

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	20
4.1 Założenia modelu	20
4.2 Model nieuwzględniający procesu leczenia	22
4.2.1 Równania i opis modelu	22
4.3 Model uwzględniający proces leczenia	25
4.3.1 Równania i opis modelu	25
5. Symulacje - brak leczenia	27
5.1 Scenariusz I – symulacja wykonana dla modelu nieleczzonego guza	29
5.2 Scenariusz II – symulacja wykonana dla modelu nieleczzonego guza	33
6. Symulacje - leczenie	36

7. Leczenie metodą chemioterapii – symulacje wykonane dla modelu leczonego guza	37
7.1 Scenariusz I – zmiana długości cyklu	38
7.2 Scenariusz II – zmiana dawki dozowanego cytostatyka	42
7.3 Scenariusz III – zmiana dawki dozowanego cytostatyka w kolejnych powtórzeniach cyklu	46
7.4 Scenariusz IV – zmiana liczby powtórzeń cyklu	49
7.5 Scenariusz V – zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii (dozowania cytostatyka)	53
8. Leczenie metodą immunoterapii – symulacje wykonane dla modelu leczonego guza	56
8.1 Scenariusz I – zmiana początkowej wielkości guza	57
8.2 Scenariusz II – zmiana dawki IL-2	60
8.3 Scenariusz III – zmiana dawki TIL	64
8.4 Scenariusz IV – zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2	68
8.5 Scenariusz V – zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii	71
9. Leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii	75
9.1 Scenariusz I – zmiana cech chemioterapii	77
9.1.1 Zmiana długości cyklu chemioterapii	78
9.1.2 Zmiana dawki dozowanego cytostatyka	80
9.1.3 Zmiana liczby powtórzeń cyklu chemioterapii	84
9.1.4 Zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii	86
9.2 Scenariusz II – zmiana cech immunoterapii	88
9.2.1 Zmiana dawki IL-2	89
9.2.2 Zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2 dla leczenia bez wykorzystania TIL	92
9.2.3 Zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2) dla leczenia bez wykorzystania TIL	94
9.3 Scenariusz III – zmiany dawki IL-2 konieczne dla uzyskania określonych wartości parametrów chemioterapii	96
9.4 Scenariusz IV – zmiany czasu wdrożenia poszczególnych terapii	100
9.5 Scenariusz V – porównanie stanu układu immunologicznego u różnych pacjentów	104
10. Podsumowanie	108
11. Perspektywy rozwoju	109
11.1 Interferony	109
11.2 Nowa odmiana limfocytów typu T	110
12. Dodatek	115
12.1 Tabela skrótów	115

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).	28
5.2	Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni. Liczba komórek nowotworowych oraz długość promienia nowotworu [mm] w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$	30
5.3	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji - brak leczenia, scenariusz I	31
5.4	Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni. Liczba komórek nowotworowych oraz długość promienia nowotworu [mm] w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby krążących limfocytów $C(0)$	34
5.5	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji - brak leczenia, scenariusz II	35
7.1	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytostatyka - chemioterapia, scenariusz I, zmiana długości cyklu	40
7.2	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytostatyka - chemioterapia, scenariusz II, zmiana dawki V_M dozowanego cytostatyka	44
7.3	Dzień regresji nowotworu w zależności od dawki dozowanego cytostatyka.	45
7.4	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytostatyka - chemioterapia, scenariusz III, zmiana dawki V_M dozowanego cytostatyka w kolejnych powtórzeniach cyklu	48
7.5	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytostatyka - chemioterapia, scenariusz IV, zmiana liczby powtórzeń cyklu chemioterapii	51
7.6	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytostatyka - chemioterapia, scenariusz V, zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii	55

8.1	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia IL-2 - immunoterapia, scenariusz I, zmiana wielkości guza w dniu rozpoczęcia immunoterapii	59
8.2	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia IL-2 - immunoterapia, scenariusz II, zmiana dawki V_I IL-2	62
8.3	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia IL-2 - immunoterapia, scenariusz III, zmiana dawki V_L TIL	66
8.4	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia IL-2 - immunoterapia, scenariusz IV, zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2 dla leczenia z wykorzystaniem TIL	70
8.5	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia IL-2 - immunoterapia, scenariusz V, zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2 lub TIL)	73
9.1	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytotatyka i IL-2 - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii	76
9.2	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytotatyka i IL-2 - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana długości cyklu	79
9.3	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytotatyka i IL-2 - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana dawki V_M dozowanego cytostatyka	82
9.4	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytotatyka i IL-2 - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana liczby powtórzeń cyklu chemioterapii	85
9.5	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytotatyka i IL-2 - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii	87
9.6	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytotatyka i IL-2 - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz II, zmiana dawki V_I IL-2	90
9.7	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytotatyka i IL-2 - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz II, zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2 dla leczenia bez wykorzystania TIL	93
9.8	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytotatyka i IL-2 - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz II, zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2) dla leczenia bez wykorzystania TIL	95
9.9	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cytotatyka i IL-2 - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz III, zmiany dawki V_I IL-2 konieczne do uzyskania określonych warunków chemioterapii (9.9)	98

9.10	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cyto- statyka i IL-2 - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immu- noterapii, scenariusz IV, zmiany czasu wdrożenia poszczególnych terapii	102
9.11	Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia cyto- statyka i IL-2 - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immu- noterapii, scenariusz V, porównanie stanu układu immunologicznego u różnych pacjentów	107

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.	24
4.2	Dodatkowe parametry modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia.	26
5.1	Warunki początkowe modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia.	27
5.2	Wartości parametrów modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia dla pacjenta 1. . .	27
5.3	Wyniki symulacji - brak leczenia, scenariusz I	29
5.4	Wyniki symulacji - brak leczenia, scenariusz II	33
6.1	Warunki początkowe dla modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia.	36
6.2	Wartości dodatkowych parametrów modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia. . .	36
7.1	Warunki początkowe modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia za pomocą chemioterapii.	37
7.2	Wyniki symulacji - chemioterapia, scenariusz I, zmiana długości cyklu .	39
7.3	Wyniki symulacji - chemioterapia, scenariusz II, zmiana dawki V_M dozowanego cytostatyka	43
7.4	Wyniki symulacji - chemioterapia, scenariusz III, zmiana dawki V_M dozowanego cytostatyka w kolejnych powtórzeniach cyklu	47
7.5	Wyniki symulacji - chemioterapia, scenariusz IV, zmiana liczby powtórzeń cyklu chemioterapii	50
7.6	Wyniki symulacji - chemioterapia, scenariusz V, zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii	54
8.1	Warunki początkowe modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia za pomocą immunoterapii.	56
8.2	Wyniki symulacji - immunoterapia, scenariusz I, zmiana wielkości guza w dniu rozpoczęcia immunoterapii	57

8.3	Wyniki symulacji - immunoterapia, scenariusz II, zmiana dawki V_I IL-2	61
8.4	Wyniki symulacji - immunoterapia, scenariusz III, zmiana dawki V_L TIL	65
8.5	Wyniki symulacji - immunoterapia, scenariusz IV, zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2 dla leczenia z wykorzystaniem TIL	69
8.6	Wyniki symulacji - immunoterapia, scenariusz V, zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2 lub TIL)	72
9.1	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana długości cyklu	78
9.2	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana dawki V_M dozowanego cytostatyka .	81
9.3	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana liczby powtórzeń cyklu chemioterapii	84
9.4	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz I, zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii	86
9.5	Warunki początkowe modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia za pomocą chemioterapii.	88
9.6	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz II, zmiana dawki V_I IL-2	89
9.7	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz II, zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2 dla leczenia bez wykorzystania TIL	92
9.8	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz II, zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2) dla leczenia bez wykorzystania TIL	94
9.9	Warunki początkowe chemioterapii dla modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii.	96
9.10	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz III, zmiany dawki V_I IL-2 konieczne do uzyskania określonych warunków chemioterapii (9.9)	97
9.11	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz IV, zmiany czasu wdrożenia poszczególnych terapii	101
9.12	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.	104
9.13	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.	105

9.14	Wartości parametrów modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia dla pacjenta 2. . .	105
9.15	Wyniki symulacji - leczenie skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii, scenariusz V, porównanie stanu układu immunologicznego u różnych pacjentów	106
12.1	Skróty wykorzystane w pracy	115

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 komórek nowotworowych mogą oderwać się od pozostałych, przedostać się 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 wielkości zmiany, jak i miejsca, w którym wystąpiła [3].

