

Spis treści

1. Wprowadzenie	1
1.1 Streszczenie	1
1.2 Cel pracy	1
1.3 Układ pracy	2
2. Wstęp	3
2.1 Procesy nowotworowe	3
2.2 Budowa układu immunologicznego i jego znaczenie w procesie leczenia nowotworów	5
2.2.1 Komórki NK	7
2.2.2 Limfocyty typu T	9
2.2.3 Interleukiny	11
3. Leczenie nowotworów	14
3.1 Chemioterapia	14
3.2 Immunoterapia	16
3.2.1 Nieswoista bierna immunoterapia	18
3.2.2 Swoista bierna immunoterapia	18
3.2.3 Nieswoista czynna immunoterapia	18
3.2.4 Swoista czynna immunoterapia	19
3.3 Leczenie skojarzone	19
4. Model matematyczny	21
4.1 Założenia modelu	21
4.2 Model nieuwzględniający procesu leczenia	23
4.2.1 Równania i opis modelu	23
4.3 Model uwzględniający proces leczenia	26
4.3.1 Równania i opis modelu	26
5. Symulacje - brak leczenia	28
5.1 Scenariusz I – symulacja wykonana dla modelu nieleczzonego guza	30
5.2 Scenariusz II – symulacja wykonana dla modelu nieleczzonego guza	35
6. Symulacje - leczenie	39

7. Leczenie metodą chemioterapii – symulacje wykonane dla modelu leczonego guza	40
7.1 Scenariusz I – zmiana długości cyklu	41
7.2 Scenariusz II – zmiana dawki dozowanego cytostatyka	44
7.3 Scenariusz III – zmiana dawki dozowanego cytostatyka w kolejnych powtórzeniach cyklu	47
7.4 Scenariusz IV – zmiana liczby powtórzeń cyklu	49
7.5 Scenariusz V – zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii (dozowania cytostatyka)	52
8. Leczenie metodą immunoterapii – symulacje wykonane dla modelu leczonego guza	55
8.1 Scenariusz I – zmiana początkowej wielkości guza	56
8.2 Scenariusz II – zmiana dawki IL-2	58
8.3 Scenariusz III – zmiana dawki TIL	61
8.4 Scenariusz IV – zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2	63
8.5 Scenariusz V – zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii	65
9. Leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii	68
9.1 Scenariusz I – zmiana cech chemioterapii	69
9.1.1 Zmiana długości cyklu chemioterapii	70
9.1.2 Zmiana dawki dozowanego cytostatyka	72
9.1.3 Zmiana liczby powtórzeń cyklu chemioterapii	73
9.1.4 Zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii	74
9.2 Scenariusz II – zmiana cech immunoterapii	75
9.2.1 Zmiana dawki IL-2	76
9.2.2 Zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2 dla leczenia bez wykorzystania TIL	77
9.2.3 Zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2) dla leczenia bez wykorzystania TIL	78
9.3 Scenariusz III – zmiany dawki IL-2 konieczne dla uzyskania określonych wartości parametrów chemioterapii	79
9.4 Scenariusz IV – zmiany czasu wdrożenia poszczególnych terapii	81
9.5 Scenariusz V – porównanie stanu układu immunologicznego u różnych pacjentów	83
10. Rezultaty	86
11. Analiza wyników	87
12. Podsumowanie	88
13. Rozwój	89

14. Dodatek	94
14.1 Tabela skrótów	94

Spis rysunków

2.1	Podział limfocytów typu T [7].	10
5.1	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla wartości początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0) = 1 \cdot 10^6$. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 7$ dni (168 godzin).	29
5.2	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla wartości początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0) = 1.8 \cdot 10^7$. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 24$ dni (576 godzin) około wartości $9,8 \cdot 10^8$	31
5.3	Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni. Liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$	32
5.4	Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni. Długość promienia nowotworu [mm] w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$	33
5.5	Zmiany liczby komórek badanych populacji dla wartości początkowej liczby limfocytów krazacych $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 28$ dni (672 godziny) około wartości $9,8 \cdot 10^8$	36
5.6	Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji, która trwała $T_k = 120$ dni. Liczba komórek nowotworowych na koniec symulacji $T(120)$ w zależności od początkowej liczby krążących limfocytów $C(0)$	37
5.7	Wyniki otrzymane na koniec symulacji, która trwała $T_k = 120$ dni. Długość promienia nowotworu [mm] na koniec symulacji w zależności od początkowej liczby krążących limfocytów $C(0)$	38

Spis tabel

2.1	Mechanizmy obronne odporności nieswoistej i swoistej [7].	5
4.1	Parametry modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia.	25
4.2	Dodatkowe parametry modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia.	27
5.1	Warunki początkowe modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia.	28
5.2	Wartości parametrów modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia dla pacjenta 1. . .	28
5.3	Wyniki symulacji - brak leczenia, scenariusz I	30
5.4	Wyniki symulacji - brak leczenia, scenariusz II	35
6.1	Warunki początkowe dla modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia.	39
6.2	Wartości dodatkowych parametrów modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia. . .	39
7.1	Warunki początkowe modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia za pomocą chemioterapii.	40
7.2	Wyniki symulacji - chemioterapia, scenariusz I, zmiana długości cyklu .	42
7.3	Wyniki symulacji - chemioterapia, scenariusz II, zmiana dawki V_M dozowanego cytostatyka	45
7.4	Wyniki symulacji - chemioterapia, scenariusz III, zmiana dawki V_M dozowanego cytostatyka w kolejnych powtórzeniach cyklu	48
7.5	Wyniki symulacji - chemioterapia, scenariusz IV, zmiana liczby powtórzeń cyklu chemioterapii	50
7.6	Wyniki symulacji - chemioterapia, scenariusz V, zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii	53
8.1	Warunki początkowe modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia za pomocą immunoterapii.	55
8.2	Wyniki symulacji - immunoterapia, scenariusz I, zmiana wielkości guza w dniu rozpoczęcia immunoterapii	56

8.3	Wyniki symulacji - immunoterapia, scenariusz II, zmiana dawki V_I IL-2	59
8.4	Wyniki symulacji - immunoterapia, scenariusz III, zmiana dawki V_L TIL	62
8.5	Wyniki symulacji - immunoterapia, scenariusz IV, zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2 dla leczenia z wykorzystaniem TIL	64
8.6	Wyniki symulacji - immunoterapia, scenariusz V, zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2 lub TIL)	66
9.1	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana długości cyklu	70
9.2	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana dawki V_M dozowanego cytostatyka .	72
9.3	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana liczby powtórzeń cyklu chemioterapii	73
9.4	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii	74
9.5	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz II, zmiana dawki V_I IL-2	76
9.6	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz II, zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2 dla leczenia bez wykorzystania TIL	77
9.7	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz II, zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2) dla leczenia bez wykorzystania TIL	78
9.8	Warunki początkowe chemioterapii dla modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii.	79
9.9	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz III, zmiany dawki V_I IL-2 konieczne do uzyskania określonych warunków chemioterapii (9.8)	80
9.10	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz IV, zmiany czasu wdrożenia poszczególnych terapii	82
9.11	Warunki początkowe chemioterapii dla modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii - porównanie układu immunologicznego u różnych pacjentów.	83
9.12	Warunki początkowe immunoterapii dla modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii - porównanie układu immunologicznego u różnych pacjentów.	84
9.13	Parametry modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia - wartości.	84

9.14 Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz V, porównanie stanu układu immunologicznego u różnych pacjentów	85
14.1 Skróty wykorzystane w pracy	94

1. Wprowadzenie

1.1 Streszczenie

W pracy przedstawiono model opisujący odpowiedź układu immunologicznego na rozwijający się w organizmie nowotwór. Model ten oparty jest na modelu de Pillis [19]. Obejmuje on rozwój komórek nowotworowych w organizmie oraz odpowiedź układu immunologicznego – w tym, tak zwanych „naturalnych zabójców”, czyli komórek NK (ang. Natural Killer cells), limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących. Następnie model został poddany modyfikacji polegającej na uwzględnieniu procesu leczenia nowotworu skojarzonymi metodami chemioterapii (z użyciem leku cytostatycznego) i immunoterapii z użyciem pewnej grupy cytokin¹, tj. interleukin-2 (IL-2) oraz limfocytów naciekających nowotwór TIL (ang. Tumor Infiltrating Lymphocytes).

1.2 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 Cytokiny – białka o niskiej masie cząsteczkowej biorące udział w przekazywaniu informacji pomiędzy komórkami; odgrywają istotną rolę w odpowiedzi zapalnej, apoptozie, wzroście i różnicowaniu komórek [16].

1.3 Układ pracy

Praca składa się z następujących części:

- wstępu teoretycznego zawierającego informacje na temat rodzajów nowotworów i sposobów ich rozwoju 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]. Czasami (najczęściej w przypadku zmian zapalnych) naprzemiennie z pojęciem nowotwór, stosowane jest określenie guz [24]. W zdrowym organizmie występuje równowaga pomiędzy tempem podziałów komórkowych a utratą komórek. W przypadku nowotworu ginie mniej komórek niż przybywa [3]. W efekcie spontanicznej proliferacji komórek nowotworowych składająca się z nich struktura 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 [3].

Transformacja oznacza wielostopniowy proces, podczas którego komórki prawidłowe stają się złośliwe. Każdy etap tego procesu odpowiada zmianom genetycznym prowadzącym do zaburzeń wzrostu komórek prawidłowych [24].

Na powierzchni komórek nowotworowych pojawiają się zmienione albo obce antygeny, a także zanikają cząsteczki charakterystyczne komórek własnych organizmu. Zmiany te zazwyczaj są rozpoznawane przez układ odpornościowy, co umożliwia skuteczną walkę z komórkami nowotworowymi. Jednak rozwojowi nowotworu towarzyszą różne mechanizmy maskujące, które powodują nierozpoznawalność komórek złośliwie transformowanych, co pozwala na „ucieczkę” nowotworu przed układem immunologicznym. Na tym procesie skupia się immunoterapia, która jest jednym ze sposobów leczenia nowotworów [31].

Zachodzące zmiany genetyczne związane są z różnymi zmianami fizjologicznymi komórki, w szczególności z [24]:

- samowystarczalnością w wytwarzaniu sygnałów do wzrostu,
- niewrażliwością na inhibitory sygnałów wzrostu,
- unikaniem programowanej śmierci komórek,
- nieograniczonym potencjałem replikacyjnym,
- podtrzymywaniem angiogenezy,

- inwazją tkankową,
- przerzutami,
- unikaniem destrukcji immunologicznej.

Warto także zwrócić uwagę na zmiany systemów naprawy DNA oraz zmiany systemów regulujących podstawowe procesy komórkowe (na przykład wzrost, różnicowanie, apoptozę¹). Na skutek zmian systemów naprawczych dochodzi do szybkiej i dużej niestabilności genomu. Zmiany w systemach regulujących powodują natomiast powolny proces zaburzenia homeostazy komórki oraz stopniowo narastającą niestabilność genomu. Choroby nowotworowe w większości rozwijają się w tym drugim przypadku, dlatego od pojawienia się początkowej zmiany do klinicznego wykrycia guza mija zazwyczaj wiele lat [3].

Mechanizmy genetyczne leżące u podstaw wyżej wymienionych zmian fizjologicznych mogą różnić się między sobą dla poszczególnych nowotworów. Mimo to, zmiany fizjologiczne są wspólne dla większości nowotworów i odpowiadają zarówno za przeżycie, jak i ekspresję nowotworu [24].

¹ Apoptoza – śmierć programowana, śmierć samobójcza komórki zachodząca w warunkach fizjologicznych [12].

2.2 Budowa układu immunologicznego i jego znaczenie w procesie leczenia nowotworów

Na układ immunologiczny składają się mechanizmy odporności swoistej (nabytej) i nieswoistej (wrodzonej) [4, 5, 20]. Ich podział przedstawiono w Tab. 2.1. Mechanizmy odporności nabytej są aktywowane, gdy mechanizmy odporności wrodzonej nie zapobiegą wnikaniu lub nie usuną patogenu [20].

Odporność		Działanie obronne	
Nieswoista (wrodzona)	Humoralna	Lizozym	Bakterioliza bakterii Gram dodatnich, liza bakterii Gram-ujemnych po usunięciu warstwy liposacharydowej
		Laktoferyna	Pozbawienie bakterii dostępu do żelaza poprzez wiązanie go
		Transferyna	Pozbawienie bakterii dostępu do żelaza poprzez wiązanie go
		Białka ostrej fazy	Aktywacja limfocytów, makrofagów, dopełniacza na drodze klasycznej
		Dopełniacz	Uaktywnienie układu dopełniacza
		Interferony	Hamowanie transformacji limfocytów pod wpływem mitogenów
	Komórkowa	Fagocyty	Fagocytoza
		Eozynofile	Produkcja prostoglandyn PGE1 i PGE2, które hamują uwalnianie mediatorów przez komórki tuczne i bazofile
		Komórki K	Cytotoksyczność zależna od przeciwciał
		Komórki NK	Spontaniczne niszczenie komórek zakażonych wirusem
Swoista (nabyta)	Humoralna	Immunoglobuliny	
		Limfocyty typu B	
	Komórkowa	Limfocyty typu T	

Tab. 2.1: Mechanizmy obronne odporności nieswoistej i swoistej [7].

Zasadnicze znaczenie w odporności organizmu mają skóra, błony śluzowe, fagocyty, limfocyty typu T i B², komórki NK, przeciwciała oraz układ dopełniacza [28].

Układ dopełniacza wspiera mechanizmy wrodzonej odporności immunologicznej przez zabijanie drobnoustrojów za pośrednictwem lizy, chemotaksję komórek fagocytarnych oraz ułatwianie procesu fagocytozy. Układ dopełniacza (komplement) tworzy grupa około 40 białek, które zabezpieczają organizm przed atakiem drobnoustrojów. Komplement aktywowany jest kaskadowo (każdy kolejny składnik aktywuje następny).

² Limfocyty typu B – wyspecjalizowane komórki układu immunologicznego, których główna funkcja polega na wytwarzaniu przeciwciał [28].

Można wyróżnić trzy drogi aktywacji dopełniacza [13]:

- klasyczną,
- alternatywną,
- lektynową.

Klasyczna droga aktywacji komplementu zachodzi z udziałem swoistych immunoglobulin, które związane są z powierzchnią drobnoustrojów. Prowadzi ona do śmierci litycznej komórki docelowej (bakterioliza).

Znacznie szybsza jest droga alternatywna (properdynowa), ponieważ kształtuje się ona od momentu wniknięcia patogenu. W tym przypadku drobnoustroje ulegają spontanicznej opsonizacji³ przez cząsteczki C3b dopełniacza. Ułatwia to ich pochłanianie przez komórki fagocytarne.

Podczas lektynowej drogi aktywacji następuje połączenie cząsteczki cukru obecnej na powierzchni bakterii z lektyną wiążącą mannozę MBL (ang. Mannose Binding Lectin). Ta interakcja prowadzi do rozkładu czynników C2 i C4 układu dopełniacza.

Alternatywna droga aktywacji układu dopełniacza jest podstawowym mechanizmem wrodzonego układu odpornościowego. Organizm uruchamia kaskadę nieswoistych reakcji obronnych zanim pojawią się swoiste w stosunku do mikroorganizmu przeciwciała. Zapewnia to oszczędność czasu, ale alternatywna droga aktywacji oddziałuje także na własne tkanki, co ogranicza sprawne funkcjonowanie wielu regulatorów [13].

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 [4].

Odporność swoista rozpoznaje antygeny⁴ bardzo precyzyjnie. Jej ważnymi elementami są limfocyty typu T, limfocyty typu B, cytokiny oraz przeciwciała. Komórki te są zdolne do wytwarzania nieograniczonej liczby receptorów. Dodatkowo, jeśli dojdzie do ich kontaktu z antygenem wytwarza się pamięć immunologiczna [4], dzięki której przy ponownym zetknięciu komórki danego typu z odpowiednim antygenem wytwarzana odpowiedź immunologiczna jest szybsza i silniejsza [20]. W przypadku limfocytów typu T, typ odpowiedzi swoistej określany jest jako komórkowy (tj. związany z aktywnością komórek układu immunologicznego [13]), natomiast dla limfocytów typu B – humoralny (tj. związany z aktywnością immunoglobulin [13]).

³ Opsonizacja – proces ułatwiający fagocytozę [13].

⁴ Antygeny – związki wywołujące reakcje układu immunologicznego; najczęściej substancje wielocząsteczkowe, rozpoznawane swoiście poprzez powierzchniowe receptory limfocytów [20].

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 fagocytoza⁵.

Pomimo bardzo dużego znaczenia układu immunologicznego dla organizmu, wiele mechanizmów jego działania pozostaje jeszcze niewyjaśnionych [4].

Znaczącą rolę w oddziaływaniu układu immunologicznego na rozwijający się nowotwór pełnią:

- komórki NK,
- limfocyty T_{CD8+} ,
- interleukiny (IL).

W związku z ważną funkcją wyżej wymienionych komórek, ujęto je w opisywanym modelu, natomiast ich znaczenie opisano w dalszej części pracy.

2.2.1 Komórki NK

Swoją rolę w odpowiedzi immunologicznej mają także komórki NK (limfocyty NK), czyli limfocyty cytotoksyczne [30] stanowiące populację odrębną od limfocytów typu B i T [7]. Limfocyty NK stanowią około 10% limfocytów obecnych we krwi [5, 30, 31]. Ich zadaniem jest niszczenie komórek nowotworowych i zainfekowanych wirusami [5].

Komórki NK są szybkie i skuteczne w działaniu, ponieważ nie wymagają wcześniejszej immunizacji, by uruchomić reakcję immunologiczną [31].

Komórki NK to efektorowe komórki cytotoksyczne będące elementem odporności nieswoistej organizmu. Są to duże komórki limfoidalne posiadające umiejętność rozpoznawania wielu konfiguracji molekularnych występujących m.in. na komórkach własnych, zakażonych wirusem oraz komórkach nowotworowych [29].

Limfocyty NK identyfikowane są poprzez ekspresję antygeny powierzchniowego CD56 i jednoczesny brak ekspresji antygeny CD3, a także ekspresję receptorów CD16, CD56 oraz CD57. Na podstawie ilości receptora CD56 można wyróżnić dwie subpopulacje komórek NK [31, 32]:

- subpopulację komórek $NK_{CD56^{bright}CD16^{-}}$ o dużej ekspresji receptora CD56 oraz braku ekspresji receptora CD16, które wytwarzają dużą ilość cytokin i występują głównie w tkankach zmienionych chorobowo oraz węzłach chłonnych,

⁵ Fagocytoza – usuwanie kompleksów immunologicznych i uszkodzonych komórek (ułatwienie fagocytozy immunologicznej). Efektywne niszczenie drobnoustrojów przez fagocyty [13, 14].

- subpopulację komórek $NK_{CD56^{dim}CD16+}$ o umiarkowanej ekspresji receptora CD56 oraz znacznej ekspresji receptora CD16, które charakteryzują się wysoką cytotoksycznością i występują głównie we krwi obwodowej.

Istnieją liczne efektorowe mechanizmy cytotoksyczności służące komórkom NK do zabijania komórek zakażonych przez wirusy lub komórek nowotworowych. Mechanizmy cytotoksyczności podzielono na cytotoksyczność zależną od ziaren cytolitycznych i cytotoksyczność zależną od receptorów dla cząsteczek z rodziny TNF.

Komórki NK są aktywowane, gdy komórki docelowe wykazują ekspresję ligandów wiążących się do receptorów komórek NK [29].

