| $\alpha$       | $7,5 * 10^8$     | komórka * dzień <sup>-1</sup>               | Stałe źródło krążących limfocytów   |
| $\beta$        | $1,2 * 10^{-2}$  | dzień <sup>-1</sup>                         | Naturalna śmierć i różnicowanie krążących limfocytów  |
| $\gamma$       | $9 * 10^{-1}$    | dzień <sup>-1</sup>                         | Tempo rozpadu leku chemioterapeutycznego  |
| $p_i$          | $1,25 * 10^{-1}$ | dzień <sup>-1</sup>                         | Maksymalna krzywa rekrutacji limfocytów T CD8+ przez interleukiny-2   |
| $g_i$          | $2 * 10^2$       | komórka <sup>2</sup>                        | stała   |
| $\mu_i$        | $1 * 10^1$       | dzień <sup>-1</sup>                         | Tempo rozpadu interleukiny-2 (leku)   |
| $C_{CTL}$      | $4,4 * 10^{-9}$  | komórka <sup>-1</sup> * dzień <sup>-1</sup> | Tempo dezaktywacji nowotworu przez limfocyty T CD8+   |
| $g'$           | 1,7              | dzień <sup>-1</sup>                         | Tempo rozpadu terapeutycznego interferonu- $\alpha$   |
| $j'$           | $3,3 * 10^{-9}$  | komórka <sup>-1</sup> * dzień <sup>-1</sup> | Tempo wchłaniania interleukiny-2 przez limfocyty T CD8+   |
| $k'$           | $1,8 * 10^{-8}$  | komórka <sup>-1</sup> * dzień <sup>-1</sup> | Dezaktywacja molekuł interleukiny-2 przez prostaglandyny  |
| $I_{\alpha 0}$ |                  | jednostki                                   | Początkowa ilość interferonu- $\alpha$  |

Tab. 3.1: Parametry modelu.

## 4. Symulacje

### 4.1 Brak leczenia

#### 4.1.1 Warunki początkowe

*Scenariusz I*

$$T(0) = 1 * 10^6$$

$$N(0) = 1 * 10^5$$

$$L(0) = 1 * 10^2$$

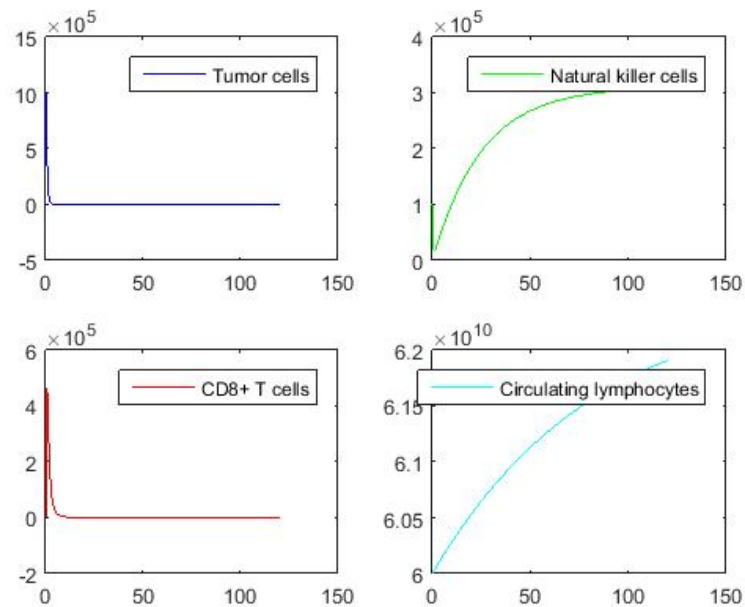
$$C(0) = 6 * 10^{10}$$

$$I(0) = 0$$

$$I_{\alpha}(0) = 0$$

$$M(0) = 0$$

Wynik symulacji przedstawiono na rys. 4.1



**Rys. 4.1:** Symulacja odpowiedzi układu immunologicznego na nowotwór, dla warunków początkowych: liczba komórek nowotworowych  $T(0) = 1 * 10^6$ , liczba komórek NK  $N(0) = 1 * 10^5$ , liczba limfocytów T CD8+  $L(0) = 1 * 10^2$ , liczba krążących limfocytów  $C(0) = 6 * 10^{10}$ .