Transformacja komórkowa oznacza wielostopniowy proces, podczas którego na każdym etapie zachodzą zmiany genetyczne prowadzące do zaburzeń wzrostu komórek prawidłowych [24].

Na powierzchni komórek nowotworowych pojawiają się zmienione albo obce antygeny, a także zanikają cząsteczki charakterystyczne dla 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 detekcją przez układ immunologiczny. Na tej nierozpoznawalności skupia się immunoterapia, która jest jednym ze sposobów leczenia nowotworów [31].

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

- samowystarczalnością w wytwarzaniu sygnałów do wzrostu,
- niewrażliwością na inhibitory sygnałów wzrostu,
- unikaniem programowanej śmierci,
- 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 (tj. na skutek zmian w systemach regulujących), 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 zawiodą mechanizmy odporności wrodzonej, czyli np. nie zapobiegają wnikaniu lub nie usuną patogenu [20].

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

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 zakaźnych wirusem
Swoista (nabyta)	Humoralna	Immunoglobuliny	
		Limfocyty typu B	
	Komórkowa	Limfocyty typu T	

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

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

² Limfocyty typu B – wyspecjalizowane komórki układu immunologicznego, których główna funkcja to wytwarzanie 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 oraz 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 wielko-cząsteczkowe, 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]. 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]. 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].

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 ekspresji 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 czynnika martwicy guza TNF (ang. Tumor Necrosis Factor).

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. Uwalniane cytokiny będące skutkiem zachodzących interakcji, równocześnie mobilizują komórki biorące udział w interakcji oraz pobudzają je do efektywnego niszczenia komórek nowotworowych [31].

Charakterystyczną cechą komórek NK jest brak markerów czy receptorów antygenowych na ich 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 w sytuacji, gdy 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. Głównymi regulatorami aktywności komórek NK są cząsteczki MHC klasy I. 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. 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. Ich wyspecjalizowaną funkcją jest bezpośrednie atakowanie obcych antygenów, na przykład wirusów czy grzybów. Pełnią także funkcję regulatorową w obrębie układu immunologicznego [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. Zwykle, komórkami prezentującymi antygen APC (ang. Antigen Presenting Cells) są limfocyty typu B, komórki dendryczne oraz makrofagi. Natomiast, pozostałe komórki prezentujące antygen to 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 jak również 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



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

wzrasta liczba limfocytów CD4+, natomiast zmniejsza się liczba limfocytów supresyjnych i cytotoksycznych CD8+ [4].

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. 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, która jest odpowiedzialna za różnicowanie i cytolityczną aktywność dojrzałych 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 komórkami dendrytycznymi DC (ang. Dendritic Cells), która zależy od działania cytokin: 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 jest niezbędnym

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, ujawniającą się zahamowaniem wytwarzania cytokin [26].

czynnikiem w utrzymaniu homeostazy komórek NK [31].

IL-2 zidentyfikowano po raz pierwszy jako czynnik wzrostu TCGF komórek T (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 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 L-21 aktywują komórki NK i limfocyty CTL, stymulując równocześnie ich cytotoksyczność [15].

W [31] 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 śródbłonna oraz niektóre komórki no-

wotworowe. 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 obecności nowotworów. Innymi prozapalnymi cytokinami są m. in.: czynnik martwicy guza alfa TNF_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 pogorszenia kondycji zdrowotnej, 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, u których pojawiające się 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 [9]. Leki cytostatyczne działają w określonych fazach podziału komórek nowotworowych, zmniejszając lub spowalniając ich proliferację. Najczęściej podawane są w postaci dożylnych wlewów. 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 cyklu. 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 [3].

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 na cytostatyki tkanek prawidłowych. Stosowanie przerw pomiędzy kolejnymi etapami chemioterapii jest uzasadnione faktem, że dynamika wzrostu komórek nowotworowych jest mniejsza niż szybko proliferujących komórek prawidłowych. Kombinacje obejmujące więcej niż trzy leki tworzą ryzyko wystąpienia niebezpiecznych wzajemnych interakcji, dlatego tak złożone programy są w chemioterapii wyjątkami [3].

Największym ograniczeniem skuteczności leczenia metodą chemioterapii jest lekooporność komórek nowotworowych. Istnieją liczne mechanizmy oporności, która często zależy od interakcji kilku z nich. Można wyróżnić mechanizmy: komórkowe, biochemiczne oraz anatomiczne [3]. 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 wsku-

tek 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 skutkiem ubocznym 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, co w konsekwencji wywołuje ból neuropatyczny.

W przypadku pochodnych platyny, ból zazwyczaj występuje kilka tygodni po rozpoczęciu chemioterapii, a czasem utrzymuje się nawet przez kilka miesięcy po jej zakończeniu. Na początku pojawia się ból i parestezje¹ części kończyn, które mogą ulec nasileniu wraz z objawami ataksji² czuciowej. W ostrym okresie neurotoksyczności, objawom tym mogą towarzyszyć 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, która 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].

Zdecydowaną zaletą leczenia immuno-onkologicznego w porównaniu do metod chirurgicznych, chemioterapii czy radioterapii jest mniejsza inwazyjność oraz mniejsze szkody dla organizmu przy takich samych lub lepszych efektach leczniczych. Podstawą immunoterapii są następujące działania [27]:

- wykrywanie przez układ odpornościowy komórek nowotworowych jako obce dla organizmu, dzięki antygenom TSA (ang. Tumor Specific Antigens) swoistym dla nowotworu,
- selektywne niszczenie zidentyfikowanych komórek nowotworowych przy jednoczesnym zachowaniu komórek prawidłowych.

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

² Ataksja – beład lub niezborność 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].

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 takiego 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 pozyskiwania 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 wydzielać IL-2, powodując liżę komórek nowotworowych, posiadających odpowiedni antygen nowotworowy. Ponadto, w przypadku aktywacji z wykorzystaniem CARs, nie jest konieczna prezentacja antygeny przez wyspecjalizowane w tym celu komórki [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 limfokiną LAK (ang. Lymphokine Activated Killers), TIL oraz komórki DC. 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 zwrótnie pacjentowi. W immunoterapii adoptywnej należy każdorazowo opracować procedury pozyskania i modyfikacji komórek pacjenta. Najwięcej trudności pod tym względem stwarzają wysocze zindywidualizowane komórki DC [41].

Skuteczność leczenia metodą immunoterapii jest zależna od różnych mechanizmów niszczenia komórek nowotworowych oraz różnych swoistych (zmiennych) dla nich markerów powierzchniowych. Za niszczenie kontroli immunologicznej nowotworzenia odpowiadają limfocyty regulatorowe $T_{reg}FoxP3+$ stanowiące tym samym jedną z najważniejszych barier w działaniu immuno-onkologicznym [27]. 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 niszczona 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 (T), populacja komórek NK (N), populacja limfocytów T_{CD8+} (L) oraz populacja limfocytów krążących (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 Tab. 4.1.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{dt} = aT(1 - bT) - cNT - DT, \\ \frac{dN}{dt} = eC - fN + g\frac{T^2}{h + T^2}N - pNT, \\ \frac{dL}{dt} = -mL + j\frac{D^2T^2}{k + D^2T^2}L - qLT + (r_1N + r_2C)T - uNL^2, \\ \frac{dC}{dt} = \alpha - \beta C, \end{array} \right. \quad (4.1)$$

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.

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

Nazwa	Jednostka	Opis
a	dzień^{-1}	Tempo wzrostu nowotworu
b	komórka^{-1}	Odwrotność pojemności środowiska
c	$\text{dzień}^{-1} \cdot \text{komórka}^{-1}$	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	$\text{dzień}^{-1} \cdot \text{komórka}^{-1}$	Tempo dezaktywacji limfocytów T_{CD8+} przez komórki nowotworu
p	$\text{dzień}^{-1} \cdot \text{komórka}^{-1}$	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	$\text{dzień}^{-1} \cdot \text{komórka}^{-1}$	Tempo stymulacji wytwarzania limfocytów T_{CD8+} jako rezultat niszczenia komórek nowotworowych przez komórki NK
r_2	$\text{komórka}^{-1} \cdot \text{dzień}^{-1}$	Tempo stymulacji wytwarzania limfocytów T_{CD8+} jako rezultat interakcji komórek nowotworowych z krążącymi limfocytami
u	$\text{komórka}^{-2} \cdot \text{dzień}^{-1}$	Współczynnik funkcji komórek NK regulującej limfocyty T_{CD8+}
α	$\text{komórka} \cdot \text{dzień}^{-1}$	Stała liczba krążących limfocytów
β	dzień^{-1}	Tempo wyniszczania krążących limfocytów

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 Tab. 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 .