Komórki NK mogą wykazywać ekspresję różnych receptorów, np. [29]:

- receptorów naturalnej cytotoksyczności NCRs (ang. Natural Cytotoxicity Receptors),
- lektyno-podobnych receptorów,
- receptorów aktywujących lub hamujących komórki NK.

Zmiany nowotworowe komórek własnych organizmu mogą być usuwane przez limfocyty NK bezpośrednio lub pośrednio (z udziałem innych komórek immunokompetentnych). Do mechanizmów bezpośrednich należy proces naturalnej cytotoksyczności, cytotoksyczności zależnej od przeciwciał oraz cytotoksyczności indukowanej. W mechanizmach pośrednich największe znaczenie mają interakcje dwukierunkowe komórek NK z komórkami dendrytycznymi, limfocytami typu B i T oraz makrofagami. W ich wyniku uwalniane są cytokiny, które równocześnie mobilizują komórki biorące udział w interakcji oraz pobudzają je do efektywnego niszczenia komórek nowotworowych [31].

Charakterystyczną cechą komórek NK jest brak posiadania markerów czy receptorów antygenowych na powierzchni. Działanie komórek NK opiera się na rozpoznawaniu przez receptor pektynowy reszt cukrowych, co umożliwia im cytotoksyczne zniszczenie komórki docelowej, między innymi nowotworowej. Z kolei receptor hamujący komórki typu „zabójcy” KIR (ang. Killer cells Inhibitory Receptor) zmniejsza aktywność komórek NK, jeśli rozpoznają one prawidłowe komórki organizmu [4].

Aktywacja komórek NK zależy od wypadkowego działania receptorów aktywujących i hamujących. Pozwala to uniknąć atakowania przez komórki NK niezmiennych komórek własnego organizmu. Cząsteczki MHC klasy I są głównymi regulatorami aktywności komórek NK. Cząsteczki te są obecne na każdej jądrzastej komórce organizmu, dzięki czemu możliwe jest rozpoznawanie zdrowych komórek. Obniżenie ekspresji cząsteczek MHC klasy I na komórkach nowotworowych umożliwia skierowanie przeciwko nim odpowiedzi komórek NK. Równocześnie, komórka NK musi otrzymać właściwy sygnał z receptorów aktywujących, aby docelowa komórka została zabita. Takimi receptorami w organizmie ludzkim są cząsteczki NKp30, NKp44, NKp46, CD16 oraz receptory należące do nadrodziny KIR. [30]. Pobudzone komórki NK wywołują lizę komórek nowotworowych lub indukują ich apoptozę [31].

Z wiekiem aktywność komórek NK spada (ze względu na zwiększoną liczbę receptorów KIR [5]), co zwiększa ryzyko śmierci spowodowanej ciężką infekcją. Niekorzystnymi czynnikami mającymi wpływ na układ komórek NK są: stres, niska aktywność fizyczna oraz dieta wysokotłuszczowa [4]. Silna aktywność cytotoksyczna komórek NK może być uznana za oznakę dobrego zdrowia [5].

2.2.2 Limfocyty typu T

Jedną z grup limfocytów są limfocyty typu T, które stanowią odrębny rodzaj komórek układu immunologicznego. Ich wyspecjalizowaną funkcją jest bezpośrednie atakowanie obcych antygenów, na przykład wirusów, grzybów. Pełnią także funkcję regulatorową w obrębie układu immunologicznego [28]. Limfocyty typu T wytwarzane są w szpiku kostnym [7], a na wczesnym etapie życia płodowego trafiają do grasicy (limfocyty grasiczozależne), gdzie dojrzewają. Następnie opuszczają grasicę i przebywają w różnych narządach układu odpornościowego, na przykład śledzionie, węzłach chłonnych, szpiku kostnym oraz krwi obwodowej [28].

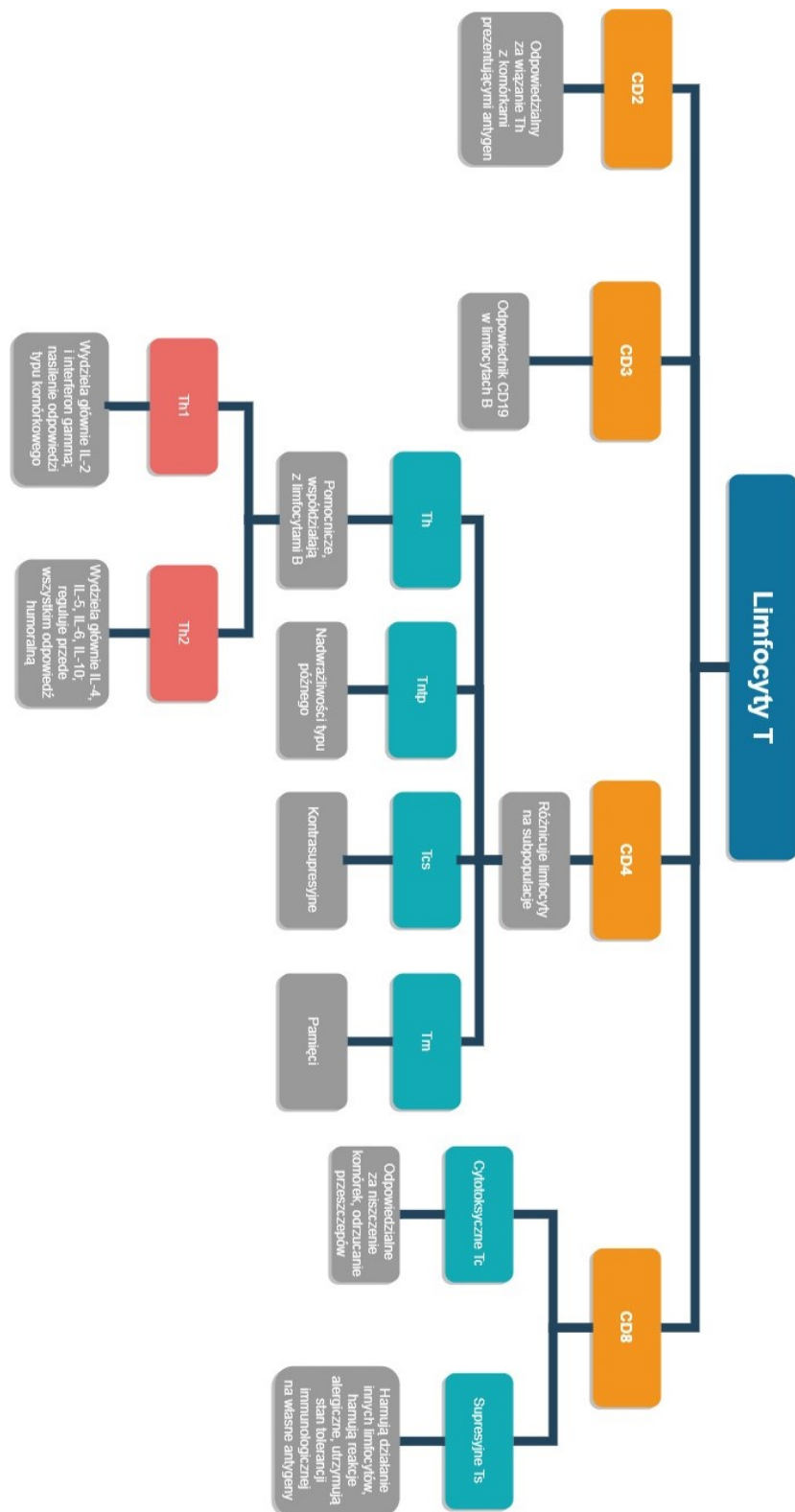
Limfocyty typu T oznaczane jako CD8+ dzielą się na limfocyty [7]:

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

Na Rys. 2.1, na pomarańczowych, niebieskich i różowych polach przedstawiono kolejne podziały limfocytów typu T występujących w organizmie. Dodatkowo, na polach szarych krótko opisano funkcję, jaką one pełnią lub wymieniono ich charakterystyczne cechy.

Podstawą procesów immunologicznych jest prezentacja antygenów przez odpowiednie komórki pomocniczym limfocytom Th. Klasyczne komórki prezentujące antygen APC (ang. Antigen Presenting Cells) to limfocyty typu B, komórki dendryczne oraz makrofagi. Natomiast, nieklasycznymi komórkami są limfocyty typu T, eozynofile, fibroblasty oraz keranocyty [7].

Odpowiedź immunologiczna swoista typu komórkowego, w którą zaangażowane są subpopulacje limfocytów typu 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, ale również spełnia ważną rolę w reakcji kontaktowej ze związkami chemicznymi, w 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 typu T. Z wiekiem głównie wzrasta liczba limfocytów CD4+, natomiast zmniejsza się liczba limfocytów supresorowych i cytotoksycznych CD8+ [4].



Rys. 2.1: Podział limfocytów typu T [7].

Komórki nowotworowe współdziałając z makrofagami TAMs M2 powodują immunosupresję⁶ układu immunologicznego. W początkowym etapie choroby można zaobserwować wzrost poziomu cytokin prozapalnych. Czynniki te hamują cytotoksyczną aktywność makrofagów. Komórki nowotworowe produkują również cytokiny (IL-10, IL-4) stymulujące polaryzację fenotypu w kierunku klasy M2. Makrofagi TAMs M2 wydzielają związki o działaniu przeciwzapalnym, czego efektem jest między innymi indukcja limfocytów T regulatorowych (T_{reg}) oraz supresja limfocytów T_{CD8+} [25]. Zwiększona ilość T_{reg} hamuje aktywność komórek NK, T_{CD4+} i T_{CD8+} , co przyczynia się do rozrostu nowotworu [27].

2.2.3 Interleukiny

Interleukiny są jedną z grup cytokin, która służy, między innymi do komunikacji pomiędzy komórkami układu odpornościowego. Komórki te dotyczą zarówno odporności wrodzonej, jak i nabytej. Interleukiny to białka produkowane głównie przez leukocyty.

Ze względu na cechy biologiczne, w tym różnice w budowie molekularnej i strukturze, interleukiny zostały zgrupowane w trzy rodziny [8]:

- pierwszą – podzieloną na podrodzinę interleukiny-2 i podrodzinę interferonów (reprezentowaną przez interferon- α i interferon- β),
- drugą – rodzinę interleukiny-1,
- trzecią – zawierającą interleukinę 17A, B, C, D, F oraz IL-8, 25 i 27, a także IL-31, 32 i 33.

Największe znaczenie wśród interleukin ma IL-2 stymulująca proliferację komórek NK i wzmagająca działanie cytotoksyczne. Poza IL-2, aktywność komórek NK jest stymulowana również przez: IL-12, IL-18, IL-21, IFN- α , IFN- β oraz IFN- γ . Kolejną ważną interleukiną jest IL-15 odpowiedzialna za różnicowanie i cytotoxiczną aktywność dojrziałych komórek NK. IL-15 ma wpływ na właściwości lityczne komórek NK i może mieć znaczenie w immunoterapii nowotworów.

Bardzo istotna dla odpowiedzi immunologicznej jest interakcja komórek NK z DC, która zależy od działania IL-2, IL-12, IL-15, IL-18 oraz IL-4. Cytokiny te uwalniane są w miejscu rozwoju odpowiedzi zapalnej zachodzącej z udziałem komórek NK [32].

IL-2 i IL-15 są najlepiej poznanymi naturalnymi stymulatorami komórek NK. Wzmacniają one aktywność efektorową oraz pobudzają proliferację komórek NK. IL-2 stymuluje także regulatorowe i pomocnicze limfocyty typu T. Natomiast IL-15 wspomaga rozwój limfocytów typu T pamięci, równocześnie będąc niezbędnym czynnikiem w utrzymaniu homeostazy komórek NK [31].

⁶ Immunosupresja – stan charakteryzujący się osłabieniem bądź zahamowaniem odpowiedzi immunologicznej; dotyczy zarówno odpowiedzi typu humoralnego, jak i komórkowego. Wiąże się ze zmiennymi niedoborami poszczególnych klas przeciwciał (IgG, IgM, IgA) oraz spadkiem liczby i dysfunkcją komórek układu odpornościowego, głównie limfocytów T, ujawniającym się zahamowaniem wytwarzania cytokin [26].

IL-2 zidentyfikowano po raz pierwszy jako czynnik wzrostu komórek T TCGF (ang. T Cell Growth Factor). Najważniejszymi komórkami wytwarzającymi IL-2 są limfocyty T_{CD4+} , niektóre limfocyty T_{CD8+} oraz komórki NK aktywowane antygenem czy mitogenem. IL-2 jest produkowana także przez komórki nowotworowe niektórych chłoniaków. IL-2 działa endokrynnie na komórki wykazujące ekspresję jej receptora błonowego oraz autokrynnie na komórki, które ją wytwarzają. W procesie odpowiedzi immunologicznej, IL-2 ma za zadanie modulować układ immunologiczny oraz brać udział w mechanizmach odpornościowych w przypadku zakażeń i nowotworów.

IL-2 jest podstawowym czynnikiem proliferacji komórek efektorowych: aktywowanych limfocytów typu T, limfocytów T_{CD4+} i limfocytów T_{CD8+} . Zwiększa ich czas przeżycia oraz efektywność działania. Pod wpływem IL-2 działają także komórki NK, są aktywowane i stymulowane do wydzielania szeregu cytokin. IL-2 oddziałuje również, pośrednio i bezpośrednio, na inne komórki układu odpornościowego, np.: limfocyty typu B, makrofagi lub monocyty [34].

IL-2, wytwarzana przez limfocyty pomocnicze T_{H1} , wspomaga nabytą odpowiedź immunologiczną, podtrzymując proliferację i zwiększając aktywność limfocytów typu T_C i B oraz komórek NK. Dodatkowo, jest odpowiedzialna za indukcję apoptozy komórek aktywowanych i pełni kluczową rolę w powstawaniu limfocytów regulatorowych typu T (T_{reg}) oraz utrzymywaniu ich liczby w organizmie. Bierze również udział w regulacji odpowiedzi immunologicznej i jej wygaszaniu.

IL-2 jest niezbędnym czynnikiem w aktywacji i pobudzeniu proliferacji cytotoksycznych limfocytów T_{CD8+} . Wzmaga także cytotoksyczność limfocytów CTL i komórek NK. IL-18 i IL-21 aktywują komórki NK i limfocyty CTL, stymulując równocześnie ich cytotoksyczność [15].

W 1992 roku Agencja żywności i leków FDA (ang. Food and Drug Administration) wydała zgodę na zastosowanie IL-2 podczas leczenia raka nerki i czerniaka, mimo pojawiającego się ryzyka ciężkiej toksyczności mogącej prowadzić nawet do zgonu. Ponadto, IL-2 wykazuje krótki okres półtrwania in vivo oraz może stymulować rozwój nowotworu poprzez utrzymanie pomocniczych limfocytów regulatorowych typu T i promowanie śmierci komórek indukowanej aktywacją AICD (ang. Activation-Induced Cell Death) limfocytów efektorowych typu T.

Aby zapobiec niepożądanym efektom, zaprojektowano IL-2 - „superkinę” posiadającą zwiększone powinowactwo do IL-2R β . Dzięki niej wspomagana jest proliferacja limfocytów cytotoksycznych typu T bez wpływu na liczbę limfocytów regulatorowych typu T oraz wzmocniona zostaje odpowiedź przeciwnowotworowa.

Obecnie testuje się niską dawkę IL-2 w formie monoterapii, jak i w połączeniu z adaptywnym transferem komórek NK i limfocytów typu T jako szczepionki. Badania [31] potwierdziły także przeciwnowotworowe działanie IL-15. Wykazano zwiększenie liczby komórek NK i limfocytów typu T cytotoksycznych [31].

IL-6 jest cytokiną o znaczącej roli w rozwoju zespołu wyniszczenia. Wytwarzana jest przez makrofagi, monocyty, fibroblasty, komórki śródbłónka oraz niektóre komórki nowotworowe. IL-6 to jeden z najsilniejszych stymulatorów białek ostrej fazy o działaniu prozapalnym. Jej wzmożone wytwarzanie występuje podczas przebiegu licznych ostrych

i przewlekłych zapaleń oraz w czasie przebiegu nowotworów. Innymi prozapalnymi cytokinami są m. in.: czynnik martwicy guza alfa TNF_α (ang. Tumor Necrosis Factor α), IL-1, IL-2, IFN- α oraz IFN- γ [3].

Warto wspomnieć, że IL-2, IL-6 i interferony mają właściwości depresyjne [21].

3. Leczenie nowotworów

Leczenie pacjentów, u których wystąpił nowotwór ma na celu osiągnięcie najkorzystniejszego efektu przeciwnowotworowego, ale także zapewnienie choremu jak najlepszej jakości życia. U wielu pacjentów wskutek choroby nowotworowej dochodzi do jej pogorszenia, a jedną z najczęstszych dolegliwości jest osłabienie, które może być równocześnie podstawowym objawem zespołu przewlekłego zmęczenia (ZPZ). ZPZ jest powodem ograniczenia codziennej aktywności u ponad 80% [38] pacjentów z nowotworami, gdzie objawy dotyczą nie tylko sfery fizycznej, lecz również psychicznej i socjalnej. ZPZ powoduje m. in. pogorszenie zdolności koncentracji uwagi, pacjenci zmuszeni są do ograniczenia lub rezygnacji z aktywności zawodowej, co pogarsza ich status ekonomiczny. Zazwyczaj chorzy nie znajdują zrozumienia wśród otoczenia, także wśród osób sprawujących nad nimi specjalistyczną opiekę. Większość onkologów (61% [38]) uważa, że ból towarzyszący chorobie nowotworowej jest najważniejszą dolegliwością u chorych, podczas gdy większość pacjentów (61% [38]) uważa osłabienie za istotniejszą dolegliwość.

Pierwsze objawy ZPZ pojawiają się najczęściej przy rozpoczęciu leczenia, jednak często występują już podczas badań diagnostycznych. U pacjentów poddawanych chemioterapii objawy nasilają się od momentu dożylnego podania cytostatyku, osiągając maksymalne natężenie po 2-3 dniach, następnie stopniowo się zmniejszają.

Ponad 30% chorych odczuwa osłabienie nawet pół roku po zakończeniu chemioterapii, a objawy ZPZ mogą utrzymywać się czasem nawet do 3 lat [38].

3.1 Chemioterapia

Chemioterapia to metoda leczenia, która polega na niszczeniu komórek nowotworowych, drobnoustrojów oraz bakterii za pomocą środków chemicznych. W przypadku nowotworów, stosuje się różne grupy leków, tzw. cytostatyków. Zależnie od indywidualnych cech pacjenta chemioterapia ma ściśle określony przebieg. Leki mogą być stosowane w monoterapii (stosowanie jednego leku cytostatycznego) lub polichemioterapii (stosowanie kilku leków zgodnie z określonym schematem). Leki cytostatyczne podawane są w sekwencjach co kilka dni, tygodni lub stale, bez przerwy w leczeniu. Leki cytostatyczne działają w określonych fazach podziału komórek nowotworowych, zmniejszając lub spowalniając ich proliferację. Najczęściej podawane są w postaci dożylnych wlewów, lecz niektóre z nich mają formę tabletek. Skutki uboczne chemioterapii można zaobserwować już po kilku dniach terapii, a czasem nawet po kilku godzinach [9].

Około 10% [3] nowotworów złośliwych można pokonać stosując wyłącznie chemioterapię. Do nowotworów tych można zaliczyć m. in. ostre białaczki u dzieci, raka ko-

smówki oraz większość litych nowotworów u dzieci [3].