*Scenariusz II*

$$T(0) = 1 * 10^6$$

$$N(0) = 1 * 10^3$$

$$L(0) = 1 * 10^1$$

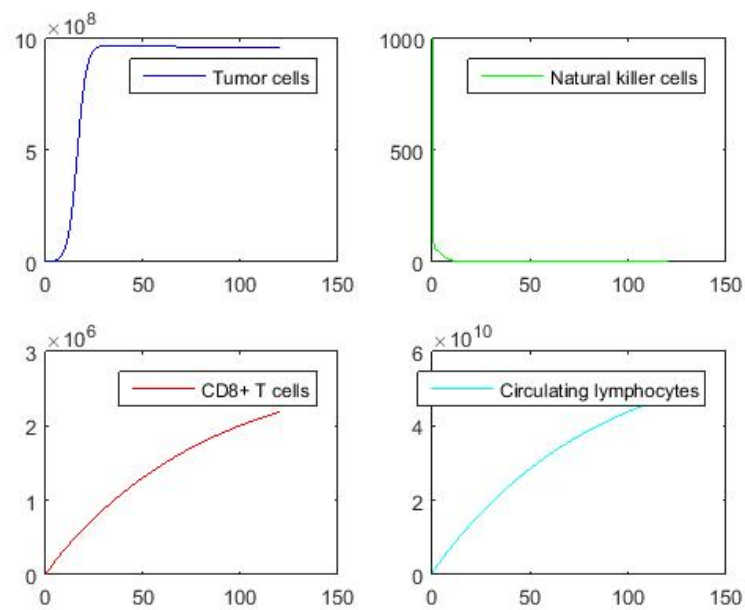
$$C(0) = 6 * 10^8$$

$$I(0) = 0$$

$$I_\alpha(0) = 0$$

$$M(0) = 0$$

Wynik symulacji przedstawiono na rys. 4.2



**Rys. 4.2:** Symulacja odpowiedzi układu immunologicznego na nowotwór, dla warunków początkowych: liczba komórek nowotworowych  $T(0) = 1 * 10^6$ , liczba komórek NK  $N(0) = 1 * 10^3$ , liczba limfocytów T CD8+  $L(0) = 1 * 10^1$ , liczba krążących limfocytów  $C(0) = 6 * 10^8$ .

## 4.2 Leczenie metodą immunoterapii

## 4.3 Leczenie metodą chemioterapii

## 4.4 Połączenie metod immunoterapii i chemioterapii

## 5. Rezultaty

## 6. Analiza wyników

## 7. Podsumowanie

# Bibliografia

- [1] Mustafa Mamat, Subiyanto i Agus Kartono, „Mathematical Model of Cancer Treatments Using Immunotherapy, Chemotherapy and Biochemotherapy”,
- [2] R. Tadeusiewicz, „Biocybernetyka. Metodologiczne podstawy dla inżynierii biomedycznej.”, PWN, 2013
- [3] Redaktor naukowy dr n. med. Janusz Meder, „Podstawy onkologii klinicznej”, Centrum Medyczne Kształcenia Podyplomowego w Warszawie, 2011
- [4] Ewelina Dymarska, „Czynniki modulujące układ immunologiczny człowieka”, Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, Zeszyty Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Witelona w Legnicy nr 19(2)/2016
- [5] Nadzieja Drela, „Immunologiczna teoria starzenia”, Wydział Biologii Uniwersytetu Warszawskiego, Instytut Zoologii, Zakład Immunologii, Warszawa, 23 kwietnia 2014
- [6] Marta Sochocka, Zofia Błach-Olszewska, „Mechanizmy wrodzonej odporności”, Laboratorium Wirusologii Instytutu Immunologii i Terapii Doświadczalnej Polskiej Akademii Nauk im L. Hirszfelda we Wrocławiu, Postępy Hig Med Dośw., 59: 250-258, 2005
- [7] Emilia Kolarzyk, „Wybrane problemy higieny i ekologii człowieka”, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 2008, wyd.1
- [8] Beata Tokarz-Deptuła, Tymoteusz Miller, Wiesław Deptuła, „Cytokiny z rodziny interleukiny-1”, Katedra Mikrobiologii i Immunologii, Wydział Nauk Przyrodniczych, Uniwersytet Szczeciński
- [9] „Chemioterapia, Immunoterapia i Terapia Celowana Informacje dla Pacjenta”, Centrum Onkologii Ziemi Lubelskiej im. św. Jana z Dukli, Lublin, 2011
- [10] Jacek Mackiewicz, Andrzej Mackiewicz, „Immunoterapia nowotworów i perspektywy jej rozwoju”, Zakład Immunologii Nowotworów, Katedra Biotechnologii Medycznej, Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, Wielkopolskie Centrum Onkologii w Poznaniu
- [11] Anna Świeboda-Sadlej, „Skojarzone leczenie nowotworów — współpraca chirurga i onkologa klinicznego w zakresie leczenia raka piersi, jelita grubego i płuca”, Klinika Hematologii, Onkologii i Chorób Wewnętrznych WUM