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

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)

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].

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

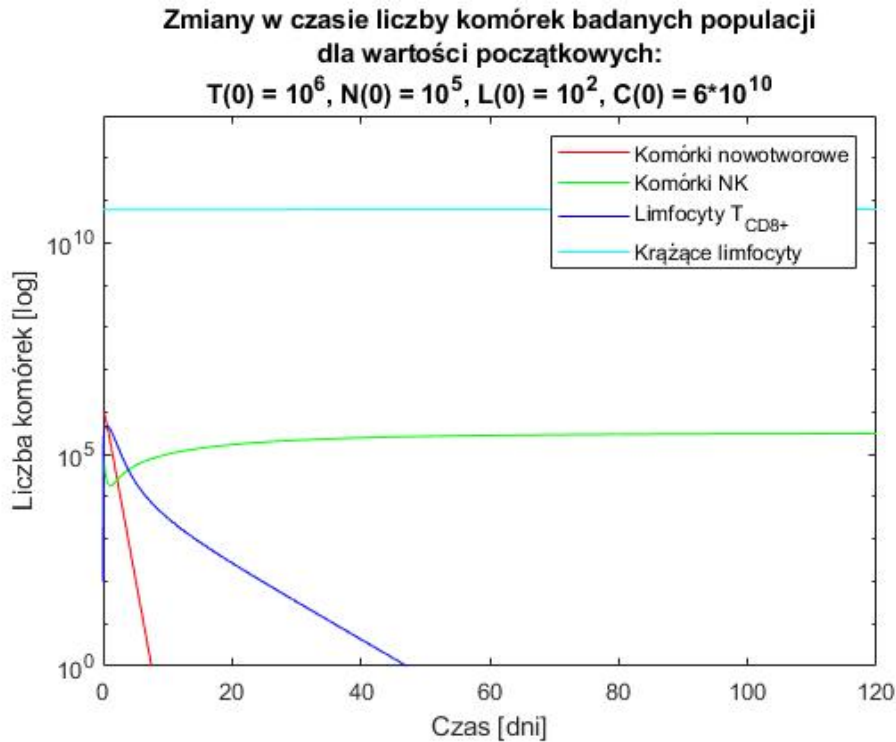
Wartość [<i>liczba komórek</i>]	Rodzaj komórek	Promień nowotworu [<i>mm</i>]
$T(0) = 1 \cdot 10^6$	Komórki nowotworowe	0,62
$N(0) = 1 \cdot 10^5$	Komórki NK	
$L(0) = 1 \cdot 10^2$	Limfocyty T_{CD8+}	
$C(0) = 6 \cdot 10^{10}$	Limfocyty krążące	

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].

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

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	$1,2 \cdot 10^{-2}$

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) przedstawia 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 Tab. 5.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu nieuwzględniającego leczenia ukazano w Tab. 5.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

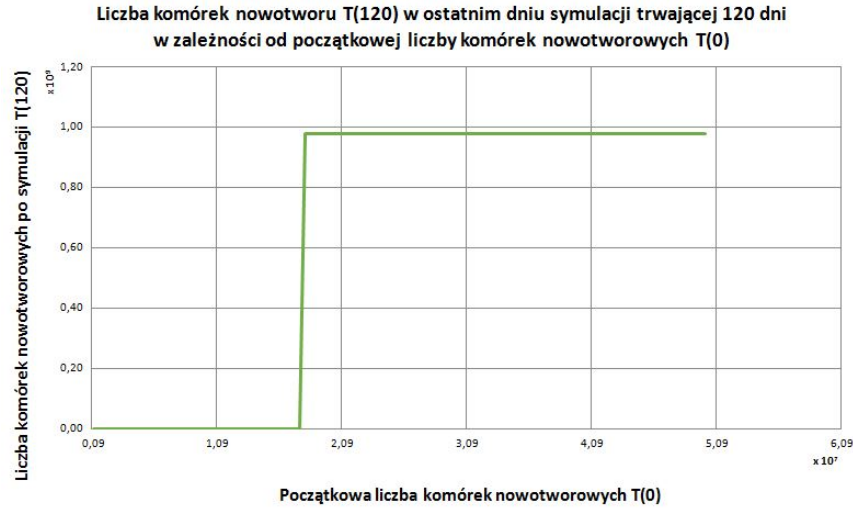
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$ zebrano w Tab. 5.3.

W Tab. 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.

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.

$T(0)$ [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

Zmiany wielkości nowotworu otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$ przedstawiono na Rys. 5.2a. Na Rys. 5.2b pokazano zmiany długości promienia nowotworu otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$.



(a) 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 $T(0)$.



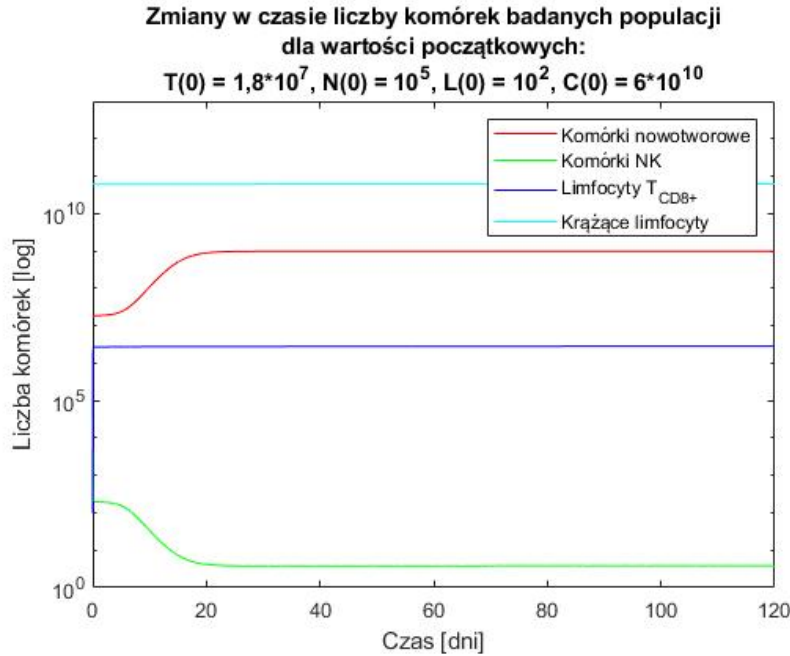
(b) Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji

$T_k = 120$ dni. Długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$.

Rys. 5.2: Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni. Liczba komórek nowotworowych oraz długość promienia nowotworu [mm] w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$.

Rys. 5.3 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. 5.3: 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 $9,8 \cdot 10^8$.

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 Tab. 5.1.

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu nieuwzględniającego leczenia ukazano w Tab. 5.2.

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

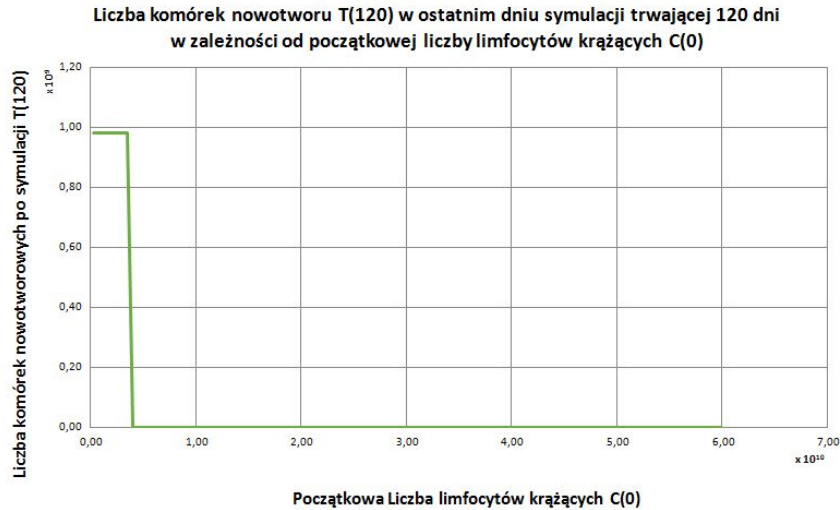
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się początkowej liczby limfocytów krążących $C(0)$ zebrano w Tab. 5.4.

W Tab. 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.