Działanie cytostatyków opiera się na hamowaniu podziałów komórkowych limfocytów typu B i T. Część leków działa niezależnie od fazy cyklu komórkowego, podczas gdy niektóre leki są aktywne wyłącznie w danej fazie. U pacjentów z nowotworami stosuje się większe dawki niż w przypadku chorób autoimmunizacyjnych. Ze względu na mechanizm działania, leki cytostatyczne można podzielić na [26]

- leki alkilujące,
- antymetabolity,
- antybiotyki cytotoksyczne.

W chorobach nowotworowych często stosuje się pochodne iperytu azotowego będące składnikami leków o działaniu alkilującym. Ich szczególnie korzystne działanie można zaobserwować w terapii u dzieci [26].

Duże znaczenie w chemioterapii ma objętość guza, ponieważ jej skuteczność zależy od początkowej liczby komórek klonogennych reprezentowanej przez objętość, a nie średnicę guza. Im mniejszy jest nowotwór, tym bardziej wrażliwy na leczenie cytostatyczne. Z kolei, im większy guz, tym więcej razy należy podać leki w celu zmniejszenia jego masy. Wzrost dawki leku cyklo-specyficznego (niezależnego od fazy cyklu komórkowego) powoduje zwiększenie efektu cytotoksycznego. W tej grupie leków istnieje zależność liniowa między efektem i dawką, natomiast dla leków zależnych od fazy cyklu zależność ta występuje tylko do określonej granicy. Po jej przekroczeniu, mimo zwiększania dawki, efekt cytotoksyczny nie zwiększa się.

W chemioterapii zazwyczaj stosowane są programy wielolekowe, gdyż tylko bardzo wrażliwe nowotwory poddają się leczeniu z wykorzystaniem pojedynczego leku. W programach tych kojarzy się leki aktywne o różnym mechanizmie działania i odmiennej toksyczności oraz pozbawione wzajemnej oporności krzyżowej. Leki powinny być stosowane zgodnie z właściwym rytmem, tzn. przerwy powinny być możliwie krótkie, ale powinny umożliwiać pełną odnowę najbardziej wrażliwych tkanek prawidłowych. Stosowanie przerw pomiędzy kolejnymi etapami chemioterapii jest uzasadnione tym, że dynamika wzrostu komórek nowotworowych jest mniejsza niż szybko wzrastających komórek prawidłowych. Kombinacje obejmujące więcej niż trzy leki tworzą ryzyko wystąpienia nieobliczalnych wzajemnych interakcji, dlatego tak złożone programy są w chemioterapii wyjątkami [3].

Największym ograniczeniem skuteczności leczenia metodą chemioterapii jest oporność na leki. Istnieją liczne mechanizmy oporności, która często zależy od interakcji kilku z nich. Można wyróżnić mechanizmy: komórkowe, biochemiczne oraz anatomiczne [3]. Aby chemioterapia była skuteczna, proces docelowy musi być wrażliwy na aktywną formę leku. Jednym z mechanizmów powstawania oporności na lek jest obniżenie tej wrażliwości w populacji komórek nowotworowych [12]. Glikoproteina CD133 pomaga zidentyfikować macierzyste komórki nowotworowe, jednak prawdopodobnie odpowiada ona równocześnie za zwiększenie oporności nowotworów na chemioterapię [37].

W efekcie toksycznego działania chemioterapii u osób chorych na nowotwór może wystąpić ból neuropatyczny. Jest to rodzaj bólu patologicznego rozwijającego się wskutek uszkodzenia lub choroby somatosensorycznej części układu nerwowego. Najczęstszym zespołem bólowym wywołanym przez chemioterapię w leczeniu choroby nowotworowej jest obwodowa polineuropatia CIPN (ang. Chemotherapy-Induced Peripheral Neuropathy). Może ona wywoływać dolegliwości bólowe w istotnym stopniu obniżające jakość życia pacjentów. Obwodowa neuropatia może być objawem wielu stosowanych w chemioterapii leków, m. in. pochodnych platyny, paklitakselu czy bortezomibu. Leki te oddziałują na włókna nerwowe zmieniając amplitudę potencjału czynnościowego oraz szybkość przewodzenia w aksonach, czego ostatecznym efektem jest ból neuropatyczny.

W przypadku pochodnych platyny, uszkodzenie oraz martwica komórek spowodowane są poprzecznymi wiązaniami nici DNA. Ból zazwyczaj występuje kilka tygodni po rozpoczęciu chemioterapii, a czasem utrzymuje się nawet przez kilka miesięcy po jej zakończeniu. Na początku są to ból i parestezje¹ części kończyn. Mogą one ulec nasileniu wraz z objawami ataksji² czuciowej. Objawom tym mogą towarzyszyć w ostrym okresie neurotoksyczności skurcze mięśni. Czasem może pojawić się objaw Lhermitte’a³ i zaburzenia czynności ośrodkowego układu nerwowego takie, jak: bóle głowy, drgawki, encefalopatia, ubytki neurologiczne [36].

3.2 Immunoterapia

Podczas immunoterapii dochodzi do ingerencji w układ odpornościowy, co ma na celu wzmocnienie lub modyfikację mechanizmów obronnych walczących z nowotworem [10, 27, 31]. Jeżeli nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie komórek nowotworowych, to immunoterapia ma za zadanie czasowe zahamowanie rozwoju nowotworu oraz wstrzymanie przerzutów. Cel ten można osiągnąć poprzez zwiększenie aktywności układu immunologicznego lub przez zahamowanie supresyjnego działania nowotworu [27].

Leczenie immunoonkologiczne jest mniej inwazyjne niż stosowane przed jego poznaniem metody chirurgiczne, chemioterapia czy radioterapia, które często przynoszą większe szkody dla organizmu skutkiem działań ubocznych niż uzyskane efekty lecznicze. Podstawą immunoterapii są następujące działania [27]:

- wykrywanie przez układ odpornościowy komórek nowotworowych jako obce dla organizmu dzięki antygenom swoistym dla nowotworu TSA (ang. Tumor Specific Antigens),

¹ Parestezje – objawy nadmiarowe, zespół nietypowych wrażeń czuciowych w postaci mrowienia, drętwienia, uczucia przebiegających prądów, wibracji czy nawet pieczenia [39].

² Ataksja – bezład lub niezdolność kończyn i tułowia, zespół występujących jednocześnie różnych zaburzeń ruchu wynikających z braku właściwej koordynacji skurczu mięśni kończyn i tułowia w czasie ruchu lub postawy, takich jak dysmetria, dekompozycja ruchu, drżenie czy dysdiadochokineza [40].

³ Objaw Lhermitte’a – uczucie przechodzenia „prądu elektrycznego” w dół kręgosłupa przy pochyleniu głowy [36].

- selektywne niszczenie zidentyfikowanych komórek nowotworowych przy jednoczesnym zachowaniu komórek prawidłowych.

Często w immunoterapii wykorzystuje się komórki NK ze względu na ich kluczową rolę w walce ze złośliwie transformowanymi komórkami [31].

Na początku rozwoju immunoterapii stosowano terapię cytokinami lub terapię adaptatywną komórkami ukierunkowaną na komórki nowotworowe bez angażowania układu odpornościowego leczonego pacjenta. Później posługiwano się „aktywną immunoterapią nowotworów” mającą na celu wzmożenie reaktywności immunologicznej pacjenta, jednak efektywność leczenia była bardzo mała. Kolejnym etapem było wykorzystanie swoistych przeciwciał, które miały za zadanie zmieniać część białych krwinek nowotworowych w komórki NK, aby niszczyć komórki nowotworowe, ale równocześnie pobudzać układ immunologiczny [27].

Pewnym postępowaniem w immunoterapii było opracowanie sposobu otrzymywania modyfikowanych cytotoksycznych limfocytów T, które wykazują ekspresję chimerycznych receptorów dla specyficznych antygenów nowotworowych CARs (ang. Chimeric Antigen Receptors). W błonie limfocytów cytotoksycznych receptor chimeryczny połączony jest z regionami sygnałowymi zdolnymi do aktywowania tych limfocytów. Limfocyty cytotoksyczne z ekspresją CARs potrafią wydelać IL-2 powodując liżę komórek nowotworowych posiadających odpowiedni antygen nowotworowy. Ponadto, w przypadku aktywacji z wykorzystaniem CARs nie jest konieczna prezentacja antygeny przez komórki prezentujące antygen [41].

Immunoterapia adoptywna jest strategią leczenia polegającą na modyfikacji komórek autologicznych układu odpornościowego pacjenta poza jego organizmem, a następnie podaniu mu ich w formie „szczepionki”. W adoptywnej immunoterapii wykorzystywane są komórki zabójcze aktywowane limfokina LAK (ang. Lymphokine Activated Killers), TIL oraz komórki dendrytyczne DC (ang. Dendritic Cells). Komórki LAK uzyskiwane są jako efekt stymulacji limfocytów interleukiną-2 i następnie namnażane. Limfocyty TIL mogą zostać podane z powrotem choremu po transfekcji genami TNF lub IL-2. Komórki DC są jednymi z najbardziej efektywnych komórek prezentujących antygen. Wytwarza się je w hodowli komórkowej, często z monocytów autologicznych krwi obwodowej i po stymulacji cytokinami i uczuleniu antygenami nowotworowymi podaje się je zwrotnie pacjentowi. W immunoterapii adoptywnej należy każdorazowo opracować procedury pozyskania i modyfikacji komórek pacjenta. Najwięcej trudności pod tym względem stwarzają wysoce zindywidualizowane komórki DC [41].

Skuteczność leczenia metodą immunoterapii jest zależna od istnienia różnych mechanizmów niszczenia komórek nowotworowych oraz różnych swoistych dla nich markerów powierzchniowych, które mogą się zmieniać. Za niszczenie kontroli immunologicznej nowotworzenia odpowiadają limfocyty regulatorowe $T_{reg}FoxP3+$ będące tym samym jedną z najważniejszych barier w działaniu immuno-onkologicznym [27].

Największe korzyści z immunoterapii mogą odnieść pacjenci, których nowotwory charakteryzują się największą liczbą mutacji somatycznych, ponieważ liczba ta zależy od intensywności oddziaływania czynników rakotwórczych [41].

Immunoterapię można podzielić na bierną i czynną o charakterze swoistym albo nieswoistym [10].

3.2.1 Nieswoista bierna immunoterapia

Nieswoista bierna immunoterapia ma za zadanie wywołać nieswoistą aktywację układu immunologicznego, a w konsekwencji działanie przeciwnowotworowe na skutek podawania m.in. aktywowanych komórek efektorowych. Wykorzystuje się tu, na przykład cytokiny czy komórki LAK. Aby wywołać efekt biologiczny konieczne jest połączenie cytokiny ze swoistym receptorem na komórkach docelowych (limfocytach typu T i B, komórkach NK, monocytach, makrofagach i granulocytach). Działanie przeciwnowotworowe cytokin polega na:

- bezpośrednim efekcie cytotoksycznym,
- modyfikacji migracji limfocytów,
- wzroście wrażliwości komórek nowotworowych na efekty cytotoksyczne różnych czynników biologicznych lub chemicznych,
- hamowaniu proliferacji komórek nowotworowych,
- aktywacja komórek NK.

IFN- α to pierwsza rekombinowana cytokina zarejestrowana do stosowania klinicznego [10].

3.2.2 Swoista bierna immunoterapia

Swoista bierna immunoterapia to metoda leczenia nowotworu, która polega na podawaniu pacjentowi m.in. komórek efektorowych swoście ukierunkowanych na daną komórkę nowotworową. Do swoistej biernej immunoterapii zaliczamy [10]:

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

3.2.3 Nieswoista czynna immunoterapia

W nieswoistej czynnej immunoterapii 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. mikroorganizmy, elementy ściany komórkowej) i immunomodulatory (m. in. wyciągi z grasicy, syntetyczne hormony grasicy, tuftsyna, enkefaliny, endorfiny, wyciągi z limfocytów) [10].

3.2.4 Swoista czynna immunoterapia

Leczenie metodą swoistej czynnej 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, na bazie białek szoku cieplnego HSP (ang. Heat Shock Protein), szczepionki DNA oraz szczepionki wirusowe,
- komórkowe, niemodyfikowane i modyfikowane genetycznie oraz komórki DC „karmione” antygenami nowotworowymi [10].

3.3 Leczenie skojarzone

Leczenie skojarzone polega na połączeniu u pacjenta kilku metod leczenia nowotworu. Ten sposób terapii posiada wiele zalet, między innymi umożliwia wykonanie zabiegu operacyjnego w wielu przypadkach pierwotnie nieoperacyjnych i pozwala zastąpić okaleczające zabiegi chirurgiczne równie skutecznym leczeniem zachowawczym. Ponadto, zmniejsza ryzyko wznowy miejscowej choroby i rozwoju odległych przerzutów, co wpływa na wydłużenie czasu przeżycia chorych. Pomimo wielu zalet, leczenie skojarzone ma również pewne wady, chociażby, znaczne zwiększenie toksyczności w porównaniu z monoterapią czy brak współpracy między specjalistami, co z kolei utrudnia wdrożenie optymalnej terapii.

Wśród metod leczenia skojarzonego można wyróżnić [11]:

- leczenie sekwencyjne – poszczególne metody lecznicze stosowane jedna po drugiej, 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. 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 oraz napromienianie śródoperacyjne;

- leczenie naprzemienne — dotyczy kojarzenia radioterapii i chemioterapii.

W tej pracy omawiany jest przypadek leczenia skojarzoną metodą chemioterapii i immunoterapii, zwanej także biochemioterapią [1].

4. Model matematyczny

Model matematyczny wykorzystany w pracy to model de Pillis [19]. Został on zaimplementowany przy pomocy programu MATLAB w wersji R2020a.

4.1 Założenia modelu

W pierwszym etapie rozważamy model [19] bez uwzględnienia procesu leczenia, który obejmuje cztery populacje komórek, tj.:

- \mathcal{T} – populację komórek nowotworowych,
- \mathcal{N} – populację komórek NK,
- \mathcal{L} – populację limfocytów T_{CD8+} ,
- \mathcal{C} – populację limfocytów krążących,

W drugim etapie rozważany jest model [19] uwzględniający proces leczenia i dodatkowo badane są zmiany stężenia w czasie podawanych leków:

- $M(t)$ – funkcja stężenia cytostatyka użytego w chemioterapii w czasie,
- $I(t)$ – funkcja stężenia interleukin-2 użytych w immunoterapii w czasie.

W równaniach modelu w pierwszym etapie uwzględniono takie czynniki, jak:

- naturalny rozwój i śmierć komórek,
- śmierć komórek nowotworowych pod wpływem komórek NK, limfocytów T_{CD8+} ,
- wytwarzanie komórek NK i limfocytów T_{CD8+} ,
- dezaktywację komórek NK i limfocytów T_{CD8+} .

Natomiast w drugim etapie wzięto pod uwagę również:

- dawki podawanych leków i schemat ich podawania,
- śmierć komórek nowotworowych pod wpływem podawanych leków.

Przyjęto założenia jak w modelu de Pillis [19]:

1. W przypadku braku odpowiedzi układu immunologicznego liczba komórek nowotworowych wzrasta logistycznie.
2. Komórki NK i limfocyty T_{CD8+} są zdolne zniszczyć komórki nowotworu.
3. Pod wpływem komórek nowotworowych komórki NK i limfocyty T_{CD8+} ulegają szybszej proliferacji oraz wzrasta ich aktywność cytolityczna¹.
4. Komórki NK są zawsze obecne w organizmie, także w przypadku braku występowania komórek nowotworowych. Są one częścią wrodzonego układu odpornościowego.
5. W organizmie występuje duża liczba aktywnych limfocytów T_{CD8+} tylko w przypadku obecności komórek nowotworowych jako specyficzna odpowiedź immunologiczna.
6. Komórki NK i limfocyty T_{CD8+} ulegają całkowitej dezaktywacji po pewnej liczbie interakcji z komórkami nowotworowymi.
7. Poziom krążących limfocytów może służyć do oceny zdrowia pacjenta.
8. Odsetek komórek nowotworowych zniszczonych w wyniku chemioterapii zależy od ilości cytostatyka obecnego w organizmie. Maksymalny odsetek zniszczonych komórek wynosi mniej niż 1 ze względu na to, że pokonanie komórek nowotworowych wskutek chemioterapii jest możliwe tylko na niektórych etapach ich rozwoju.
9. Część komórek NK, limfocytów T_{CD8+} i limfocytów krążących jest niszczone podczas chemioterapii.
10. Komórki NK i limfocyty T_{CD8+} uczestniczą w procesie stymulacji i eliminacji aktywowanych komórek (efektorów); uproszczony model ma odzwierciedlać samoregulujący się charakter układu immunologicznego.

¹ Aktywność cytolityczna – jeden z mechanizmów cytotoksyczności limfocytów służący do niszczenia komórek zainfekowanych lub nowotworowych [15].

4.2 Model nieuwzględniający procesu leczenia

Przyjęto założenia dla modelu jak w rozdziale 4.1.

4.2.1 Równania i opis modelu

W modelu nieleczzonego guza rozważamy cztery populacje komórek. Są to populacja komórek nowotworowych (\mathcal{T}), populacja komórek NK (\mathcal{N}), populacja limfocytów T_{CD8+} (\mathcal{L}) oraz populacja limfocytów krążących (\mathcal{C}).

Model nieleczzonego guza nowotworowego 4.1 jest układem równań różniczkowych zwyczajnych. Równania tego modelu przedstawiają tempo zmian proliferacji komórek nowotworowych oraz tempo zmian liczby komórek układu immunologicznego (komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących) w odpowiedzi na wzrost liczby komórek nowotworowych.

Parametry modelu nieleczzonego guza 4.1, ukazano w tabeli 4.1.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{dt} = aT(1 - bT) - cNT - DT, \\ \frac{dN}{dt} = eC - fN + g \frac{T^2}{h + T^2} N - pNT, \\ \frac{dL}{dt} = -mL + j \frac{D^2 T^2}{k + D^2 T^2} L - qLT + (r_1 N + r_2 C)T - uNL^2, \\ \frac{dC}{dt} = \alpha - \beta C, \end{array} \right. \quad (4.1)$$

gdzie:

- $T(t)$ - liczba komórek nowotworowych w chwili czasowej t ,
- $N(t)$ - liczba komórek NK w chwili czasowej t ,
- $L(t)$ - liczba limfocytów T_{CD8+} w chwili czasowej t ,
- $C(t)$ - liczba limfocytów krążących w chwili czasowej t ,
- $D = d \frac{(\frac{L}{T})^l}{s + (\frac{L}{T})^l}$ - liza nowotworu pod wpływem działania limfocytów T_{CD8+} .

Pierwsze z równań modelu 4.1 opisuje tempo zmian $\frac{dT}{dt}$ liczby komórek nowotworowych, w chwili czasowej t , uwzględniając zarówno proces proliferacji tych komórek, jak i efekt cytotoksyczności wywołany odpowiedzią układu immunologicznego.

Wyrażenie $aT(1 - bT)$ zwiększa prędkość zmian liczebności populacji komórek nowotworowych, gdyż określa liczbę komórek nowotworowych, które powstały w danej chwili czasowej t w wyniku ich proliferacji. Wyrażenia $-cNT$ oraz $-DT$ z kolei hamują tempo zmian liczebności komórek nowotworowych, gdyż przedstawiają odpowiednio: liczbę komórek nowotworowych zniszczonych na skutek ich interakcji z komórkami NK oraz z limfocytami T_{CD8+} w danej chwili czasowej t .

Drugie równanie modelu 4.1 określa tempo zmian $\frac{dN}{dt}$ liczebności populacji komórek NK, w chwili czasowej t , na które wpływa kilka składników.