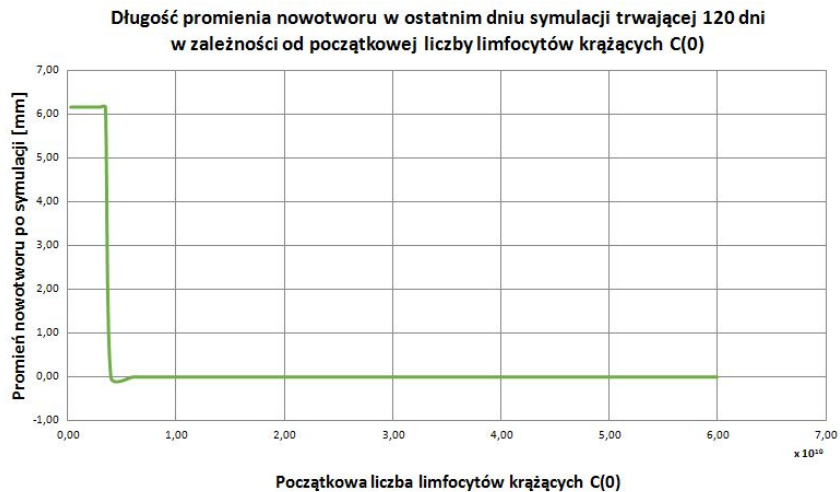
Tab. 5.4: Początkowa liczba limfocytów krążących $C(0)$, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni.

$C(0)$ [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

Zmiany w czasie wielkości nowotworu otrzymane w ostatnim dniu symulacji trwającej $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby krążących limfocytów $C(0)$ przedstawiono na Rys. 5.4a. Rys. 5.4b pokazuje zmiany długości promienia nowotworu otrzymane na koniec symulacji trwającej $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby krążących limfocytów $C(0)$.



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

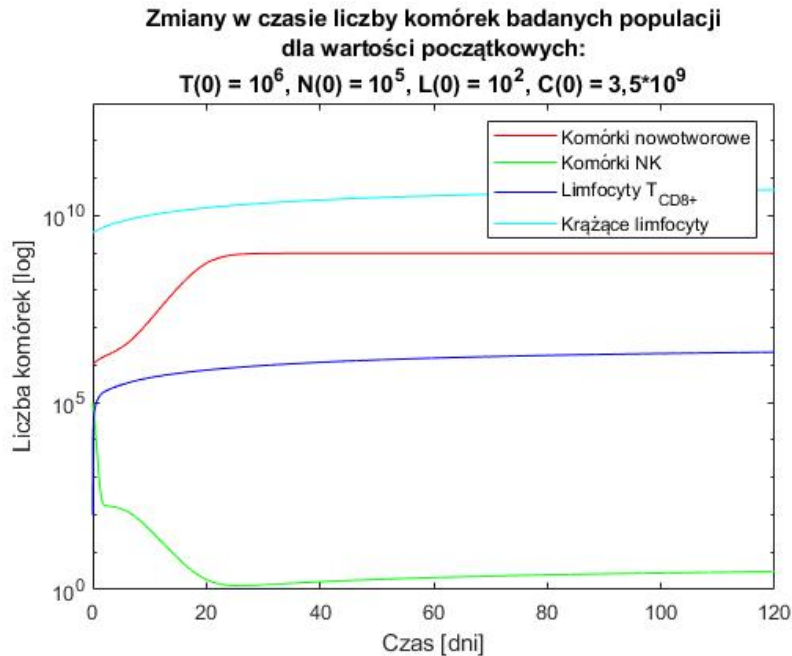


(b) Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni. Długość promienia nowotworu na koniec symulacji w zależności od początkowej liczby krążących limfocytów $C(0)$.

Rys. 5.4: Wyniki otrzymane w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni. Liczba komórek nowotworowych oraz długość promienia nowotworu [mm] w ostatnim dniu symulacji $T_k = 120$ dni w zależności od początkowej liczby krążących limfocytów $C(0)$.

Rys. 5.5 prezentuje sytuację, w której układ immunologiczny ze względu na zmniej-

szoną liczbę krążących limfocytów jest zbyt słaby, by zniszczyć komórki nowotworu. Liczba komórek nowotworowych rośnie i po 28 dniach stabilizuje się około wartości $9,8 \cdot 10^8$ (odpowiada to objętości 980 mm^3 i długości promienia $6,16 \text{ mm}$).



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 $9,8 \cdot 10^8$.

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.

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

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	

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

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

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

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.

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

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

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 Tab. 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 Tab. 7.1.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

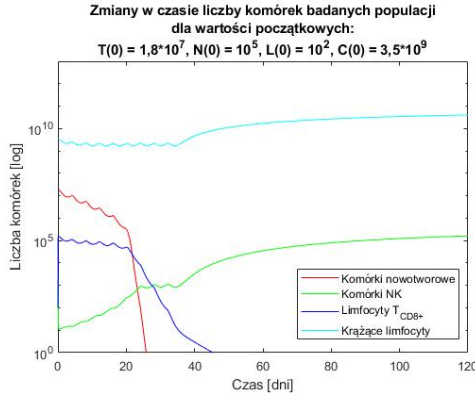
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się długości cyklu zebrano w Tab. 7.2.

W Tab. 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.

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).

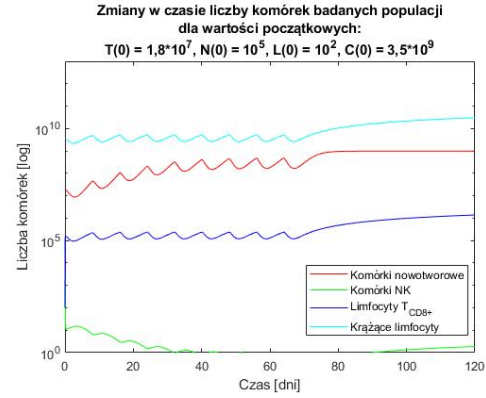
Zmiana długości przerwy pomiędzy dawkami					
Długość cyklu [dni]	Schemat cyklu	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
4	[1 3]	25,84	$4,64 \cdot 10^{-8}$	$4,64 \cdot 10^{-14}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
4,5	[1 3,5]	32,25	$2,46 \cdot 10^{-7}$	$2,46 \cdot 10^{-13}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$
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

Rys. 7.1 przedstawia zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla długości cyklu chemioterapii wynoszącej 4 (Rys. 7.1a) oraz 8 (Rys. 7.1b) dni, a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka (Rys. 7.1c i 7.1d). Symulacja zakłada rozpoczęcie chemioterapii (podanie pierwszej dawki cytostatyka) w pierwszym dniu symulacji oraz dziewięciokrotne powtórzenie cyklu. Każde z tych powtórzeń można zaobserwować w postaci pików na wykresach zmian stężenia oraz jako charakterystyczne załamanie krzywych odpowiadających badanym populacjom. We wszystkich powtórzeniach dawka cytostatyka $V_M = 5$, a czas podawania cytostatyka wynosi 1 dzień (24 godziny). Długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami jest zależna od długości i schematu cyklu. Dla 4 dni cyklu (schemat [1 3]) są to 3 dni przerwy, natomiast dla 8 dni cyklu (schemat [1 7]) 7 dni przerwy. Podczas każdej z przerw liczba komórek nowotworowych zaczyna ponownie wzrastać. W przypadku cyklu trwającego 4 dni czas przerwy jest zbyt krótki aby komórki nowotworu rozmnożyły się w dużym stopniu, dlatego możliwa jest regresja nowotworu, która następuje w 26 dniu symulacji. W przypadku cyklu trwającego 8 dni, czas przerwy pomiędzy dawkami jest wystarczająco długi do niekontrolowanego rozrostu nowotworu. Liczba komórek nowotworowych wzrasta i stabilizuje się na wysokim poziomie ($9,8 \cdot 10^8$) po 91 dniach od rozpoczęcia leczenia.



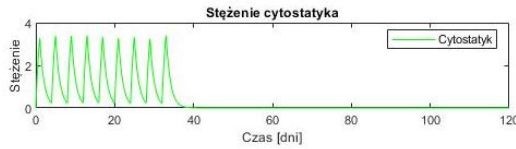
(a) Zmia-

ny w czasie liczby komórek badanych populacji dla długości cyklu równej 4 dni. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 26$ dni (624 godzin).