Składniki $g\frac{T^2}{h + T^2}N$ oraz eC wpływają na zwiększenie prędkości zmian liczby komórek NK. Pierwszy z nich oznacza liczbę nowych komórek NK powstałych w chwili czasowej t , natomiast drugi określa liczbę komórek NK, które wyodrębniły się z limfocytów krążących w chwili czasowej t . Do czynników hamujących tempo zmian liczebności populacji komórek NK należą $-fN$, ponieważ oznacza liczbę komórek NK ulegających apoptozie w chwili czasowej t oraz $-pNT$ określający liczbę komórek NK dezaktywowanych wskutek ich interakcji z komórkami nowotworowymi w chwili czasowej t .

Trzecim równaniem modelu 4.1 zostało opisane tempo zmian $\frac{dL}{dt}$ liczebności populacji limfocytów T_{CD8+} . Wyrażenia $j\frac{D^2T^2}{k + D^2T^2}L$ oraz $(r_1N + r_2C)T$ zwiększają prędkość zmian liczebności tej populacji. Wyrażenia te określają liczbę limfocytów T_{CD8+} stymulowanych w chwili czasowej t odpowiednio: komórkami nowotworowymi, które są lizowane przez inne limfocyty T_{CD8+} oraz przez komórki NK, a także liczbę limfocytów T_{CD8+} wytwarzanych na skutek interakcji komórek nowotworowych z limfocytami krążącymi. Z kolei wyrażenia $-mL$, $-qLT$ i $-uNL^2$ hamują prędkość zmian liczby limfocytów T_{CD8+} . Wyrażenie $-mL$ oznacza zmniejszenie ekspresji limfocytów T_{CD8+} z powodu braku komórek nowotworowych, w związku z czym w chwili czasowej t powstaje ich mniej. Natomiast liczba dezaktywowanych limfocytów T_{CD8+} w chwili czasowej t na skutek ich interakcji z komórkami nowotworowymi oraz na skutek działania komórek NK została określona poprzez wyrażenia odpowiednio: $-qLT$ i $-uNL^2$.

Równanie czwarte określa tempo zmian liczebności populacji limfocytów krążących $\frac{dC}{dt}$ w chwili czasowej t , które jest modulowane poprzez różnicę między stałą liczbą α krążących limfocytów a stopniem ich degradacji $-\beta C$, gdzie β to stała określająca tempo wyniszczania krążących limfocytów.

Nazwa	Jednostka	Opis
a	dzień ⁻¹	Tempo wzrostu nowotworu
b	komórka ⁻¹	Odwrotność pojemności środowiska
c	dzień ⁻¹ · komórka ⁻¹	Minimalna liczba komórek nowotworu zabita przez komórki NK
d	dzień ⁻¹	Współczynnik skuteczności zabijania komórek nowotworowych przez limfocyty T_{CD8+}
e	dzień ⁻¹	Liczba komórek NK wyodrębnionych z limfocytów krążących
l	bezwymiarowe	Współczynnik skalowania skuteczności układu odpornościowego
f	dzień ⁻¹	Śmiertelność komórek NK
g	dzień ⁻¹	Maksymalna liczba komórek NK wytwarzanych na skutek obecności komórek nowotworowych
h	komórka ²	Wartość T^2 konieczna do osiągnięcia połowy maksymalnej wartości cytotoksyczności komórek NK
j	dzień ⁻¹	Maksymalna liczba limfocytów T_{CD8+} wytwarzanych na skutek obecności komórek nowotworowych
k	komórka ²	Wartość D^2T^2 konieczna do osiągnięcia połowy maksymalnej wartości cytotoksyczności limfocytów T_{CD8+}
m	dzień ⁻¹	Śmiertelność limfocytów T_{CD8+}
q	dzień ⁻¹ · komórka ⁻¹	Tempo dezaktywacji limfocytów T_{CD8+} przez komórki nowotworu
p	dzień ⁻¹ · komórka ⁻¹	Tempo dezaktywacji komórek NK przez komórki nowotworu
s	bezwymiarowe	Wartość $(\frac{L}{T})^l$ konieczna do osiągnięcia połowy maksymalnej wartości cytotoksyczności limfocytów T_{CD8+}
r_1	dzień ⁻¹ · komórka ⁻¹	Tempo stymulacji wytwarzania limfocytów T_{CD8+} jako rezultat niszczenia komórek nowotworowych przez komórki NK
r_2	komórka ⁻¹ · dzień ⁻¹	Tempo stymulacji wytwarzania limfocytów T_{CD8+} jako rezultat interakcji komórek nowotworowych z krążącymi limfocytami
u	komórka ⁻² · dzień ⁻¹	Współczynnik funkcji komórek NK regulującej limfocyty T_{CD8+}
α	komórka · dzień ⁻¹	Stała liczba krążących limfocytów
β	dzień ⁻¹	Tempo wyniszczania krążących limfocytów

Tab. 4.1: Parametry modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia.

4.3 Model uwzględniający proces leczenia

Przyjęto założenia dla modelu jak w rozdziale 4.1.

4.3.1 Równania i opis modelu

W modelu 4.2, poza czterema populacjami uwzględnionymi w modelu 4.1, rozważamy dodatkowo zmiany stężenia dwóch podawanych leków, czyli cytostatyka użytego w chemioterapii (M) oraz interleukin-2 (I) wykorzystanych do immunoterapii. Przedstawione w układzie 4.2 równania określają tempo zmian liczebności populacji, jak w modelu 4.1, ale także opisują wpływ podawanych leków na nowotwór oraz ich rozpad w organizmie. Wyrażenia odróżniające obydwa modele, odpowiadające podawanym lekom zaznaczono w układzie 4.2 na czerwono. Parametry modelu leczonego guza 4.2, ukazano w tabeli 4.2.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{dt} = aT(1 - bT) - cNT - DT - K_T(1 - e^{-M})T, \\ \frac{dN}{dt} = eC - fN + g\frac{T^2}{h + T^2}N - pNT - K_N(1 - e^{-M})N, \\ \frac{dL}{dt} = -mL + j\frac{D^2T^2}{k + D^2T^2}L - qLT + (r_1N + r_2C)T - uNL^2 - K_L(1 - e^{-M})L + \frac{p_I LI}{g_I + I} + \nu_L(t), \\ \frac{dC}{dt} = \alpha - \beta C - K_C(1 - e^{-M})C, \\ \frac{dM}{dt} = -\gamma M + \nu_M(t), \\ \frac{dI}{dt} = -\mu_I I + \nu_I(t), \end{array} \right. \quad (4.2)$$

gdzie:

- $T(t)$ - liczba komórek nowotworowych w chwili czasowej t ,
- $N(t)$ - liczba komórek NK w chwili czasowej t ,
- $L(t)$ - liczba limfocytów T_{CD8+} w chwili czasowej t ,
- $C(t)$ - liczba limfocytów krążących w chwili czasowej t ,
- $M(t)$ - stężenie cytostatyka w chwili czasowej t ,
- $I(t)$ - stężenie interleukin-2 w chwili czasowej t ,
- $D = d\frac{(\frac{L}{T})^l}{s + (\frac{L}{T})^l}$ - liza nowotworu pod wpływem działania limfocytów T_{CD8+} .

W odróżnieniu od modelu 4.1, w modelu 4.2 występują dwa dodatkowe równania odnoszące się do tempa zmian stężenia cytostatyka $\frac{dM}{dt}$ oraz IL-2 $\frac{dI}{dt}$ w organizmie. Wyrażenia $-\gamma M$ oraz $-\mu_i L$ hamują tempo tych zmian poprzez spadek stężenia odpowiednio: cytostatyka i IL-2 na skutek rozpadu tych substancji.

Wyrażenia $\nu_L(t)$, $\nu_M(t)$ oraz $\nu_I(t)$ odpowiadają zewnętrznemu podawaniu leków: TIL (limfocytów T_{CD8+}), cytostatyka oraz IL-2, w związku z czym zwiększają tempo zmian stężenia tych leków w organizmie.

Wpływ chemioterapii na tempo zmian $\frac{dT}{dt}$, $\frac{dN}{dt}$, $\frac{dL}{dt}$ oraz $\frac{dC}{dt}$ liczebności populacji odpowiednio: komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących określono za pomocą wyrażenia $-K_i(1 - e^{-M})i$, gdzie $i = T, N, L, C$. Wyrażenie to opisuje działanie cytostatyka hamujące tempo zmian liczebności każdej z wyżej wymienionych populacji. Działanie to wyraża się liczbą komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących zniszczonych w danej chwili czasowej t .

Wpływ immunoterapii na tempo zmian $\frac{dL}{dt}$ liczebności populacji limfocytów T_{CD8+} został określony poprzez wyrażenie $\frac{p_i L I}{g_i + I}$, które przyspiesza tempo tych zmian, gdyż oznacza liczbę limfocytów T_{CD8+} stymulowanych poprzez podawaną zewnętrźnie IL-2 w danej chwili czasowej t .

Nazwa	Jednostka	Opis
γ	dzień ⁻¹	Tempo rozpadu leku chemioterapeutycznego
K_T	dzień ⁻¹	Ułamek komórek nowotworowych zniszczonych poprzez działanie cytostatyka
K_N	dzień ⁻¹	Ułamek komórek NK zniszczonych poprzez działanie cytostatyka
K_L	dzień ⁻¹	Ułamek limfocytów T_{CD8+} zniszczonych poprzez działanie cytostatyka
K_C	dzień ⁻¹	Ułamek limfocytów krążących zniszczonych poprzez działanie cytostatyka
p_I	dzień ⁻¹	Maksymalna liczba limfocytów T_{CD8+} wytwarzanych na skutek obecności IL-2
g_I	komórka ²	Wartość stężenia interleukiny-2 konieczna do osiągnięcia połowy maksymalnej wartości aktywności cytolitycznej limfocytów T_{CD8+}
μ_I	dzień ⁻¹	Tempo rozpadu interleukiny-2 (leku)

Tab. 4.2: Dodatkowe parametry modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia.

5. Symulacje - brak leczenia

W pierwszej części pracy przeprowadzono modelowanie odpowiedzi układu immunologicznego na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia.

Warunki początkowe (Tab. 5.1) oraz wartości parametrów (Tab. 5.2) dla modelu 4.1 dobrano zgodnie z literaturą [19]. Warunki te odpowiadają zdrowemu układowi immunologicznemu, natomiast wartość początkowej liczby komórek nowotworowych $T_0 = 1 \cdot 10^6$ wynika z faktu, że dopiero przy tej wielkości możliwe jest kliniczne rozpoznanie guza [19].

Wartość [<i>liczba komórek</i>]	Rodzaj komórek	Promień nowotworu [<i>mm</i>]
$T(0) = 1 \cdot 10^6$	Komórki nowotworowe	0,62
$N(0) = 1 \cdot 10^5$	Komórki NK	
$L(0) = 1 \cdot 10^2$	Limfocyty T_{CD8+}	
$C(0) = 6 \cdot 10^{10}$	Limfocyty krążące	

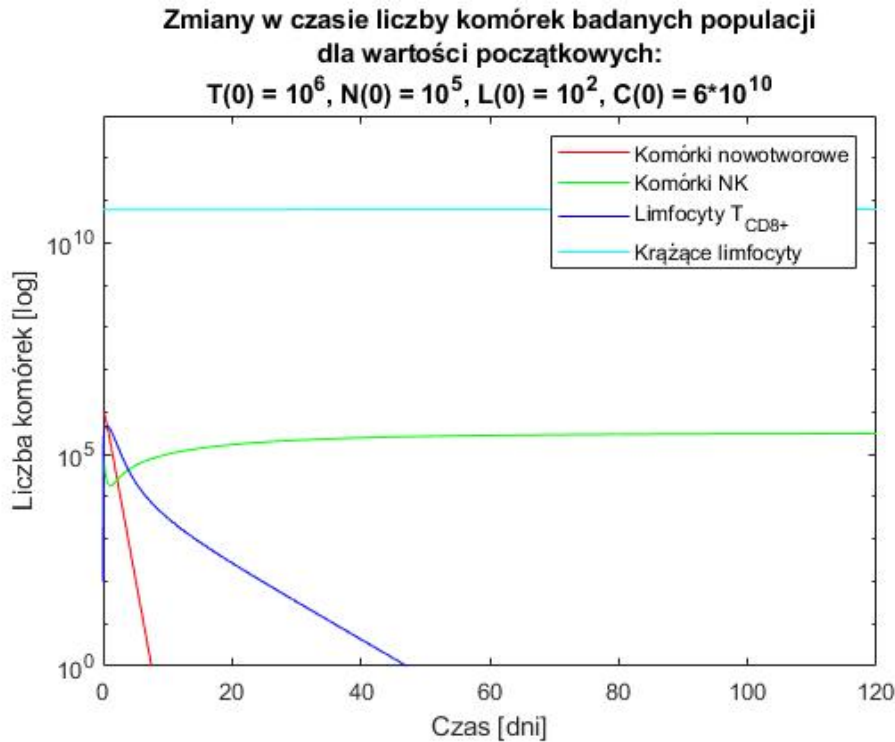
Tab. 5.1: Warunki początkowe modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia.

Dla większej czytelności, wielkość nowotworu określono również poprzez długość jego promienia, przyjmując, że nowotwór ma kształt zbliżony do kuli, a na 1 cm^3 przypada 10^9 komórek [23].

Pacjent 1			
Nazwa	Wartość	Nazwa	Wartość
a	$4,31 \cdot 10^{-1}$	k	$3,66 \cdot 10^7$
b	$1,02 \cdot 10^{-9}$	m	$2,04 \cdot 10^{-1}$
c	$6,41 \cdot 10^{-11}$	q	$1,42 \cdot 10^{-6}$
d	2,34	p	$3,42 \cdot 10^{-6}$
e	$2,08 \cdot 10^{-7}$	s	$8,39 \cdot 10^{-2}$
l	2,09	r_1	$1,1 \cdot 10^{-7}$
f	$4,12 \cdot 10^{-2}$	r_2	$6,5 \cdot 10^{-11}$
g	$1,25 \cdot 10^{-2}$	u	$3 \cdot 10^{-10}$
h	$2,02 \cdot 10^7$	α	$7,5 \cdot 10^8$
j	$2,49 \cdot 10^{-2}$	β	$1,2 \cdot 10^{-2}$

Tab. 5.2: Wartości parametrów modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia dla pacjenta 1.

Zmiany w czasie liczby komórek każdej z czterech badanych populacji, tj. komórek nowotworowych $T(t)$, komórek NK $N(t)$, limfocytów T_{CD8+} $L(t)$ i limfocytów krążących $C(t)$ dla warunków początkowych (Tab. 5.1) przedstawiono na Rys. 5.1. Można zaobserwować regresję nowotworu (przyjętą jako spadek i utrzymanie się liczby komórek nowotworowych poniżej $T = 1$) wskutek działania układu immunologicznego po czasie $T \approx 7,5$ dni. Duża początkowa liczba komórek nowotworowych wywołała nagły wzrost liczby limfocytów typu T_{CD8+} , których liczba po osiągnięciu wartości maksymalnej $L = 4,67 \cdot 10^5$ zaczyna spadać wraz ze zmniejszającą się liczbą komórek nowotworowych. Oznacza to, że częścią odpowiedzi układu immunologicznego na obecny nowotwór jest zwiększona produkcja limfocytów typu T_{CD8+} oraz, że pomiędzy komórkami nowotworowymi i limfocytami typu T_{CD8+} występuje interakcja prowadząca do stopniowego ich wymierania. Warto też zwrócić uwagę na malejącą liczbę komórek NK w czasie wzrostu liczby komórek nowotworowych, która po osiągnięciu minimum $N = 1,82 \cdot 10^4$ wraca do początkowej wartości $N = 10^5$, gdy komórki nowotworowe zostaną zniszczone. Z tej symulacji wynika, że zarówno komórki NK, jak i limfocyty typu T_{CD8+} biorą czynny udział w zwalczaniu komórek nowotworowych, podczas gdy liczba limfocytów krążących pozostaje niezmiennie na stałym poziomie $C \approx 6 \cdot 10^{10}$.



Rys. 5.1: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla wartości początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0) = 1 \cdot 10^6$. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 7$ dni (168 godzin).

5.1 Scenariusz I – symulacja wykonana dla modelu nieleczzonego guza

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od początkowej wielkości nowotworu (liczby komórek nowotworowych).

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 5.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu nieuwzględniającego leczenia ukazano w tabeli 5.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

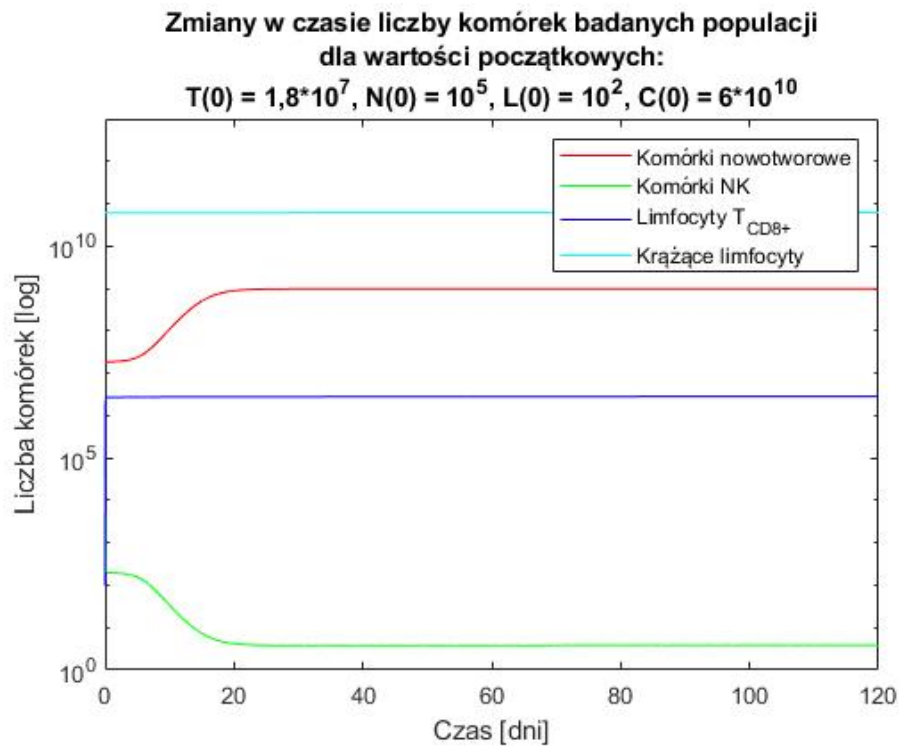
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$ zebrano w tabeli 5.3.

W tabeli 5.3 przedstawiono jak zmieniano początkową liczbę komórek nowotworu $T(0)$, liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni.

$T(0)$ [liczba komórek]	Początkowy promień nowotworu [mm]	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm ³]	Promień nowotworu [mm]
$1 \cdot 10^6$	0,62	$6,76 \cdot 10^{-8}$	$6,76 \cdot 10^{-14}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
$2 \cdot 10^6$	0,78	$8,15 \cdot 10^{-8}$	$8,15 \cdot 10^{-14}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
$5 \cdot 10^6$	1,06	$2,69 \cdot 10^{-8}$	$2,69 \cdot 10^{-14}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
$1 \cdot 10^7$	1,34	$3,44 \cdot 10^{-8}$	$3,44 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-5}$
$1,5 \cdot 10^7$	1,53	$4,41 \cdot 10^{-8}$	$4,41 \cdot 10^{-14}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
$1,7 \cdot 10^7$	1,6	$2,96 \cdot 10^{-8}$	$2,96 \cdot 10^{-14}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
$1,75 \cdot 10^7$	1,61	$3,67 \cdot 10^{-8}$	$3,67 \cdot 10^{-14}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$
$1,8 \cdot 10^7$	1,63	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$2 \cdot 10^7$	1,69	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$5 \cdot 10^7$	2,29	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 5.3: Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0)$, początkowa szacowana długość promienia nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu po symulacji w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni.