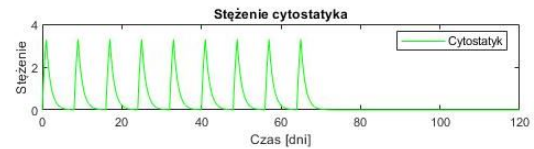
(b) Zmia-

ny w czasie liczby komórek badanych populacji dla długości cyklu równej 8 dni. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 91$ dni (2184 godzin) około wartości $9,8 \cdot 10^8$.



(c) Zmiany w cza-

sie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla długości cyklu równej 4 dni.



(d) Zmiany w cza-

sie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla długości cyklu równej 8 dni.

Rys. 7.1: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla długości cyklu chemioterapii równej 4 oraz 8 dni. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

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 nowo-

twór 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 Tab. 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, dawkę dozowanego cytostatyka, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w Tab. 7.1. Długość cyklu wynosiła 4, 8 oraz 12 dni.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

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

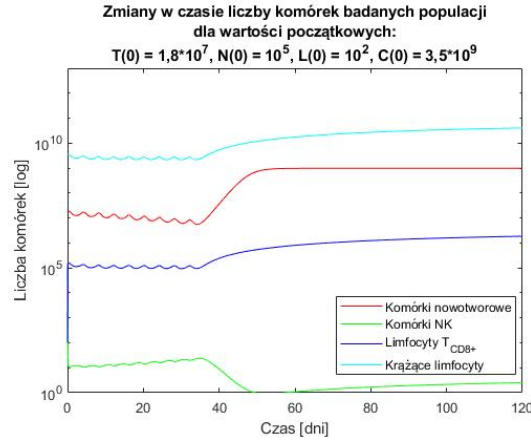
W Tab. 7.3 przedstawiono jak zmieniano wielkość dawki dozowanego cytostatyka, schemat cyklu, dzień regresji nowotworu oraz liczbę komórek nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj. w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$, a także szacowaną objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji, tj.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

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.

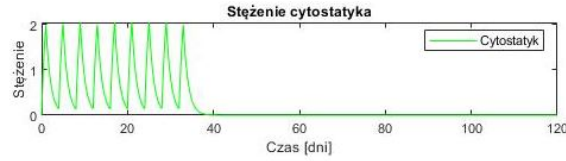
Długość cyklu: 4 dni					
Schemat cyklu	Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
[1 3]	3	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
[1 3]	3,5	49,34	$8,32 \cdot 10^{-8}$	$8,32 \cdot 10^{-14}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	4	34	$9,18 \cdot 10^{-8}$	$9,18 \cdot 10^{-14}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
[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	$1,79 \cdot 10^{-13}$	$1,79 \cdot 10^{-19}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$

Rys. 7.2 prezentuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla długości cyklu chemioterapii wynoszącej 4 dni (Rys. 7.2a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka (Rys. 7.2b). Symulacja zakłada rozpoczęcie chemioterapii w pierwszym dniu symulacji oraz dziewięciokrotne powtórzenie cyklu. We wszystkich powtórzeniach dawka cytostatyka $V_M = 3$, a czas podawania cytostatyka wynosi 1 dzień (24 godziny). Długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami wynosi 3 dni. Mimo długości cyklu równej 4 dni, która w symulacji 7.1 zapew-

niała skuteczność leczenia, w przypadku zmniejszenia dawki cytostatyka do $V_M = 3$ nie jest ona wystarczająca do wystąpienia regresji nowotworu. Po zakończeniu leczenia liczba komórek nowotworowych wzrasta do 66 dnia symulacji po czym stabilizuje się na wysokim poziomie ($9,8 \cdot 10^8$).



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla długości cyklu równej 4 dni oraz dawki dozowanego cytostatyka $V_M = 3$. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 66$ dni (1584 godzin) około wartości $9,8 \cdot 10^8$.



(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla długości cyklu równej 4 dni oraz dawki dozowanego cytostatyka $V_M = 3$.

Rys. 7.2: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla długości cyklu chemioterapii równej 4 dni oraz dawki dozowanego cytostatyka $V_M = 3$. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Rys. 7.3 przedstawia zależność dnia wystąpienia regresji nowotworu od użytej dawki cytostatyka. Powyżej pewnego progu (~ 10) zwiększanie dawki nie ma wpływu na przyspieszenie regresji.



Rys. 7.3: Dzień regresji nowotworu w zależności od dawki dozowanego cytostatyka.

Wnioski:

- skuteczność chemioterapii (regresja nowotworu lub jej brak) oraz czas potrzebny do regresji nowotworu będącej skutkiem chemioterapii zależy od dawki dozowanego 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 Tab. 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 Tab. 7.1.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

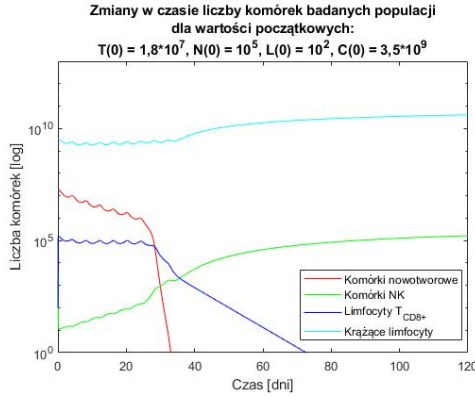
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się wielkości dawki cytostatyka w kolejnych powtórzeniach cyklu zebrano w Tab. 7.4.

W Tab. 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.

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.

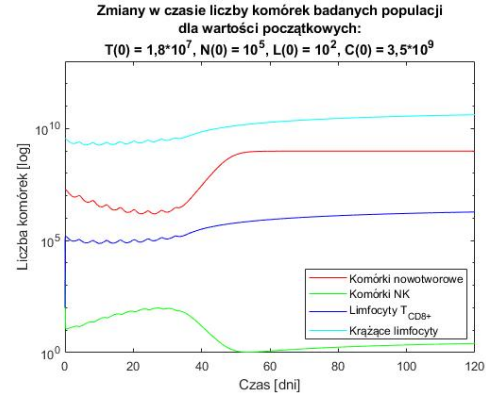
Schemat cyklu	Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
[1 3]	-0,1	26,84	$1,53 \cdot 10^{-7}$	$1,53 \cdot 10^{-13}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
[1 3]	-0,2	27,96	$3,13 \cdot 10^{-8}$	$3,13 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-5}$
[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

Rys. 7.4 przedstawia zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla długości cyklu chemioterapii wynoszącej 4 dni oraz dawki dozowanego cytostatyka zmniejszanej w kolejnych powtórzeniach o 0,4 (Rys. 7.4a) oraz o 0,5 (Rys. 7.4b), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka (Rys. 7.4c oraz Rys. 7.4d). Symulacja zakłada rozpoczęcie chemioterapii w pierwszym dniu symulacji oraz dziewięciokrotne powtórzenie cyklu, przy czym w każdym kolejnym powtórzeniu dawka V_M zmniejszana jest odpowiednio o 0,4 i 0,5 rozpoczynając od dawki początkowej $V_M = 5$. Czas podawania cytostatyka wynosi 1 dzień (24 godziny), natomiast długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami wynosi 3 dni. Zmniejszanie dawki V_M o 0,4 pozwala ograniczyć negatywne skutki działania cytostatyka przy jednoczesnym zachowaniu skuteczności leczenia (regresja nowotworu po 34 dniach). W przypadku zmniejszania dawki V_M o 0,5 regresja nie następuje, a liczba komórek nowotworowych w 67 dniu symulacji stabilizuje się na wysokim poziomie ($9,8 \cdot 10^8$).



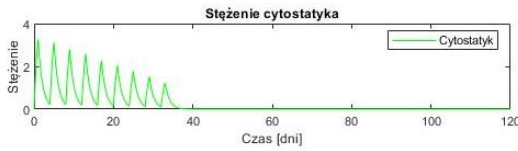
(a) Zmia-

ny w czasie liczby komórek badanych populacji dla dawki dozowanego cytostatyka zmniejszanej w kolejnych powtórzeniach o 0,4. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 34$ dni (816 godzin).



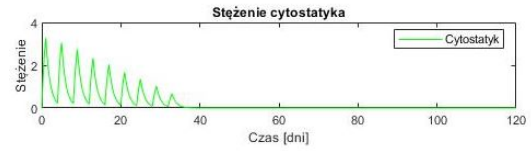
(b) Zmiany w czasie

liczby komórek badanych populacji dla dawki dozowanego cytostatyka zmniejszanej w kolejnych powtórzeniach o 0,5. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 67$ dni (1608 godzin) około wartości $9,8 \cdot 10^8$.



(c) Zmiany w cza-

sie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla dawki dozowanego cytostatyka zmniejszanej w kolejnych powtórzeniach o 0,4.



(d) Zmiany w cza-

sie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla dawki dozowanego cytostatyka zmniejszanej w kolejnych powtórzeniach o 0,5.

Rys. 7.4: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla dawki dozowanego cytostatyka zmniejszanej w kolejnych powtórzeniach o 0,4 i 0,5. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

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 Tab. 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w Tab. 7.1. Dawka dozowanego cytostatyka V_M wynosiła 5, 4, 3,5 oraz 3.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

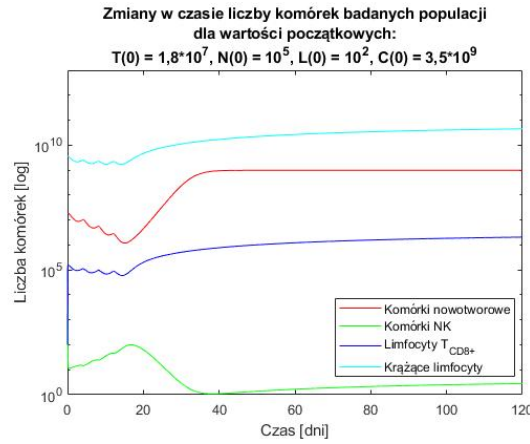
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się liczby powtórzeń cyklu chemioterapii zebrano w Tab. 7.5.

W Tab. 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.

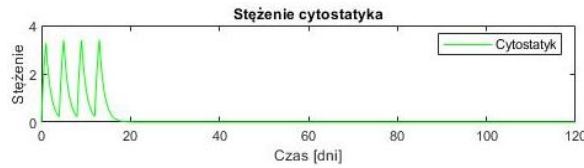
Tab. 7.5: Schemat oraz liczba powtórzeń cyklu chemioterapii, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla dawek dozowanego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

$V_M = 5$					
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	$6,8 \cdot 10^{-8}$	$6,8 \cdot 10^{-14}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$

Rys. 7.5 ukazuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla cyklu chemioterapii o długości 4 dni oraz 4 powtórzeń cyklu (Rys. 7.5a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka (Rys. 7.5b). Symulacja zakłada rozpoczęcie chemioterapii w pierwszym dniu symulacji oraz dawkę $V_M = 5$. Czas podawania cytostatyka wynosi 1 dzień (24 godziny), natomiast długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami wynosi 3 dni. Ograniczenie liczby powtórzeń cyklu do 4 uniemożliwia uzyskanie takiej liczby komórek nowotworowych, dla której regresja guza byłaby możliwa. Po zakończeniu leczenia liczba komórek nowotworowych wzrasta i stabilizuje się na wysokim poziomie ($9,8 \cdot 10^8$) w 52 dniu symulacji.



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla długości cyklu równej 4 dni oraz liczby powtórzeń cyklu wynoszącej 4. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 52$ dni (1248 godzin) około wartości $9,8 \cdot 10^8$.



(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla długości cyklu równej 4 dni oraz liczby powtórzeń cyklu wynoszącej 4.

Rys. 7.5: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla długości cyklu równej 4 dni oraz liczby powtórzeń cyklu wynoszącej 4. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Wnioski:

- skuteczność chemioterapii (regresja nowotworu) zależy od liczby powtórzeń cyklu chemioterapii; dla dawki cytostatyka $V_M = 5$ leczenie jest skuteczne (dzień regresji: 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 Tab. 6.1. Warunki początkowe dla chemioterapii, tj. długość cyklu, czas dozowania cytostatyka, schemat cyklu, liczbę powtórzeń cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii przedstawiono w Tab. 7.1. Dawka dozowanego cytostatyka V_M wynosiła 5 oraz 4,5.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

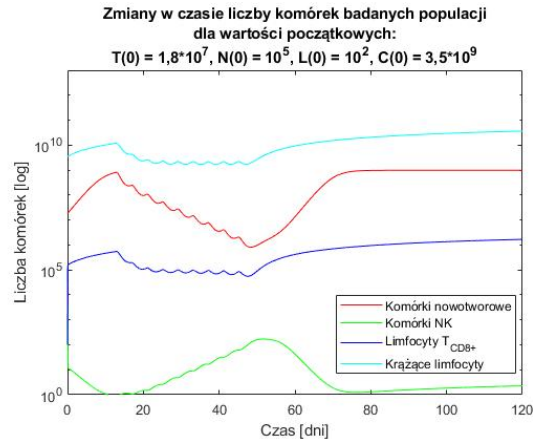
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającego się dnia rozpoczęcia chemioterapii (dozowania cytostatyka) zebrano w Tab. 7.6.

W Tab. 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.

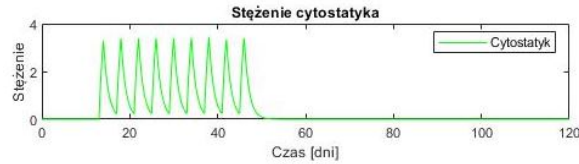
Tab. 7.6: Schemat cyklu oraz dzień rozpoczęcia chemioterapii, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla dawek dozowanego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

$V_M = 5$					
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

Rys. 7.6 przedstawia zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla cyklu chemioterapii o długości 4 dni rozpoczętej w 13 dniu symulacji (Rys. 7.6a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka (Rys. 7.6b). Symulacja zakłada dziewięciokrotne powtórzenie dozowania cytostatyka o dawce $V_M = 5$. Czas podawania cytostatyka wynosi 1 dzień (24 godziny), natomiast długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami wynosi 3 dni. Opóźnienie leczenia o niecałe dwa tygodnie skutkuje rozrostem guza i brakiem wystąpienia regresji. Liczba komórek nowotworowych stabilizuje się w 88 dniu symulacji na wysokim poziomie ($9,8 \cdot 10^8$).



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla chemioterapii rozpoczętej w 13 dniu. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 88$ dni (2112 godzin) około wartości $9,8 \cdot 10^8$.



(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla chemioterapii rozpoczętej w 13 dniu.

Rys. 7.6: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas chemioterapii cytostatyka dla chemioterapii rozpoczętej w 13 dniu. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

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).

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

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

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 Tab. 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 Tab. 8.1.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

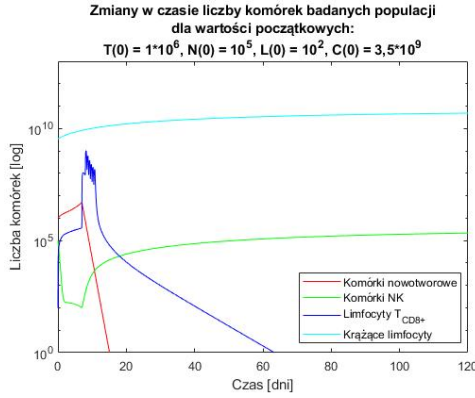
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0)$ zebrano w Tab. 8.2.

W Tab. 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..

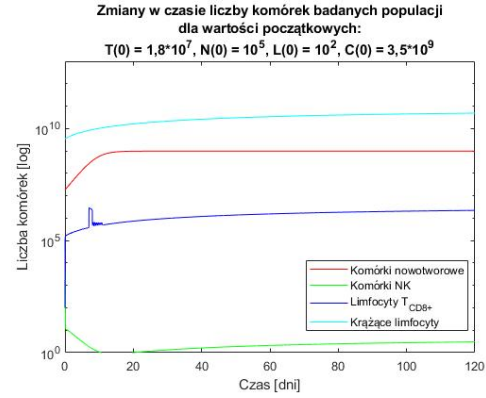
Tab. 8.2: Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0)$, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni.