Rys. 5.2 obrazuje przypadek, w którym układ immunologiczny nie jest w stanie pokonać nowotworu – liczba jego komórek stabilizuje się po 24 dniach około wartości $9,8 \cdot 10^8$ (odpowiada to objętości 980 mm^3 i długości promienia $6,16 \text{ mm}$).



Rys. 5.2: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla wartości początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 24$ dni (576 godzin) około wartości $9,8 \cdot 10^8$.

Zmiany wielkości nowotworu otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$ przedstawiono na Rys. 5.3. Na Rys. 5.4 pokazano zmiany długości promienia nowotworu otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$.



Rys. 5.3: Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni. Liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$.



Rys. 5.4: Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni. Długość promienia nowotworu [mm] w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$.

Wnioski:

- zdrowy układ immunologiczny, określony poprzez liczbę komórek występujących naturalnie w organizmie: komórek NK $N(0) = 10^5$, limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$ oraz limfocytów krążących $C(0) = 6 \cdot 10^{10}$ jest w stanie zniszczyć komórki nowotworowe bez ingerencji dodatkowych czynników (np. leczenia), jeśli początkowa liczba komórek nowotworu wynosi $T(0) = 10^6$ (rozmiar, przy którym guz jest wykrywalny klinicznie);
- przy zbyt dużej początkowej liczbie komórek nowotworu ($T(0) = 1,8 \cdot 10^7$) układ immunologiczny, mimo dobrego stanu, nie potrafi samoistnie pozbyć się nowotworu;
- wzrost liczby komórek nowotworowych powoduje nagły przyrost limfocytów typu T_{CD8+} ; z powodu braku możliwości zniszczenia nowotworu liczba limfocytów typu T_{CD8+} utrzymuje się (nie zmniejsza się) na stałym poziomie $L \approx 2,8 \cdot 10^6$;
- na skutek interakcji, tj. próby zniszczenia komórek nowotworu przez komórki NK, liczba komórek NK maleje i utrzymuje się na bardzo niskim poziomie $N \approx 3,78$;
- liczba limfocytów krążących, mimo zmian w czasie pozostałych populacji, utrzymuje się na stałym poziomie $C \approx 6 \cdot 10^{10}$;

- możliwy wzrost guza np. w przypadku późnego jego wykrycia, nałożenie się innej choroby w tym samym czasie, przez co układ immunologiczny nie był całkowicie sprawny;

5.2 Scenariusz II – symulacja wykonana dla modelu nieleczzonego guza

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od początkowej liczby limfocytów krążących $C(0)$.

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 5.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu nieuwzględniającego leczenia ukazano w tabeli 5.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

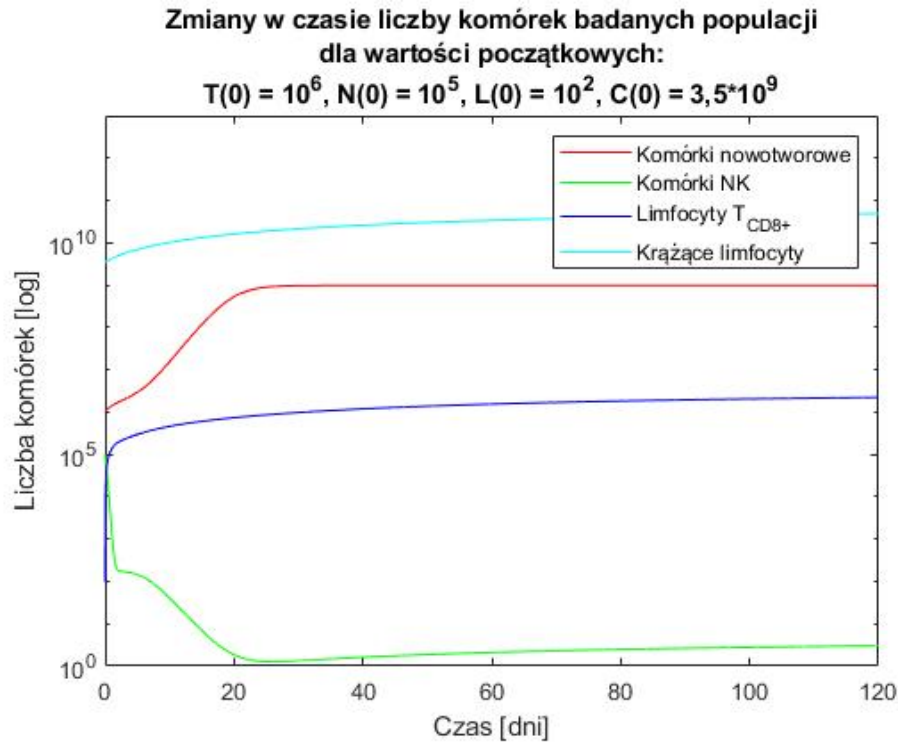
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się początkowej liczby limfocytów krążących $C(0)$ zebrano w tabeli 5.4.

W tabeli 5.4 przedstawiono jak zmieniano początkową liczbę limfocytów krążących $C(0)$, liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni.

$C(0)$ [liczba komórek]	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$6 \cdot 10^{10}$	$6,76 \cdot 10^{-8}$	$6,76 \cdot 10^{-14}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
$3 \cdot 10^{10}$	$1,69 \cdot 10^{-7}$	$1,69 \cdot 10^{-13}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
$1 \cdot 10^{10}$	$3,09 \cdot 10^{-8}$	$1,33 \cdot 10^{-14}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
$6 \cdot 10^9$	$4,79 \cdot 10^{-8}$	$4,79 \cdot 10^{-14}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
$4 \cdot 10^9$	$5,72 \cdot 10^{-8}$	$5,72 \cdot 10^{-14}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
$3,5 \cdot 10^9$	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$3 \cdot 10^9$	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$1 \cdot 10^9$	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$6 \cdot 10^8$	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$3 \cdot 10^8$	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

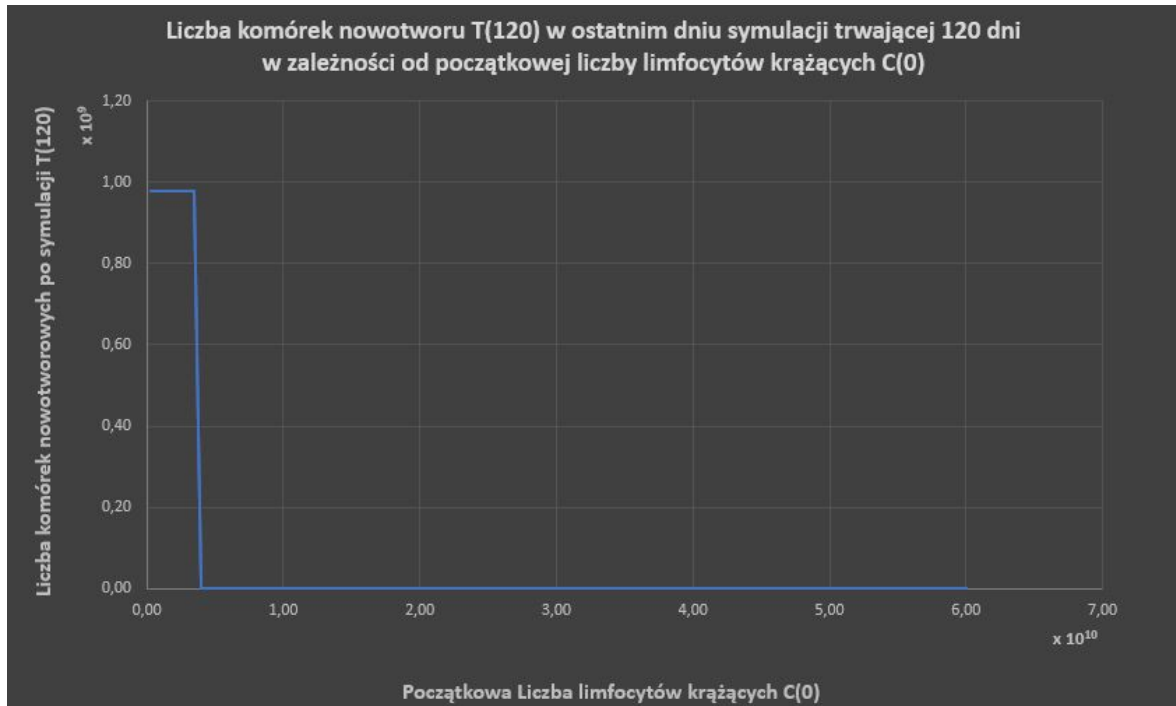
Tab. 5.4: Początkowa liczba limfocytów krążących $C(0)$, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni.

Na Rys. 5.5 liczba komórek nowotworowych stabilizuje się po 28 dniach około wartości $9,8 \cdot 10^8$ (odpowiada to objętości 980 mm^3 i długości promienia $6,16 \text{ mm}$). Układ immunologiczny ze względu na zmniejszoną liczbę krążących limfocytów jest zbyt słaby, by zniszczyć komórki nowotworu.



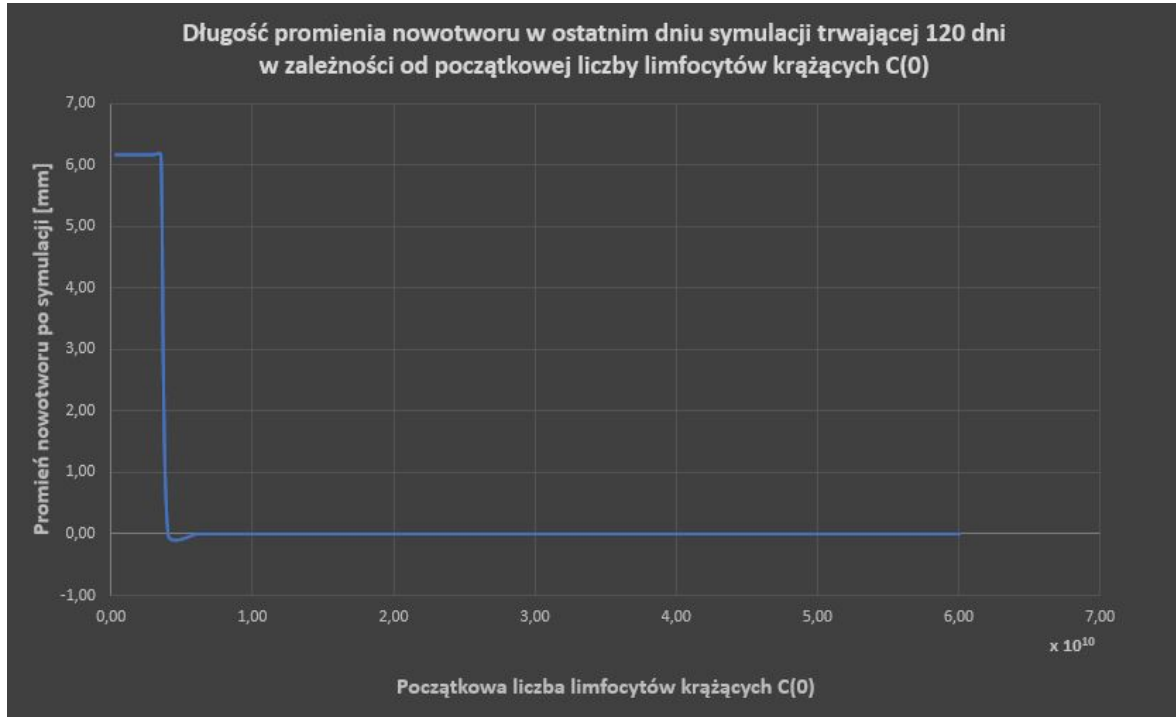
Rys. 5.5: Zmiany liczby komórek badanych populacji dla wartości początkowej liczby limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 28$ dni (672 godziny) około wartości $9,8 \cdot 10^8$.

Zmiany w czasie wielkości nowotworu otrzymane na koniec w ostatnim dniu symulacji trwającej $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby krążących limfocytów $C(0)$ przedstawiono na Rys. 5.6.



Rys. 5.6: Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji, która trwała $T_k = 120$ dni. Liczba komórek nowotworowych na koniec symulacji $T(120)$ w zależności od początkowej liczby krążących limfocytów $C(0)$.

Na Rys. 5.7 pokazano zmiany długości promienia nowotworu otrzymane na koniec symulacji trwającej $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby krążących limfocytów $C(0)$.



Rys. 5.7: Wyniki otrzymane na koniec symulacji, która trwała $T_k = 120$ dni. Długość promienia nowotworu [mm] na koniec symulacji w zależności od początkowej liczby krążących limfocytów $C(0)$.

Wnioski:

- przy odpowiednio dużej liczbie krążących limfocytów ($C(0) \approx 4 \cdot 10^9$) układ immunologiczny jest w stanie zniszczyć komórki nowotworowe bez ingerencji zewnętrznych czynników (np. leczenia),
- przy zbyt małej liczbie krążących limfocytów (zły stan układu immunologicznego) organizm nie jest w stanie zniszczyć komórek nowotworowych;
- w symulacji 5.1 liczba krążących limfocytów pozostawała na stałym poziomie, można więc wnioskować, że zmiany w liczbie komórek nowotworowych i limfocytach typu T_{CD8} oraz w liczbie limfocytów krążących są od siebie niezależne, jednak w symulacji 5.2 widać, że stosunkowo niewielka zmiana liczby limfocytów krążących znacząco wpływa na wynik symulacji;

6. Symulacje - leczenie

W drugiej części pracy przeprowadzono modelowanie odpowiedzi układu immunologicznego na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem leczenia:

- wyłącznie metodą chemioterapii,
- wyłącznie metodą immunoterapii,
- skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii.

Jako warunki początkowe przyjęto takie wartości początkowej liczby komórek nowotworowych i limfocytów krążących, dla których układ immunologiczny nie jest w stanie (jak wynika z symulacji 5.1 i 5.2) pokonać nowotworu bez zastosowania leczenia, tj. $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$ i $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$. Warunki początkowe (Tab. 6.1) odpowiadają osłabionemu układowi immunologicznemu.

Wartość [<i>liczba komórek</i>]	Rodzaj komórek	Promień nowotworu [<i>mm</i>]
$T(0) = 1,8 \cdot 10^7$	Komórki nowotworowe	1,63
$N(0) = 1 \cdot 10^5$	Komórki NK	
$L(0) = 1 \cdot 10^2$	Limfocyty T_{CD8+}	
$C(0) = 3,5 \cdot 10^9$	Limfocyty krążące	

Tab. 6.1: Warunki początkowe dla modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia.

Wartości parametrów (Tab. 5.2) oraz wartości dodatkowych parametrów uwzględniających proces leczenia (Tab. 6.2) dla modelu 4.2 dobrano zgodnie z literaturą [19].

Nazwa	γ	K_T	K_N	K_L	K_C	p_I	g_I	μ_I
Wartość	$9 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^1$

Tab. 6.2: Wartości dodatkowych parametrów modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia.

7. Leczenie metodą chemioterapii – symulacje wykonane dla modelu leczonego guza

W symulacji leczenia metodą chemioterapii wzięto pod uwagę takie zmienne, jak:

- długość cyklu dozowania cytostatyka,
- czas dozowania cytostatyka podczas jednego cyklu,
- dawka dozowanego cytostatyka V_M ,
- liczba powtórzeń cyklu dozowania cytostatyka,
- dzień rozpoczęcia leczenia.

Cykl podawania leku określa czas ciągłego podawania leku oraz przerwy pomiędzy kolejnymi dawkami konieczne do regeneracji organizmu. Przykładowy schemat cyklu można określić poprzez: [1 5], co oznacza podawanie leku przez 1 dzień (24 godziny) oraz 5 dni (120 godzin) przerwy. Następnie cykl może być powtórzony, co oznaczałoby kolejny 1 dzień podawania leku, a następnie 5 dni przerwy.

Długość cyklu [dni]	Czas dozowania cytostatyka [dni]	Schemat cyklu	Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień rozpoczęcia chemioterapii
4	1	[1 3]	5	9	1

Tab. 7.1: Warunki początkowe modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia za pomocą chemioterapii.

7.1 Scenariusz I – zmiana długości cyklu

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od długości cyklu chemioterapii.

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, dawkę dozowanego cytostatyka, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w tabeli 7.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się długości cyklu zebrano w tabeli 7.2.

W tabeli 7.2 przedstawiono jak zmieniano długość cyklu (długość przerw pomiędzy dawkami przy stałym czasie dozowania cytostatyka oraz czas dozowania cytostatyka przy stałej długości przerw pomiędzy dawkami) chemioterapii, schemat cyklu, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni.

Zmiana długości przerwy pomiędzy dawkami					
Długość cyklu [dni]	Schemat cyklu	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
4	[1 3]	25,84	$4,64 \cdot 10^{-8}$	$4,64 \cdot 10^{-14}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
4,5	[1 3,5]	32,25	$2,46 \cdot 10^{-7}$	$2,46 \cdot 10^{-13}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$
5	[1 4]	45,1	$9,37 \cdot 10^{-8}$	$9,37 \cdot 10^{-14}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
5,5	[1 4,5]	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
8	[1 7]	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
12	[1 11]	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
Zmiana czasu dozowania poszczególnych dawek					
Długość cyklu [dni]	Schemat cyklu	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
4	[1 3]	25,84	$4,64 \cdot 10^{-8}$	$4,64 \cdot 10^{-14}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
3,75	[0,75 3]	34,34	$8,94 \cdot 10^{-8}$	$8,94 \cdot 10^{-14}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
3,5	[0,5 3]	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 7.2: Długość oraz schemat cyklu chemioterapii, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla zmieniającej się długości przerwy pomiędzy poszczególnymi dawkami chemioterapii (przy stałym czasie dozowania pojedynczej dawki równym 1 dzień) oraz zmieniającego się czasu dozowania pojedynczej dawki (przy stałej długości przerwy pomiędzy dawkami równej 3 dni).

Wnioski:

- osłabiony układ immunologiczny, określony poprzez liczbę komórek występujących naturalnie w organizmie: komórek NK $N(0) = 10^5$, limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$ oraz limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$ wspomagany leczeniem metodą chemioterapii jest w stanie zniszczyć komórki nowotworowe, jeśli początkowa liczba komórek guza wynosi $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$;
- długość cyklu (przerwy pomiędzy kolejnymi dawkami cytostatyka oraz czas dozowania pojedynczej dawki cytostatyka) chemioterapii ma wpływ na skuteczność tej metody leczenia (regresję nowotworu lub jej brak) oraz na czas potrzebny do regresji nowotworu;
- regresja nowotworu następuje w przypadku długości cyklu równej 4 dni (96 godzin), natomiast przy dwukrotnie oraz trzykrotnie dłuższym czasie cyklu nowotwór nie zostaje zniszczony;
- dla niewielkich zmian długości przerwy pomiędzy podawaniem kolejnych dawek cytostatyka (długość ta wynosiła: 3, 3,5 oraz 4 dni) czas konieczny do regresji nowotworu znacznie się wydłużył (dzień, w którym nastąpiła regresja, odpowiednio: 26, 33 oraz 46); zatem wydłużenie przerwy między dawkami o pół dnia (12

godzin) skutkuje przedłużeniem leczenia o tydzień, natomiast w efekcie wydłużenia przerwy o 1 dzień (24 godziny) terapia jest dłuższa o prawie 3 tygodnie (około 2 razy dłużej niż w przypadku, gdy przerwa wynosi 3 dni);

- skrócenie czasu podawania cytostatyka o 6 godzin przy stałej przerwie w cyklu trwającej 3 dni (72 godziny) powoduje przedłużenie czasu koniecznego do regresji nowotworu z 26 do 35 dni, natomiast skrócenie tego czasu o pół dnia (12 godzin) powoduje brak wystąpienia regresji nowotworu.