$T(0)$ [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

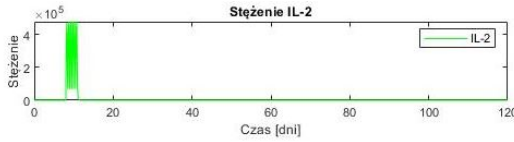
Rys. 8.1 prezentuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla immunoterapii, gdzie początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 10^6$ (Rys. 8.1a) oraz $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$ (Rys. 8.1b), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 (Rys. 8.1c). Symulacja zakłada sześciokrotne powtórzenie cyklu dozowania IL-2 o dawce $V_I = 5 \cdot 10^6$ oraz jednokrotny cykl podawania TIL o dawce $V_M = 10^9$. Czas dawkowania IL-2 wynosi 7 godzin i 12 minut. Czas dawkowania TIL wynosi 1 dzień (24 godziny). Długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami cyklu IL-2 wynosi 4 godziny i 48 minut. Dzień rozpoczęcia dozowania IL-2 to 9 dzień symulacji, natomiast rozpoczęcie dozowania TIL następuje w 8 dniu symulacji. Immunoterapia jest skuteczna w przypadku niewielkiego guza ($T(0) = 10^6$), powoduje regresję w 16 dniu symulacji, natomiast w przypadku większej początkowej liczby komórek nowotworowych ($T(0) = 1,8 \cdot 10^7$) regresja nie występuje, a liczba komórek nowotworowych stabilizuje się w 28 dniu symulacji na wysokim poziomie ($9,8 \cdot 10^8$). W obydwu przypadkach można zaobserwować nagły wzrost limfocytów T_{CD8+} wywołany podaniem TIL w 8 dniu symulacji.



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0) = 10^6$. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 16$ dni (384 godzin).



(b) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 28$ dni (672 godzin) około wartości $9,8 \cdot 10^8$.



(c) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 dla początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0) = 10^6$ oraz $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$.

Rys. 8.1: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 dla początkowej liczby komórek nowotworowych $T(0) = 10^6$ oraz $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$. Początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

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 Tab. 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 Tab. 8.1.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

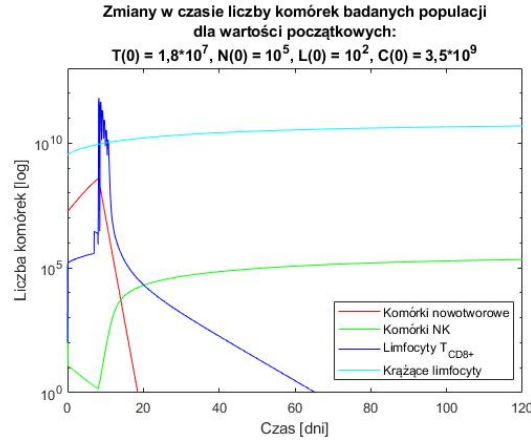
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się dawki IL-2 dla leczenia z wykorzystaniem TIL oraz bez wykorzystania TIL zebrano w Tab. 8.3.

W Tab. 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.

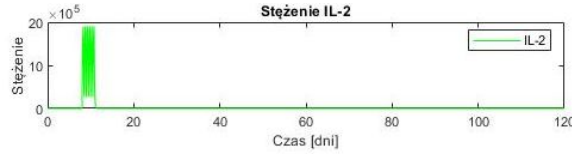
Tab. 8.3: Dawka IL-2 V_I , dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla leczenia z wykorzystaniem TIL oraz bez wykorzystania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

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	$5,06 \cdot 10^{-85}$	$5,06 \cdot 10^{-91}$	$5 \cdot 10^{-31}$

Rys. 8.2 obrazuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla immunoterapii z wykorzystaniem IL-2 o dawce $V_I = 2 \cdot 10^7$ oraz TIL o dawce $V_M = 10^9$ (Rys. 8.2a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 (Rys. 8.2b). Symulacja zakłada sześciokrotne powtórzenie cyklu dozowania IL-2 oraz jednokrotny cykl podawania TIL. Czas dawkowania IL-2 wynosi 7 godzin i 12 minut. Czas dawkowania TIL wynosi 1 dzień (24 godziny). Długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami cyklu IL-2 wynosi 4 godziny i 48 minut. Dzień rozpoczęcia dozowania IL-2 to 9 dzień symulacji, natomiast rozpoczęcie dozowania TIL następuje w 8 dniu symulacji. Dzięki zwiększeniu dawki IL-2 do wartości $V_I = 2 \cdot 10^7$ immunoterapia jest skuteczna w przypadku guza o początkowej liczbie komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, czego nie udało się uzyskać w symulacji 8.1. Regresja następuje po 19 dniach od rozpoczęcia symulacji. Można zaobserwować znaczny wzrost liczby limfocytów T_{CD8+} na skutek zwiększenia dawki IL-2.



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^7$ dla leczenia z wykorzystaniem TIL. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 19$ dni (456 godzin).



(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 dla dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^7$ dla leczenia z wykorzystaniem TIL.

Rys. 8.2: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 dla dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^7$ dla leczenia z wykorzystaniem TIL. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

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 Tab. 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 Tab. 8.1.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

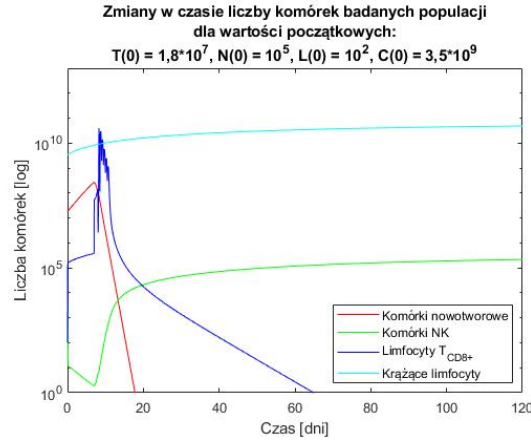
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się dawki TIL dla leczenia z wykorzystaniem IL-2 oraz bez wykorzystania IL-2 zebrano w Tab. 8.4.

W Tab. 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.

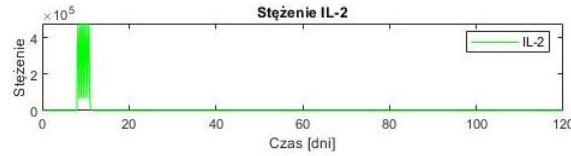
Tab. 8.4: Dawka TIL V_L , dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla leczenia z wykorzystaniem IL-2 oraz bez wykorzystania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

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

Rys. 8.3 obrazuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla immunoterapii z wykorzystaniem TIL o dawce $V_L = 2 \cdot 10^{10}$ oraz IL-2 o dawce $V_I = 5 \cdot 10^6$ (Rys. 8.3a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 (Rys. 8.3b). Symulacja zakłada sześciokrotne powtórzenie cyklu dozowania IL-2 oraz jednokrotny cykl podawania TIL. Czas dawkowania IL-2 wynosi 7 godzin i 12 minut. Czas dawkowania TIL wynosi 1 dzień (24 godziny). Długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami cyklu IL-2 wynosi 4 godziny i 48 minut. Dzień rozpoczęcia dozowania IL-2 to 9 dzień symulacji, natomiast rozpoczęcie dozowania TIL następuje w 8 dniu symulacji. Dzięki zwiększeniu dawki TIL do wartości $V_L = 2 \cdot 10^{10}$ immunoterapia jest skuteczna w przypadku guza o początkowej liczbie komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, czego nie udało się uzyskać w symulacji 8.1. Regresja następuje po 18 dniach od rozpoczęcia symulacji. Można zaobserwować znaczny wzrost liczby limfocytów T_{CD8+} na skutek zwiększenia dawki TIL.



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla dawki TIL $V_L = 2 \cdot 10^{10}$ dla leczenia z wykorzystaniem IL-2. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 18$ dni (432 godzin).



(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 dla dawki TIL $V_L = 2 \cdot 10^{10}$ dla leczenia z wykorzystaniem IL-2.

Rys. 8.3: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 dla dawki TIL $V_L = 2 \cdot 10^{10}$ dla leczenia z wykorzystaniem IL-2. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

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 Tab. 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 Tab. 8.1.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

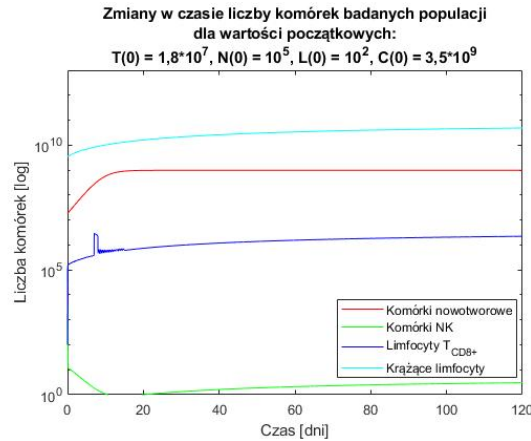
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającej się liczby powtórzeń cyklu IL-2 8.5.

W Tab. 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 $T(0) = 1 \cdot 10^6$.