7.2 Scenariusz II – zmiana dawki dozowanego cytostatyka

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od wielkości dawki dozowanego cytostatyka.

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, dawkę dozowanego cytostatyka, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w tabeli 7.1. Długość cyklu wynosiła 4, 8 oraz 12 dni.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się wielkości dawki cytostatyka zebrano w tabeli 7.3.

W tabeli 7.3 przedstawiono jak zmieniano wielkość dawki dozowanego cytostatyka, schemat cyklu, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla cyklu o długości 4, 8 oraz 12 dni.

Długość cyklu: 4 dni					
Schemat cyklu	Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
[1 3]	3	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
[1 3]	3,5	49,34	$8,32 \cdot 10^{-8}$	$8,32 \cdot 10^{-14}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	4	34	$9,18 \cdot 10^{-8}$	$9,18 \cdot 10^{-14}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	5	25,84	$4,64 \cdot 10^{-8}$	$4,64 \cdot 10^{-14}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	7	20,67	~ 0	~ 0	~ 0
[1 3]	9	18,5	~ 0	~ 0	~ 0
[1 3]	11	17,58	~ 0	~ 0	~ 0
[1 3]	15	16,38	~ 0	~ 0	~ 0
[1 3]	20	15,63	~ 0	~ 0	~ 0
[1 3]	30	15,7	~ 0	~ 0	~ 0
Długość cyklu: 8 dni					
Schemat cyklu	Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
[1 7]	5	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
[1 7]	10	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
[1 7]	12	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
[1 7]	13	70,79	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
Długość cyklu: 12 dni					
Schemat cyklu	Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
[1 11]	52	brak	$7,69 \cdot 10^8$	769	5,69
[1 11]	53	98,25	$1,79 \cdot 10^{-13}$	$1,79 \cdot 10^{-19}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$

Tab. 7.3: Schemat cyklu chemioterapii, dawka dozowanego cytostatyka, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla długości cyklu równej 4, 8 oraz 12 dni.

Wnioski:

- skuteczność chemioterapii (regresja nowotworu lub jej brak) oraz czas potrzebny do regresji nowotworu będącej skutkiem chemioterapii zależy od dawki dozowa-

nego podczas leczenia cytostatyka; regresja nowotworu nie występuje dla dawki $V_M = 3$, natomiast dla dawki $V_M = 3,5$ występuje w 50 dniu od rozpoczęcia symulacji (leczenia);

- dla niewielkich wartości dawki cytostatyka V_M , (np.: $V_M = 3,5$, $V_M = 4$, $V_M = 5$) małe zmiany dawki powodują znaczne skrócenie czasu potrzebnego do regresji nowotworu (dzień regresji, odpowiednio: 50, 34, 26), natomiast przy większych dawkach (np.: $V_M = 11$, $V_M = 20$, $V_M = 30$), ich zmiana nie wpływa znacząco na dzień regresji (dzień regresji, odpowiednio: 18, 16, 16);
- skuteczna dawka cytostatyka różni się w zależności od długości cyklu chemioterapii; dla długości cyklu wynoszącej 4 dni (96 godzin) do skutecznego leczenia wystarczająca jest dawka $V_M = 3,5$, przy dwukrotnie dłuższym cyklu (8 dni = 192 godziny) konieczna dawka jest prawie 4 razy większa ($V_M = 13$), natomiast przy cyklu trzykrotnie dłuższym (12 dni = 288 godzin) jest ponad 15 razy większa ($V_M = 53$).

7.3 Scenariusz III – zmiana dawki dozowanego cytostatyka w kolejnych powtórzeniach cyklu

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od wielkości dawki dozowanego cytostatyka w kolejnych powtórzeniach cyklu.

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, początkową dawkę dozowanego cytostatyka, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w tabeli 7.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się wielkości dawki cytostatyka w kolejnych powtórzeniach cyklu zebrano w tabeli 7.4.

W tabeli 7.4 przedstawiono jak zmieniano wielkość dawki dozowanego cytostatyka w kolejnych powtórzeniach cyklu, schemat cyklu, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni.

Schemat cyklu	Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm ³]	Promień nowotworu [mm]
[1 3]	-0,1	26,84	$1,53 \cdot 10^{-7}$	$1,53 \cdot 10^{-13}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	-0,2	27,96	$3,13 \cdot 10^{-8}$	$3,13 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	-0,3	29,34	$4,25 \cdot 10^{-8}$	$4,25 \cdot 10^{-14}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	-0,4	33,04	$2,04 \cdot 10^{-7}$	$2,04 \cdot 10^{-13}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	-0,5	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 7.4: Schemat cyklu chemioterapii, różnica pomiędzy kolejnymi dawkami (dawka V_M zmniejszana z każdym kolejnym powtórzeniem cyklu) dozowanego cytostatyka, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni.

Wnioski:

- chemioterapia jest skuteczna (występuje regresja nowotworu) w przypadku zmniejszania wielkości dawki z każdym kolejnym cyklem; leczenie metodą chemioterapii przy stałej dawce cytostatyka $V_M = 4$ (dzień regresji: 34, Tab. 7.3) ma czas potrzebny do wystąpienia regresji nowotworu porównywalny do leczenia ze zmniejszaniem dawki V_M o 0,4 w kolejnych cyklach rozpoczynając od $V_M = 5$ (dzień regresji: 34); w pierwszym przypadku regresja zostaje osiągnięta poprzez dziewięciokrotne użycie takiej samej dawki $V_M = 4$, podczas gdy w drugim przypadku wykorzystane są 3 większe oraz 6 mniejszych dawek, co pozwala osiągnąć ten sam efekt przy mniejszej ilości cytostatyka przyjmowanej przez pacjenta, tj. mniejszym zniszczeniu zdrowych tkanek.

7.4 Scenariusz IV – zmiana liczby powtórzeń cyklu

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od liczby powtórzeń cyklu chemioterapii.

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w tabeli 7.1. Dawka dozowanego cytostatyka V_M wynosiła 5, 4, 3,5 oraz 3.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się liczby powtórzeń cyklu chemioterapii zebrano w tabeli 7.5.

W tabeli 7.5 przedstawiono jak zmieniano liczbę powtórzeń cyklu, schemat cyklu, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla dawki dozowanego cytostatyka V_M równej 5, 4, 3,5 oraz 3.

$V_M = 5$					
Schemat cyklu	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm ³]	Promień nowotworu [mm]
[1 3]	9	25,84	$4,64 \cdot 10^{-8}$	$4,64 \cdot 10^{-14}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	8	25,84	$1,32 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-13}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	7	25,84	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	6	26,5	$6,08 \cdot 10^{-8}$	$6,08 \cdot 10^{-14}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	5	27,92	$2,31 \cdot 10^{-8}$	$2,31 \cdot 10^{-14}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	4	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$V_M = 4$					
Schemat cyklu	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm ³]	Promień nowotworu [mm]
[1 3]	9	34	$9,18 \cdot 10^{-8}$	$9,18 \cdot 10^{-14}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	8	34,67	$1,19 \cdot 10^{-7}$	$1,19 \cdot 10^{-13}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	7	36,04	$5,37 \cdot 10^{-8}$	$5,37 \cdot 10^{-14}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	6	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$V_M = 3,5$					
Schemat cyklu	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm ³]	Promień nowotworu [mm]
[1 3]	9	49,34	$8,32 \cdot 10^{-8}$	$8,32 \cdot 10^{-14}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	8	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$V_M = 3$					
Schemat cyklu	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm ³]	Promień nowotworu [mm]
[1 3]	9	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
[1 3]	15	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
[1 3]	19	86,92	$1,37 \cdot 10^{-7}$	$1,37 \cdot 10^{-13}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	20	84,5	$6,8 \cdot 10^{-8}$	$6,8 \cdot 10^{-14}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$

Tab. 7.5: Schemat oraz liczba powtórzeń cyklu chemioterapii, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla dawek dozowanego cytostatyka równych 5, 4, 3,5 oraz 3.

Wnioski:

- skuteczność chemioterapii (regresja nowotworu) zależy od liczby powtórzeń cyklu chemioterapii; dla dawki cytostatyka $V_M = 5$ leczenie jest skuteczne (dzień regre-

sji: 28) przy 5 powtórzeniach cyklu, natomiast przy większej liczbie powtórzeń (6, 7 powtórzeń) moment wystąpienia regresji nowotworu następuje nieznacznie wcześniej (dzień regresji: 27, 26) lub w tym samym czasie (8, 9 powtórzeń - dzień regresji: 26, 26);

- chemioterapia przy użyciu dawki $V_M = 3$, która nie jest skuteczna dla 9 powtórzeń cyklu (brak regresji nowotworu) przy większej ilości powtórzeń cyklu (19 powtórzeń) pozwala osiągnąć pozytywny wynik leczenia; czas do wystąpienia regresji wynosi w tym przypadku 87 dni (ponad 3 razy więcej niż przy 5 powtórzeniach i dawce $V_M = 5$), ale jest to możliwość zastosowania chemioterapii u pacjentów, których organizm jest zbyt zniszczony, by zastosować większą dawkę cytostatyka.

7.5 Scenariusz V – zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii (dozowania cytostatyka)

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od dnia rozpoczęcia chemioterapii (dozowania cytostatyka).

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w tabeli 7.1. Dawka dozowanego cytostatyka V_M wynosiła 5 oraz 4,5.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającego się dnia rozpoczęcia chemioterapii (dozowania cytostatyka) zebrano w tabeli 7.6.

W tabeli 7.6 przedstawiono jak zmieniano dzień rozpoczęcia chemioterapii, schemat cyklu, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla dawki dozowanego cytostatyka V_M równej 5 oraz 4,5.

$V_M = 5$					
Schemat cyklu	Dzień rozpoczęcia chemioterapii	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm ³]	Promień nowotworu [mm]
[1 3]	1	25,84	$4,64 \cdot 10^{-8}$	$4,64 \cdot 10^{-14}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	2	29,54	$2,29 \cdot 10^{-8}$	$2,29 \cdot 10^{-14}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	5	39,84	$1,79 \cdot 10^{-7}$	$1,79 \cdot 10^{-13}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	11	59,25	$2,61 \cdot 10^{-7}$	$2,61 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	12	60	$3,93 \cdot 10^{-8}$	$3,93 \cdot 10^{-14}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	13	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$V_M = 4,5$					
Schemat cyklu	Dzień rozpoczęcia chemioterapii	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm ³]	Promień nowotworu [mm]
[1 3]	1	28,46	$9,03 \cdot 10^{-8}$	$9,03 \cdot 10^{-14}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	2	31,92	$8,87 \cdot 10^{-8}$	$8,87 \cdot 10^{-14}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	3	37,38	$1,72 \cdot 10^{-7}$	$1,72 \cdot 10^{-13}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	4	43,54	$2,66 \cdot 10^{-7}$	$2,66 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	5	49,84	$1,75 \cdot 10^{-7}$	$1,75 \cdot 10^{-13}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	6	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
[1 3]	7	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 7.6: Schemat cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla dawek dozowanego cytostatyka równych 5 oraz 4,5.

Wnioski:

- skuteczność chemioterapii (regresja nowotworu) zależy od dnia rozpoczęcia leczenia (dozowania cytostatyka); dla dawki cytostatyka $V_M = 5$ oraz $V_M = 4,5$ leczenie rozpoczęte w 1 dniu symulacji trwa 26 dni oraz 29 dni (dzień regresji nowotworu), podczas gdy rozpoczęte 4 dni później trwa, odpowiednio 40 dni (2 tygodnie dłużej) oraz 50 dni (3 tygodnie dłużej);
- dla dawki $V_M = 4,5$ przesunięcie dnia rozpoczęcia chemioterapii zaledwie o 6 dni skutkuje negatywnym wynikiem leczenia (brakiem regresji nowotworu).

8. Leczenie metodą immunoterapii – symulacje wykonane dla modelu leczonego guza

W symulacji leczenia metodą immunoterapii wzięto pod uwagę takie zmienne, jak:

- wielkość nowotworu (liczba komórek nowotworowych) w dniu rozpoczęcia immunoterapii,
- dawka V_I IL-2,
- dawka V_L TIL,
- liczba powtórzeń cyklu dawkowania IL-2,
- dzień rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2 lub TIL).

Lek: IL-2					
Długość cyklu [dni]	Czas dozowania leku [dni]	Schemat cyklu	Dawka dozowanego leku V_I	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień rozpoczęcia immunoterapii
0,5	0,3	[0,3 0,2]	$5 \cdot 10^6$	6	9
Lek: TIL					
Długość cyklu [dni]	Czas dozowania leku [dni]	Schemat cyklu	Dawka dozowanego leku V_L	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień rozpoczęcia immunoterapii
1	1	[1 0]	$1 \cdot 10^9$	1	8

Tab. 8.1: Warunki początkowe modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia za pomocą immunoterapii.

8.1 Scenariusz I – zmiana początkowej wielkości guza

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od początkowej wielkości guza (liczby komórek nowotworowych).

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla immunoterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania, schemat cyklu, dawkę dozowanego leku, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia immunoterapii dla IL-2 i TIL przedstawiono w tabeli 8.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$ zebrano w tabeli 8.2.

W tabeli 8.2 przedstawiono jak zmieniano początkową liczbę komórek nowotworowych $T(0)$, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni..

$T(0)$ [liczba komórek]	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$1 \cdot 10^6$	15,13	$1,07 \cdot 10^{-87}$	$1,07 \cdot 10^{-93}$	$6,4 \cdot 10^{-32}$
$2 \cdot 10^6$	16,13	$7,46 \cdot 10^{-87}$	$7,46 \cdot 10^{-93}$	$1,2 \cdot 10^{-31}$
$5 \cdot 10^6$	18,88	$1,45 \cdot 10^{-84}$	$1,45 \cdot 10^{-90}$	$7 \cdot 10^{-31}$
$6 \cdot 10^6$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$1 \cdot 10^7$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$1,8 \cdot 10^7$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 8.2: Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0)$, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni.

Wnioski:

- osłabiony układ immunologiczny, określony poprzez liczbę komórek występujących naturalnie w organizmie: komórek NK $N(0) = 10^5$, limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$ oraz limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$ wspomagany leczeniem metodą immunoterapii jest w stanie zniszczyć komórki nowotworowe, jeśli początkowa liczba komórek guza wynosi $T(0) = 1 \cdot 10^6$ (rozmiar, przy którym guz jest wykrywalny klinicznie), co nie było możliwe w przypadku braku leczenia;
- leczenie metodą immunoterapii, zgodne z warunkami początkowymi (Tab. 8.1) nie jest skuteczne (nie następuje regresja nowotworu) dla początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$.

8.2 Scenariusz II – zmiana dawki IL-2

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od wielkości dawki IL-2.

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla immunoterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania, schemat cyklu, dawkę dozowanego leku, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia immunoterapii dla IL-2 i TIL przedstawiono w tabeli 8.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się dawki IL-2 dla leczenia z wykorzystaniem TIL oraz bez wykorzystania TIL zebrano w tabeli 8.3.

W tabeli 8.3 przedstawiono jak zmieniano dawkę IL-2, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla leczenia z wykorzystaniem TIL oraz bez wykorzystania TIL.

Leczenie z wykorzystaniem TIL				
Dawka IL-2 V_I	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$5 \cdot 10^6$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$1 \cdot 10^7$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$2 \cdot 10^7$	18,54	$7,69 \cdot 10^{-85}$	$7,69 \cdot 10^{-91}$	$5,7 \cdot 10^{-31}$
$3 \cdot 10^7$	18,42	$5,69 \cdot 10^{-85}$	$5,69 \cdot 10^{-91}$	$5,1 \cdot 10^{-31}$
$4 \cdot 10^7$	18,38	$5,43 \cdot 10^{-85}$	$5,43 \cdot 10^{-91}$	$5,1 \cdot 10^{-31}$
$6 \cdot 10^7$	18,34	$5,22 \cdot 10^{-85}$	$5,22 \cdot 10^{-91}$	$5 \cdot 10^{-31}$
$1 \cdot 10^8$	18,34	$5,05 \cdot 10^{-85}$	$5,05 \cdot 10^{-91}$	$4,9 \cdot 10^{-31}$
Leczenie bez wykorzystania TIL				
Dawka IL-2 V_I	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$5 \cdot 10^6$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$1 \cdot 10^7$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$2 \cdot 10^7$	18,54	$7,34 \cdot 10^{-85}$	$7,34 \cdot 10^{-91}$	$5,6 \cdot 10^{-31}$
$3 \cdot 10^7$	18,42	$5,7 \cdot 10^{-85}$	$5,7 \cdot 10^{-91}$	$5,2 \cdot 10^{-31}$
$4 \cdot 10^7$	18,38	$5,44 \cdot 10^{-85}$	$5,44 \cdot 10^{-91}$	$5,1 \cdot 10^{-31}$
$6 \cdot 10^7$	18,34	$5,22 \cdot 10^{-85}$	$5,22 \cdot 10^{-91}$	$5 \cdot 10^{-31}$
$1 \cdot 10^8$	18,34	$5,06 \cdot 10^{-85}$	$5,06 \cdot 10^{-91}$	$5 \cdot 10^{-31}$

Tab. 8.3: Dawka IL-2 V_I , dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla leczenia z wykorzystaniem TIL oraz bez wykorzystania TIL.

Wnioski:

- zmiana dawki IL-2 ma wpływ na skuteczność immunoterapii (wystąpienie regresji nowotworu lub jej brak); zarówno w przypadku wykorzystania w leczeniu IL-2 wraz z TIL, jak i wyłącznie IL-2 dawką konieczną do zniszczenia nowotworu (regresji) jest $V_I = 2 \cdot 10^7$;
- zwiększanie dawki IL-2 (dla dawki $V_I > 2 \cdot 10^7$ - wartości większych od koniecznej do uzyskania regresji guza) nie ma znaczącego wpływu na moment wystąpienia regresji; w każdym przypadku jest to 19 dzień symulacji, jedyną niewielką zmianą jest dokładny moment wystąpienia symulacji w 19 dniu dla poszczególnych przypadków (dla dawki $V_I > 6 \cdot 10^7$ moment ten jest taki sam dla każdego przypadku) oraz liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$;
- leczenie z wykorzystaniem IL-2 oraz TIL nie różni się znacząco od leczenia z wykorzystaniem wyłącznie IL-2; wykorzystanie TIL w leczeniu nie ma wpływu na dzień ani dokładny moment regresji nowotworu, jedyną zmianą w stosunku

do leczenia wyłącznie przy użyciu IL-2 są bardzo małe zmiany (zmniejszenie) liczby komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$;

- leczenie z wykorzystaniem wyłącznie IL-2 jest w stanie doprowadzić do regresji nowotworu; wykorzystanie TIL w immunoterapii nie jest konieczne.

8.3 Scenariusz III – zmiana dawki TIL

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od wielkości dawki TIL.

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla immunoterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania, schemat cyklu, dawkę dozowanego leku, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia immunoterapii dla IL-2 i TIL przedstawiono w tabeli 8.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się dawki TIL dla leczenia z wykorzystaniem IL-2 oraz bez wykorzystania IL-2 zebrano w tabeli 8.4.

W tabeli 8.4 przedstawiono jak zmieniano dawkę TIL, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla leczenia z wykorzystaniem IL-2 oraz bez wykorzystania IL-2.

Leczenie z wykorzystaniem IL-2				
Dawka TIL V_L	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$1 \cdot 10^9$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$1 \cdot 10^{10}$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$2 \cdot 10^{10}$	17,79	$1,86 \cdot 10^{-85}$	$1,86 \cdot 10^{-91}$	$3,5 \cdot 10^{-31}$
$5 \cdot 10^{10}$	17,21	$6 \cdot 10^{-86}$	$6 \cdot 10^{-92}$	$2,4 \cdot 10^{-31}$
$1 \cdot 10^{11}$	17,17	$5,53 \cdot 10^{-86}$	$5,53 \cdot 10^{-92}$	$2,4 \cdot 10^{-31}$
$1 \cdot 10^{15}$	17,17	$5,38 \cdot 10^{-86}$	$5,38 \cdot 10^{-92}$	$2,3 \cdot 10^{-31}$
Leczenie bez wykorzystania IL-2				
Dawka TIL V_L	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$1 \cdot 10^9$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$1 \cdot 10^{10}$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$1 \cdot 10^{11}$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$1 \cdot 10^{15}$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 8.4: Dawka TIL V_L , dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla leczenia z wykorzystaniem IL-2 oraz bez wykorzystania IL-2.

Wnioski:

- zmiana dawki TIL ma wpływ na skuteczność immunoterapii (wystąpienie regresji nowotworu lub jej brak) w przypadku wykorzystania w leczeniu zarówno TIL oraz IL-2; dawką konieczną do zniszczenia (regresji) nowotworu jest $V_L = 2 \cdot 10^{10}$;
- zwiększanie dawki TIL (dla dawki $V_L > 2 \cdot 10^{10}$ - wartości większych od koniecznej do uzyskania regresji guza) nie ma znaczącego wpływu na moment wystąpienia regresji; w każdym przypadku jest to 18 dzień symulacji, jedyną niewielką zmianą jest dokładny moment wystąpienia symulacji w 18 dniu dla poszczególnych przypadków (dla dawki $V_L > 1 \cdot 10^{11}$ moment ten jest taki sam dla każdego przypadku) oraz liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$;
- leczenie z wykorzystaniem TIL oraz IL-2 różni się znacząco od leczenia z wykorzystaniem wyłącznie TIL; leczenie z wykorzystaniem wyłącznie TIL nie jest w stanie doprowadzić do regresji nowotworu; wykorzystanie IL-2 w immunoterapii jest konieczne.

8.4 Scenariusz IV – zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od wielkości liczby powtórzeń cyklu IL-2.

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla immunoterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania, schemat cyklu, dawkę dozowanego leku, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia immunoterapii dla IL-2 i TiL przedstawiono w tabeli 8.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się liczby powtórzeń cyklu IL-2 8.5.

W tabeli 8.5 przedstawiono jak zmieniano liczbę powtórzeń cyklu IL-2, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla początkowej liczby komórek nowotworowych równej $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$ oraz $T(0) = 1 \cdot 10^6$.

Początkowa liczba komórek nowotworu $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$				
Liczba powtórzeń cyklu IL-2	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
6	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
10	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
14	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
Początkowa liczba komórek nowotworu $T(0) = 1 \cdot 10^6$				
Liczba powtórzeń cyklu IL-2	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
6	15,13	$1,07 \cdot 10^{-87}$	$1,07 \cdot 10^{-93}$	$6,4 \cdot 10^{-32}$
3	15,13	$1,07 \cdot 10^{-87}$	$1,07 \cdot 10^{-93}$	$6,4 \cdot 10^{-32}$
1	15,13	$1,07 \cdot 10^{-87}$	$1,07 \cdot 10^{-93}$	$6,4 \cdot 10^{-32}$

Tab. 8.5: Liczba powtórzeń cyklu IL-2, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla początkowej liczby komórek nowotworowych równej $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$ oraz $T(0) = 1 \cdot 10^6$.

Wnioski:

- liczba powtórzeń cyklu IL-2 nie ma wpływu na skuteczność leczenia (wystąpienie regresji nowotworu) niezależnie od liczby powtórzeń cyklu (analizowano: 6, 10 oraz 14 powtórzeń) nie występuje regresja guza dla początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$;
- dla małej początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0) = 1 \cdot 10^6$ zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2 nie wpływa na skuteczność leczenia (w każdym przypadku następuje regresja nowotworu) ani na moment wystąpienia regresji (w każdym przypadku dniem regresji jest 16 dzień symulacji).

8.5 Scenariusz V – zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2 lub TIL).

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla immunoterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania, schemat cyklu, dawkę dozowanego leku, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia immunoterapii dla IL-2 i TIL przedstawiono w tabeli 8.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającego się dnia rozpoczęcia immunoterapii zebrano w tabeli 8.6.

W tabeli 8.6 przedstawiono jak zmieniano dzień rozpoczęcia immunoterapii, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla zmieniającego się dnia rozpoczęcia dozowania IL-2 oraz TIL.

IL-2				
Dzień rozpoczęcia immunoterapii	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
9	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
6	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
5	13,84	$9,46 \cdot 10^{-89}$	$9,46 \cdot 10^{-95}$	$2,8 \cdot 10^{-32}$
4	12,58	$8,3 \cdot 10^{-90}$	$8,3 \cdot 10^{-96}$	$1,3 \cdot 10^{-32}$
3	11,34	$7,76 \cdot 10^{-92}$	$7,76 \cdot 10^{-98}$	$2,7 \cdot 10^{-33}$
2	10,08	$7,38 \cdot 10^{-92}$	$7,38 \cdot 10^{-98}$	$2,6 \cdot 10^{-33}$
1	8,88	$7,17 \cdot 10^{-93}$	$7,17 \cdot 10^{-99}$	$1,2 \cdot 10^{-33}$
TIL				
Dzień rozpoczęcia immunoterapii	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
9	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
4	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
3	12,29	$4,95 \cdot 10^{-90}$	$4,95 \cdot 10^{-96}$	$1,1 \cdot 10^{-32}$
2	10,04	$6,55 \cdot 10^{-92}$	$6,55 \cdot 10^{-98}$	$2,5 \cdot 10^{-33}$
1	8,8	$6,26 \cdot 10^{-93}$	$6,26 \cdot 10^{-99}$	$1,1 \cdot 10^{-33}$

Tab. 8.6: Dzień rozpoczęcia immunoterapii, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla IL-2 (przy dozowaniu TIL zgodnie z warunkami początkowymi (8.1)) oraz dla TIL (przy dozowaniu IL-2 zgodnie z warunkami początkowymi (8.1)).

Wnioski:

- dzień rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2) przy dozowaniu TIL zgodnie z warunkami początkowymi (Tab. 8.1) ma wpływ na skuteczność leczenia (wystąpienie regresji nowotworu lub jej brak); przy rozpoczęciu dozowania IL-2 w 5 dniu symulacji (4 dni wcześniej niż dla warunków początkowych (Tab. 8.1), gdzie nie następuje regresja) w 14 dniu symulacji występuje regresja nowotworu;
- dzień rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2) przy dozowaniu TIL zgodnie z warunkami początkowymi (Tab. 8.1) ma wpływ na czas wystąpienia regresji; od dnia rozpoczęcia dozowania IL-2 do dnia regresji mija 9 dni (z wyjątkiem rozpoczęcia dozowania IL-2 w pierwszym dniu - wtedy regresja następuje po 8 kolejnych dniach symulacji);
- dzień rozpoczęcia immunoterapii (dozowania TIL) przy dozowaniu IL-2 zgodnie z warunkami początkowymi (Tab. 8.1) ma wpływ na skuteczność leczenia (wystąpienie regresji nowotworu lub jej brak); przy rozpoczęciu dozowania TIL w 3

dniu symulacji (6 dni wcześniej niż dla warunków początkowych (Tab. 8.1), gdzie nie następuje regresja) w 13 dniu symulacji występuje regresja nowotworu;

- dzień rozpoczęcia immunoterapii (dozowania TIL) przy dozowaniu IL-2 zgodnie z warunkami początkowymi (Tab. 8.1) ma wpływ na czas wystąpienia regresji; rozpoczęcie dozowania TIL o 1 dzień wcześniej skutkuje skróceniem czasu koniecznego do wystąpienia regresji o 1 dzień, tj. dla rozpoczęcia leczenia w dzień: 3, 2 oraz 1 czas do regresji wynosi, odpowiednio: 10, 9 oraz 8 dni.

9. Leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii

W symulacji leczenia skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii badano:

- zmiany parametrów chemioterapii przy stałych wartościach parametrów immunoterapii,
- zmiany parametrów immunoterapii przy stałych wartościach parametrów chemioterapii,
- zmiany parametrów immunoterapii konieczne dla uzyskania określonych wartości parametrów chemioterapii.

9.1 Scenariusz I – zmiana cech chemioterapii

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od długości cyklu, wielkości dawki dozowanego cytostatyka, liczby powtórzeń cyklu oraz dnia rozpoczęcia chemioterapii.

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, dawkę dozowanego cytostatyka, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w tabeli 7.1. Warunki początkowe dla immunoterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania, schemat cyklu, dawkę dozowanego leku, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia immunoterapii dla IL-2 i TIL przedstawiono w tabeli 8.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniających się cech chemioterapii zebrano w tabelach 9.1, 9.2, 9.3, 9.4.

W tabeli 9.1 przedstawiono jak zmieniano długość cyklu chemioterapii (przerwę pomiędzy dozowaniem poszczególnych dawek), schemat cyklu, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni.

9.1.1 Zmiana długości cyklu chemioterapii

Długość cyklu [dni]	Schemat cyklu	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
4	[1 3]	13,25	$9,43 \cdot 10^{-95}$	$9,43 \cdot 10^{-101}$	$2,8 \cdot 10^{-34}$
8	[1 7]	14,79	$5,57 \cdot 10^{-95}$	$5,57 \cdot 10^{-101}$	$2,4 \cdot 10^{-34}$
20	[1 19]	16,08	$8,92 \cdot 10^{-92}$	$8,92 \cdot 10^{-98}$	$2,8 \cdot 10^{-33}$
50	[1 49]	16,08	$5,95 \cdot 10^{-89}$	$5,95 \cdot 10^{-95}$	$2,4 \cdot 10^{-32}$
100	[1 99]	16,08	$6,47 \cdot 10^{-88}$	$6,47 \cdot 10^{-94}$	$5,4 \cdot 10^{-32}$
200	[1 199]	16,08	$6,71 \cdot 10^{-87}$	$6,71 \cdot 10^{-93}$	$1,2 \cdot 10^{-31}$

Tab. 9.1: Długość oraz schemat cyklu chemioterapii, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla immunoterapii zgodnej z warunkami początkowymi (8.1).

Wnioski:

- zmiana długości cyklu chemioterapii w leczeniu skojarzonym wpływa na dzień nastąpienia regresji nowotworu, natomiast powyżej cyklu wynoszącego 20 dni (w tym 1 dzień dozowania cytostatyka i reszta dni przerwy), długość cyklu nie powoduje przyspieszenia regresji i zawsze występuje ona w 17 dniu symulacji;
- leczenie skojarzone zawierające chemioterapię o długości cyklu równej 4 dni i schemacie [1 3] umożliwia regresję nowotworu (dzień regresji: 14) podobnie jak w przypadku leczenia wyłącznie metodą chemioterapii (dzień regresji: 26), jednak regresja w tym przypadku następuje dużo wcześniej (12 dni);
- leczenie skojarzone zawierające chemioterapię o długości cyklu równej 8 dni i schemacie [1 7] umożliwia regresję nowotworu (dzień regresji: 15) co było niemożliwe w przypadku leczenia wyłącznie metodą chemioterapii, ponadto regresja w tym przypadku następuje zaledwie dzień później niż w przypadku cyklu o długości 4 dni przy dwukrotnie rzadszym dozowaniu cytostatyka;
- leczenie skojarzone umożliwia regresję nowotworu nawet przy długości cyklu równej 200 dni (co dla symulacji wynoszącej 120 dni jest równoznaczne z jednorazowym dozowaniem cytostatyka bez konieczności jego powtarzania).

W tabeli 9.2 przedstawiono jak zmieniano dawkę dozowanego cytostatyka V_M , dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla długości cyklu równej: 4, 8 oraz 200 dni.

9.1.2 Zmiana dawki dozowanego cytostatyka

Długość cyklu: 4 dni				
Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
5	13,25	$9,43 \cdot 10^{-95}$	$9,43 \cdot 10^{-101}$	$2,8 \cdot 10^{-34}$
4	13,5	$5,23 \cdot 10^{-94}$	$5,23 \cdot 10^{-100}$	$5 \cdot 10^{-34}$
3	13,92	$1,25 \cdot 10^{-92}$	$1,25 \cdot 10^{-98}$	$1,4 \cdot 10^{-33}$
2	14,54	$1,06 \cdot 10^{-90}$	$1,06 \cdot 10^{-96}$	$6,3 \cdot 10^{-33}$
1	16,5	$3,08 \cdot 10^{-88}$	$3,08 \cdot 10^{-94}$	$4,2 \cdot 10^{-32}$
0,75	17,75	$1,13 \cdot 10^{-86}$	$1,13 \cdot 10^{-92}$	$1,4 \cdot 10^{-31}$
0,5	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
Długość cyklu: 8 dni				
Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
5	14,79	$5,57 \cdot 10^{-95}$	$5,57 \cdot 10^{-101}$	$2,4 \cdot 10^{-34}$
4	15,08	$5,05 \cdot 10^{-94}$	$5,05 \cdot 10^{-100}$	$4,9 \cdot 10^{-34}$
3	15,67	$9,99 \cdot 10^{-93}$	$9,99 \cdot 10^{-99}$	$1,3 \cdot 10^{-33}$
2	16,92	$2,95 \cdot 10^{-90}$	$2,95 \cdot 10^{-96}$	$8,9 \cdot 10^{-33}$
1,75	17,34	$3,14 \cdot 10^{-89}$	$3,14 \cdot 10^{-95}$	$2 \cdot 10^{-32}$
1,5	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
1	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
Długość cyklu: 200 dni				
Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
5	16,08	$6,71 \cdot 10^{-87}$	$6,71 \cdot 10^{-93}$	$1,2 \cdot 10^{-31}$
4	16,25	$9,35 \cdot 10^{-87}$	$9,35 \cdot 10^{-93}$	$1,3 \cdot 10^{-31}$
3	16,63	$1,94 \cdot 10^{-86}$	$1,94 \cdot 10^{-92}$	$1,7 \cdot 10^{-31}$
2	17,88	$2,13 \cdot 10^{-85}$	$2,13 \cdot 10^{-91}$	$3,7 \cdot 10^{-31}$
1,75	19,42	$3,92 \cdot 10^{-84}$	$3,92 \cdot 10^{-90}$	$9,8 \cdot 10^{-31}$
1,5	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 9.2: Dawka dozowanego cytostatyka V_M , dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla immunoterapii zgodnej z warunkami początkowymi (8.1) dla długości cyklu równej 4, 8 oraz 200 dni.

W tabeli 9.3 przedstawiono jak zmieniano dawkę liczbę powtórzeń cyklu chemioterapii, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symu-

lacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla długości cyklu równej 8 dni oraz dawki cytostatyka $V_M = 1,75$.

9.1.3 Zmiana liczby powtórzeń cyklu chemioterapii

Długość cyklu: 8 dni, $V_M = 1,75$				
Liczba powtórzeń	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
9	17,34	$3,14 \cdot 10^{-89}$	$3,14 \cdot 10^{-95}$	$2 \cdot 10^{-32}$
8	17,34	$1,1 \cdot 10^{-88}$	$1,1 \cdot 10^{-94}$	$3 \cdot 10^{-32}$
7	17,34	$3,59 \cdot 10^{-88}$	$3,59 \cdot 10^{-94}$	$4,4 \cdot 10^{-32}$
6	17,34	$1,23 \cdot 10^{-87}$	$1,23 \cdot 10^{-93}$	$6,7 \cdot 10^{-32}$
5	17,34	$2,91 \cdot 10^{-87}$	$2,91 \cdot 10^{-93}$	$8,9 \cdot 10^{-32}$
4	17,34	$1,06 \cdot 10^{-86}$	$1,06 \cdot 10^{-92}$	$1,4 \cdot 10^{-31}$
3	17,34	$3,85 \cdot 10^{-86}$	$3,85 \cdot 10^{-92}$	$2,1 \cdot 10^{-31}$
2	17,67	$1,41 \cdot 10^{-85}$	$1,41 \cdot 10^{-91}$	$3,2 \cdot 10^{-31}$
1	19,42	$3,92 \cdot 10^{-84}$	$3,92 \cdot 10^{-90}$	$9,8 \cdot 10^{-31}$

Tab. 9.3: Liczba powtórzeń cyklu chemioterapii, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla immunoterapii zgodnej z warunkami początkowymi (8.1) dla długości cyklu równej 8 dni oraz dawki cytostatyka $V_M = 1,75$.

W tabeli 9.4 przedstawiono jak zmieniano dzień rozpoczęcia chemioterapii, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla długości cyklu równej 8 dni, dawki cytostatyka $V_M = 1,75$ oraz liczby powtórzeń cyklu równej 1.

9.1.4 Zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii

Długość cyklu: 8 dni, $V_M = 1,75$, liczba powtórzeń cyklu: 1				
Dzień rozpoczęcia chemioterapii	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
1	19,42	$3,92 \cdot 10^{-84}$	$3,92 \cdot 10^{-84}$	$9,8 \cdot 10^{-31}$
2	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 9.4: Dzień rozpoczęcia chemioterapii, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla immunoterapii zgodnej z warunkami początkowymi (8.1) dla długości cyklu równej 8 dni, dawki cytostatyka $V_M = 1,75$ oraz liczby powtórzeń cyklu chemioterapii równej 1.

9.2 Scenariusz II – zmiana cech immunoterapii

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od wielkości dawki IL-2, liczby powtórzeń cyklu IL-2 oraz dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2).

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, dawkę dozowanego cytostatyka, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w tabeli 7.1. Warunki początkowe dla immunoterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania, schemat cyklu, dawkę dozowanego leku, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia immunoterapii dla IL-2 i TIL przedstawiono w tabeli 8.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniających się parametrów chemioterapii przy stałej wartości parametrów immunoterapii zebrano w tabelach 9.5, 9.6, 9.7.

W tabeli 9.5 przedstawiono jak zmieniano wielkość dawki IL-2 V_I , dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla leczenia z wykorzystaniem TIL oraz bez wykorzystania TIL.

9.2.1 Zmiana dawki IL-2

Leczenie z wykorzystaniem TIL				
Dawka IL-2 V_I	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$5 \cdot 10^6$	14,79	$5,57 \cdot 10^{-95}$	$5,57 \cdot 10^{-101}$	$1,4 \cdot 10^{-34}$
$1 \cdot 10^6$	14,79	$5,46 \cdot 10^{-95}$	$5,46 \cdot 10^{-101}$	$2,4 \cdot 10^{-34}$
$9 \cdot 10^5$	14,79	$3,06 \cdot 10^{-95}$	$3,06 \cdot 10^{-101}$	$1,9 \cdot 10^{-34}$
0	14,79	$6,7 \cdot 10^{-35}$	$6,7 \cdot 10^{-41}$	$2,5 \cdot 10^{-14}$
Leczenie bez wykorzystania TIL				
Dawka IL-2 V_I	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$5 \cdot 10^6$	16,08	$3,69 \cdot 10^{-94}$	$3,69 \cdot 10^{-100}$	$4,5 \cdot 10^{-34}$
$4 \cdot 10^6$	16,08	$5,93 \cdot 10^{-94}$	$5,93 \cdot 10^{-100}$	$5,2 \cdot 10^{-34}$
$3 \cdot 10^6$	16,13	$6,64 \cdot 10^{-94}$	$6,64 \cdot 10^{-100}$	$5,4 \cdot 10^{-34}$
$2 \cdot 10^6$	16,42	$8,32 \cdot 10^{-94}$	$8,32 \cdot 10^{-100}$	$5,8 \cdot 10^{-34}$
$1 \cdot 10^6$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 9.5: Dawka IL-2 V_I , dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla chemioterapii zgodnej z warunkami początkowymi (7.1) i leczenia z wykorzystaniem TIL oraz bez wykorzystania TIL.

W tabeli 9.6 przedstawiono jak zmieniano liczbę powtórzeń cyklu IL-2, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla leczenia bez wykorzystania TIL oraz dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$.

9.2.2 Zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2 dla leczenia bez wykorzystania TIL

Leczenie bez wykorzystania TIL, $V_I = 2 \cdot 10^6$				
Liczba powtórzeń cyklu IL-2	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
5	16,42	$7,7 \cdot 10^{-94}$	$7,7 \cdot 10^{-100}$	$5,7 \cdot 10^{-34}$
4	16,42	$7,18 \cdot 10^{-94}$	$7,18 \cdot 10^{-100}$	$5,6 \cdot 10^{-34}$
3	16,42	$2,19 \cdot 10^{-93}$	$2,19 \cdot 10^{-100}$	$3,7 \cdot 10^{-34}$
2	16,42	$1,4 \cdot 10^{-93}$	$1,4 \cdot 10^{-100}$	$3,2 \cdot 10^{-34}$
1	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 9.6: Liczba powtórzeń cyklu IL-2, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla chemioterapii zgodnej z warunkami początkowymi (7.1) dla leczenia bez wykorzystania TIL oraz dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$.

W tabeli 9.7 przedstawiono jak zmieniano dzień rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2), dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla leczenia bez wykorzystania TIL, dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$ oraz liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 2.

9.2.3 Zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2) dla leczenia bez wykorzystania TIL

Leczenie bez wykorzystania TIL, $V_I = 2 \cdot 10^6$, liczba powtórzeń cyklu: 2				
Dzień rozpoczęcia immunoterapii	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
9	16,42	$1,4 \cdot 10^{-93}$	$3,14 \cdot 10^{-95}$	$2 \cdot 10^{-32}$
10	17,04	$3,9 \cdot 10^{-93}$	$1,1 \cdot 10^{-94}$	$3 \cdot 10^{-32}$
11	17,88	$4,77 \cdot 10^{-92}$	$3,59 \cdot 10^{-94}$	$4,4 \cdot 10^{-32}$
12	18,79	$8,94 \cdot 10^{-91}$	$1,23 \cdot 10^{-93}$	$6,7 \cdot 10^{-32}$
13	19,88	$3,42 \cdot 10^{-90}$	$2,91 \cdot 10^{-93}$	$8,9 \cdot 10^{-32}$
14	21,08	$1,19 \cdot 10^{-88}$	$1,06 \cdot 10^{-92}$	$1,4 \cdot 10^{-31}$
15	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 9.7: Dzień rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2), dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla chemioterapii zgodnej z warunkami początkowymi (7.1) dla leczenia bez wykorzystania TIL, dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$ oraz liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 2.

9.3 Scenariusz III – zmiany dawki IL-2 konieczne dla uzyskania określonych wartości parametrów chemioterapii

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od wielkości dawki IL-2 z równoczesnym wykorzystaniem TIL i określonymi wartościami parametrów chemioterapii.

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, dawkę dozowanego cytostatyka, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w tabeli 9.8. Warunki początkowe dla immunoterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania, schemat cyklu, dawkę dozowanego leku, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia immunoterapii dla IL-2 i TIL przedstawiono w tabeli 8.1.

Długość cyklu [dni]	Czas dozowania cytostatyka [dni]	Schemat cyklu	Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień rozpoczęcia chemioterapii
8	1	[1 7]	1	1	1
8	1	[1 7]	0,5	1	1

Tab. 9.8: Warunki początkowe chemioterapii dla modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniających się parametrów chemioterapii przy stałej wartości parametrów immunoterapii zebrano w tabeli 9.9.

W tabeli 9.9 przedstawiono jak zmieniano wielkość dawki IL-2, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni. Analizę przeprowadzono dla dawki dozowanego cytostatyka $V_M = 1$ oraz $V_M = 0,5$.

$V_M = 1$				
Dawka IL-2 V_I	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$5 \cdot 10^6$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$6 \cdot 10^6$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$7 \cdot 10^6$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$8 \cdot 10^6$	18,96	$1,72 \cdot 10^{-84}$	$1,72 \cdot 10^{-90}$	$7,4 \cdot 10^{-31}$
$V_M = 0,5$				
Dawka IL-2 V_I	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$5 \cdot 10^6$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$1 \cdot 10^7$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$2 \cdot 10^7$	18,25	$4,32 \cdot 10^{-85}$	$4,32 \cdot 10^{-91}$	$4,7 \cdot 10^{-31}$

Tab. 9.9: Dawka IL-2 V_I , dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla chemioterapii zgodnej z warunkami początkowymi (9.8) oraz leczenia z wykorzystaniem TIL.

9.4 Scenariusz IV – zmiany czasu wdrożenia poszczególnych terapii

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od czasu wdrożenia poszczególnych terapii.

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, dawkę dozowanego cytostatyka, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w tabeli 7.1. Warunki początkowe dla immunoterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania, schemat cyklu, dawkę dozowanego leku, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia immunoterapii dla IL-2 i TIL przedstawiono w tabeli 8.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 5.2 i 6.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniających się czasów wdrożenia poszczególnych terapii zebrano w tabeli 9.10.

W tabeli 9.10 przedstawiono jak zmieniano dzień rozpoczęcia chemioterapii (dozowania cytostatyka), dzień rozpoczęcia immunoterapii (dozowania TIL oraz bezpośrednio po tym dozowania IL-2), dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni.

Dzień rozpoczęcia chemioterapii	Dzień rozpoczęcia immunoterapii	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
1	8	13,25	$9,43 \cdot 10^{-95}$	$9,43 \cdot 10^{-101}$	$2,8 \cdot 10^{-34}$
1	brak	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
8	1	8,29	$2,26 \cdot 10^{-101}$	$2,26 \cdot 10^{-107}$	$1,8 \cdot 10^{-36}$
brak	1	8,8	$6,24 \cdot 10^{-93}$	$6,24 \cdot 10^{-99}$	$1,1 \cdot 10^{-33}$

Tab. 9.10: Dzień rozpoczęcia chemioterapii (dozowania cytostatyka) oraz immunoterapii (dozowania TIL oraz bezpośrednio po tym dozowania IL-2), dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla warunków początkowych (Tab. 7.1 oraz 8.1).

9.5 Scenariusz V – porównanie stanu układu immunologicznego u różnych pacjentów

Podejmowany problem:

Analiza zmian odpowiedzi układu immunologicznego (liczby komórek nowotworowych oraz komórek układu odpornościowego) w ostatnim dniu symulacji w zależności od początkowej wielkości nowotworu (liczby komórek nowotworowych).

Warunki początkowe:

Wielkość (tj. liczbę komórek) nowotworu $T(0)$, liczbę komórek NK $N(0)$, liczbę limfocytów T_{CD8+} oraz liczbę limfocytów krążących $C(0)$ ukazano w tabeli 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, dawkę dozowanego cytostatyka, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w tabeli 9.11. Warunki początkowe dla immunoterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania, schemat cyklu, dawkę dozowanego leku, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia immunoterapii dla IL-2 i TIL przedstawiono w tabeli 9.12.

Długość cyklu [dni]	Czas dozowania cytostatyka [dni]	Schemat cyklu	Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień rozpoczęcia chemioterapii
8	1	[1 7]	0,5	1	1

Tab. 9.11: Warunki początkowe chemioterapii dla modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii - porównanie układu immunologicznego u różnych pacjentów.

Lek: IL-2					
Długość cyklu [dni]	Czas dozowania leku [dni]	Schemat cyklu	Dawka dozowanego leku V_I	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień rozpoczęcia immunoterapii
0,5	0,3	[0,3 0,2]	$2 \cdot 10^7$	6	9

Lek: TIL					
Długość cyklu [dni]	Czas dozowania leku [dni]	Schemat cyklu	Dawka dozowanego leku V_L	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień rozpoczęcia immunoterapii
1	1	[1 0]	$1 \cdot 10^9$	1	8

Tab. 9.12: Warunki początkowe immunoterapii dla modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii - porównanie układu immunologicznego u różnych pacjentów.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w tabelach 6.2 oraz 9.13.

Pacjent 2			
Nazwa	Wartość	Nazwa	Wartość
a	$4,31 \cdot 10^{-1}$	k	$5,66 \cdot 10^7$
b	$1,02 \cdot 10^{-9}$	m	9,12
c	$6,41 \cdot 10^{-11}$	q	$1,59 \cdot 10^{-6}$
d	1,88	p	$3,59 \cdot 10^{-6}$
e	$2,08 \cdot 10^{-7}$	s	$5,12 \cdot 10^{-1}$
l	1,81	r_1	$1,1 \cdot 10^{-7}$
f	$4,12 \cdot 10^{-2}$	r_2	$6,5 \cdot 10^{-11}$
g	$1,25 \cdot 10^{-2}$	u	$3 \cdot 10^{-10}$
h	$2,02 \cdot 10^7$	α	$5 \cdot 10^8$
j	$2,49 \cdot 10^{-2}$	β	$8 \cdot 10^{-3}$

Tab. 9.13: Parametry modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia - wartości.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

Wyniki przeprowadzonych symulacji dla pacjentów 1 oraz 2 zebrano w tabeli 9.14.

W tabeli 9.14 przedstawiono dzień regresji nowotworu, liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni dla pacjentów 1 oraz 2.

Pacjent	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
1	18,25	$4,32 \cdot 10^{-85}$	$4,32 \cdot 10^{-91}$	$4,7 \cdot 10^{-31}$
2	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16

Tab. 9.14: Pacjenci 1 oraz 2, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla warunków początkowych (Tab. 9.11 i 9.12).

10. Rezultaty

11. Analiza wyników

12. Podsumowanie

13. Rozwój

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

- [12] Ewa Sikora, „Cykl komórkowy i apoptoza: śmierć starej komórki”, Polskie Towarzystwo Biochemiczne, „Postępy biochemii”, tom 42, nr 2, 1996
- [13] Izabela Klaska, Jerzy Z. Nowak, „Rola układu dopełniacza w fizjologii i patologii”, Łódź, 2007
- [14] dr hab. Krzysztof Bryniarski, „Immunologia”, 2017
- [15] Włodzimierz Maśliński, Ewa Kontny, „Podstawy immunologii dla reumatologów”, Narodowy Instytut Geriatrii, Reumatologii i Rehabilitacji, Warszawa, 2015
- [16] Aleksandra E. Tokarz, Iwona Szuścik, Agnieszka Żyłka, Ewa Stępień, „Wykorzystanie mikromacierzy w ocenie prozapalnych i proangiogennych cytokin w patomechanizmie retinopatii cukrzycowej”, 2014
- [17] K. Morka, G. Bugla-Płoskońska, „Medycyna doświadczalna i mikrobiologia”, 2017
- [18] O.G. Isaeva and V.A. Osipov, „Different strategies for cancer treatment: Mathematical modelling”, 2009
- [19] L.G. de Pillis, W. Gu, A.E. Radunskay, „Mixed immunotherapy and chemotherapy of tumors: modeling, applications and biological interpretations”, 2005
- [20] Krzysztof Wiktorowicz, Krzysztof Kaszkowiak, „Budowa i funkcja ludzkich antygenów zgodności tkankowej. Część 1. Kodowanie i budowa”, Katedra Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, 2018
- [21] Dominik Strzelecki, Tomasz Pawełczyk, Jolanta Rabe-Jabłońska, „Zaburzenia depresyjne w przebiegu leczenia przewlekłego wirusowego zapalenia wątroby interferonem α ”, Postępy Psychiatrii i Neurologii, 2005
- [22] Waldemar Halota, Małgorzata Pawłowska, Michał Andrejczyn, „Interferony alfa w leczeniu przewlekłych zakażeń HCV”, Przegląd epidemiologiczny, 2004
- [23] Ugo Del Monte, „Does the cell number 10^9 still really fit one gram of tumor tissue?”, Cell Cycle, 8:3, 505-506, 2009
- [24] Marcus C.B. Tan, Peter S. Goedegebuure, Timothy J. Eberlein, „Chirurgia onkologiczna część V”, Chirurgia Sabistona, rozdział 29 „Biologia nowotworów i markery nowotworowe”, 2012
- [25] Monika Olszówka, Kamil Maciąg, „Choroby nowotworowe: wybrane zagadnienia”, Fundacja na rzecz promocji nauki i rozwoju TYGIEL, Lublin, 2015
- [26] Elżbieta Ograczyk, Magdalena Kowalewicz-Kulbat, Sebastian Wawrocki, Marek Fol, „Immunosupresja – wymagający sprzymierzeniec na trudne czasy”, Uniwersytet Łódzki, Katedra Immunologii i Biologii Infekcyjnej, Łódź, 2015

- [27] Zdzisław Gliški, Krzysztof Kostro, „Immunoonkologia – nowe dane”, *Życie Weterynaryjne* 91(11), Wydział Medycyny Weterynaryjnej w Lublinie, 2016
- [28] Lek. med. Marta Adamczyk-Korbel, „Układ odpornościowy człowieka a probiotyki”, *Klinika Pneumonologii, Onkologii i Alergologii*, Lublin, Medycyna i pasje, Medycyna zapobiegawcza, luty 2010
- [29] Zuzanna Wyszynska, Lidia Szulc, Justyna Struzik, Marek Niemiałtowski, „Immunobiologia komórek NK”, *Zakład Immunologii Katedry Nauk Przedklinicznych Wydziału Medycyny Weterynaryjnej SGGW*, Warszawa, 2012
- [30] Tomasz Jerzy Ślebioda, Lucyna Kaszubowska, Zbigniew Kmiec, „Nowe mechanizmy aktywacji komórek NK w przebiegu infekcji wirusowych”, *Katedra i Zakład Histologii*, Gdański Uniwersytet Medyczny, 2012
- [31] Paulina Kwaśnik, Marta Kinga Lemieszek, Wojciech Rzeski, „Możliwości wykorzystania komórek NK w immunoterapii nowotworów”, *Medycyna Ogólna i Nauki o Zdrowiu* 2020, Tom 26, Nr 1, 8–16
- [32] Marta Sochocka, „Rozpoznawanie patogenów przez wrodzony system odporności”, *Laboratorium Wirusologii, Instytut Immunologii i Terapii Doświadczalnej PAN im. L. Hirszfelda we Wrocławiu, Postepy Hig Med Dosw. (online)*, 2008; 62: 676-687
- [33] Anna Głobińska, Marek L. Kowalski, „Interferon alfa: perspektywy zastosowania w leczeniu wirusowych zakażeń dróg oddechowych”, *Klinika Immunologii, Reumatologii i Alergii, Katedra Immunologii Klinicznej i Mikrobiologii Uniwersytet Medyczny w Łodzi*, 2013
- [34] Brygida Knysz, Jacek Gąsiorowski, Małgonata Inglot, Weronika Rymer, Aleksandra Szymczak, Andrzej Gładysz, „Rola i zastosowanie terapeutyczne interleukiny 2 w zakażeniu HIV”, *Katedra i Klinika Chorób Zakaźnych Akademii Medycznej we Wrocławiu, Przegląd Epidemiologiczny*, 2002; 56:587-93
- [35] Anna Skoczyńska, Rafał Poręba, Adrian Sieradzki, Ryszard Andrzejak, Urszula Sieradzka, „Wpływ ołowiu i kadmu na funkcje układu immunologicznego”, *Katedra i Klinika Chorób Wewnętrznych i Zawodowych Akademii Medycznej we Wrocławiu, Medycyna Pracy*, 2002, 53; 3; 259-264
- [36] Renata Zajączkowska, Jerzy Wordliczek, Wojciech Leppert, „Mechanizmy i zespoły bólu neuropatycznego u chorych na nowotwór”, *Medycyna Paliatywna w Praktyce* 2014; 8, 2: 66–73
- [37] Beata Zdunek, Monika Olszówka, „Najnowsze badania z zakresu chorób nowotworowych”, Lublin 2016
- [38] Marek Z. Wojtukiewicz, Zbigniew Sawicki, Ewa Sierko, Anna Kieszkowska-Grudny, „Zespół przewlekłego zmęczenia u chorych na nowotwory poddawanych chemioterapii”, *Nowotwory, Journal of Oncology*, 6, 695-701, 2007

-
- [39] dr n. med. Jarosław Strychar, „Zaburzenia czucia kończyn górnych”, Ursynowskie Centrum Zabiegowe
- [40] Andrzej Szczudlik, Monika Rudzińska, „Atlas ataksji”, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 2010
- [41] Kamila Wojaś-Krawczyk, Paweł Krawczyk, „Rozwój koncepcji przeciwnowotworowej immunoterapii”, Katedra i Klinika Pneumonologii, Onkologii i Alergologii Uniwersytetu Medycznego, Onkologia w Praktyce Klinicznej 2015, tom 11, nr 2, 69–75, Lublin, 2015
- [42] <https://www.focus.pl/artukul/naukowcy-ktos-w-walii-ma-krew-ktora-zabija-wiekszosc-typow-raka>
- [43] <https://healthcare-in-europe.com/en/news/new-t-cell-could-make-universal-cancer-therapy-possible.html>

14. Dodatek

14.1 Tabela skrótów

Tab. 14.1: Skróty wykorzystane w pracy

Skrót	Nazwa angielska	Nazwa polska
TIL	Tumor Infiltrating Lymphocytes	Limfocyty naciekające nowotwór
NK	Natural killers	Naturalni zabójcy
IL-2	Interleukina-2	Interleukina-2
INF- α	Interferon- α	Interferon- α
MBL	Mannose Binding Lectin	Lektyna wiążąca mannozę
APC	Antigen Presenting Cells	Komórki prezentujące antygen
NCRs	Natural Cytotoxicity Receptors	Receptory naturalnej cytotoxyczności
KIR	Killer cells Inhibitory Receptor	Receptor hamujący zabójcze komórki
ISRE	Interferon-Stimulated Response Element	Element odpowiedzi stymulowanej przez interferon
TCGF	T Cell Growth Factor	Czynnik wzrostu komórek T
FDA	Food and Drug Administration	Agencja żywności i leków
AICD	Activation-Induced Cell Death	Śmierć komórek indukowana aktywacją
TNF $_{\alpha}$	Tumor Necrosis Factor α	Czynnik martwicy guza α
CIPN	Chemotherapy-Induced Peripheral Neuropathy	Obwodowa polineuropatia wywołana chemioterapią
LAK	Lymphokine Activated Killers	Komórki zabójcze aktywowane limfokiną
HSP	Heat Shock Protein	Białka szoku cieplnego
DC	Dendritic cells	Komórki dendrytyczne
TSA	Tumor Specific Antigens	Antygeny swoiste dla nowotworu
CARs	Chimeric Antigen Receptors	Chimeryczne receptory dla specyficznych antygenów nowotworowych