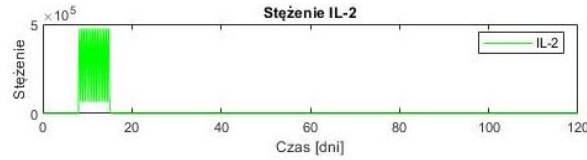
Tab. 8.5: Liczba powtórzeń cyklu IL-2, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla początkowej liczby komórek nowotworowych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

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	$1,07 \cdot 10^{-87}$	$1,07 \cdot 10^{-93}$	$6,4 \cdot 10^{-32}$

Rys. 8.4 przedstawia zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla immunoterapii z wykorzystaniem IL-2 o dawce $V_I = 5 \cdot 10^6$ i liczbie powtórzeń cyklu równej 14 oraz TIL o dawce $V_L = 10^9$ i liczbie powtórzeń cyklu równej 1 (Rys. 8.4a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 (Rys. 8.4b). Czas dawkowania IL-2 wynosi 7 godzin i 12 minut. Czas dawkowania TIL wynosi 1 dzień (24 godziny). Długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami cyklu IL-2 wynosi 4 godziny i 48 minut. Dzień rozpoczęcia dozowania IL-2 to 9 dzień symulacji, natomiast rozpoczęcie dozowania TIL następuje w 8 dniu symulacji. Mimo wielokrotnego powtarzania cyklu IL-2 regresja nie następuje, a liczba komórek nowotworowych stabilizuje się w 28 dniu symulacji ($T(28) = 9,8 \cdot 10^8$). Można zaobserwować nagły wzrost liczby limfocytów T_{CD8+} na skutek podania TIL oraz nieznaczne zmiany liczby limfocytów T_{CD8+} przy kolejnych powtórzeniach cyklu IL-2.



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 14. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 28$ dni (672 godzin) około wartości $9,8 \cdot 10^8$.



(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 dla liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 14.

Rys. 8.4: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 dla liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 14. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

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 Tab. 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 Tab. 8.1.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

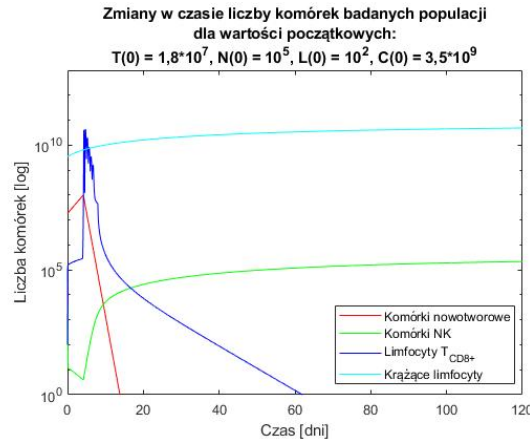
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniającego się dnia rozpoczęcia immunoterapii zebrano w Tab. 8.6.

W Tab. 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.

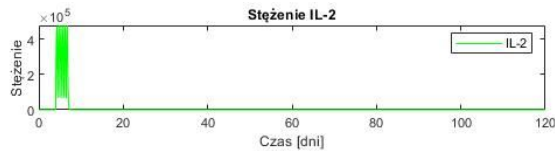
Tab. 8.6: Dzień rozpoczęcia immunoterapii, dzień regresji nowotworu, liczba komórek nowotworowych w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni $T(120)$ oraz szacowana objętość i długość promienia nowotworu w ostatnim dniu symulacji w chwili $T_k = 120$ dni dla IL-2 (przy dozowaniu TIL zgodnie z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

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	$6,26 \cdot 10^{-93}$	$6,26 \cdot 10^{-99}$	$1,1 \cdot 10^{-33}$

Rys. 8.5 ukazuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla immunoterapii (dozowania IL-2) rozpoczętej 5 dnia symulacji (Rys. 8.5a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 (Rys. 8.5b). Dawka IL-2 wynosi $V_I = 5 \cdot 10^6$, dawka TIL wynosi $V_L = 10^9$. Czas dawkowania IL-2 wynosi 7 godzin i 12 minut. Czas dawkowania TIL wynosi 1 dzień (24 godziny). Długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami cyklu IL-2 wynosi 4 godziny i 48 minut. Rozpoczęcie dozowania TIL następuje w 8 dniu symulacji. Liczba powtórzeń cyklu IL-2 wynosi 6, natomiast liczba powtórzeń dozowania TIL wynosi 1. Wcześniejsze rozpoczęcie (dzień 5) dozowania IL-2 wywołuje regresję nowotworu w 14 dniu symulacji.



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla immunoterapii (dozowania IL-2) rozpoczętej 5 dnia. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 14$ dni (336 godzin).



(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 dla immunoterapii (dozowania IL-2) rozpoczętej 5 dnia.

Rys. 8.5: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas immunoterapii IL-2 dla immunoterapii (dozowania IL-2) rozpoczętej 5 dnia. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Wnioski:

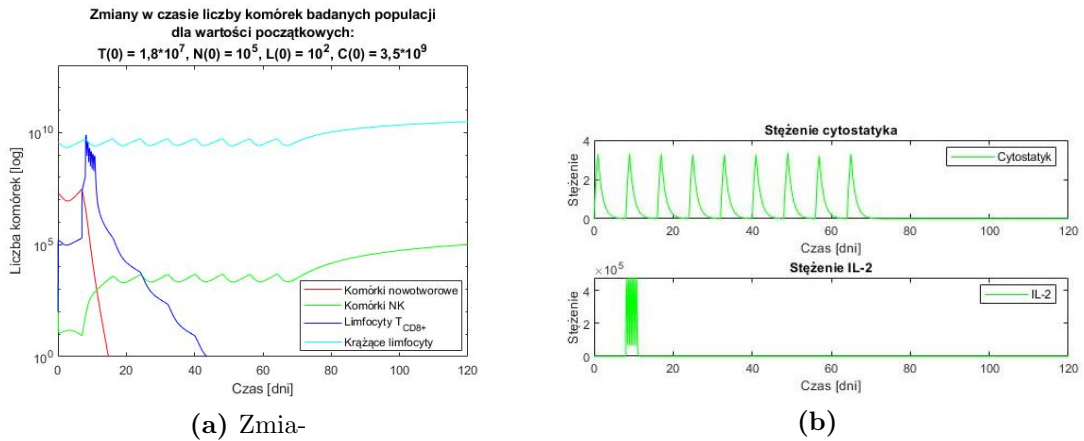
- dzień rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2) przy dozowaniu TIL zgodnie z warunkami początkowymi (Tab. 8.1) ma wpływ na skuteczność leczenia (wystąpienie regresji nowotworu lub jej brak); przy rozpoczęciu dozowania IL-2 w 5 dniu symulacji (4 dni wcześniej niż dla warunków początkowych (Tab. 8.1), 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.

Rys. 9.1 przedstawia zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla leczenia skojarzonego metodami chemioterapii i immunoterapii (Rys. 9.1a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka i IL-2 (Rys. 9.1b). Dawka cytostatyka $V_M = 5$, IL-2 $V_I = 5 \cdot 10^6$, TIL $V_L = 10^9$. Czas dawkowania cytostatyka oraz TIL wynosi 1 dzień (24 godziny), a IL-2 7 godzin i 12 minut. Liczba powtórzeń cyklu chemioterapii wynosi 9, IL-2 wynosi 6, natomiast liczba powtórzeń dozowania TIL wynosi 1. Długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami cyklu chemioterapii wynosi 3 dni, natomiast dla IL-2 4 godziny i 48 minut. Rozpoczęcie dozowania cytostatyka następuje w pierwszym dniu, TIL w 8 dniu, a IL-2 w 9 dniu symulacji. Długość cyklu chemioterapii jest równa 8 dni. Symulacja zakłada połączenie metod chemioterapii i immunoterapii w leczeniu nowotworu, które dla podanych warunków stosowane osobno były nieskuteczne. Skojarzenie chemioterapii i immunoterapii umożliwia regresję nowotworu w 15 dniu symulacji.



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla leczenia z wykorzystaniem skojarzonych metod chemioterapii i immunoterapii (warunki początkowe w Tab. 7.1 z wyjątkiem długości cyklu wynoszącej 8 dni oraz Tab. 8.1). Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 15$ dni (360 godzin).

(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2.

Rys. 9.1: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla warunków początkowych chemioterapii (Tab. 7.1 z wyjątkiem długości cyklu wynoszącej 8 dni) oraz immunoterapii (Tab. 8.1). Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

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 Tab. 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 Tab. 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 Tab. 8.1.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

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

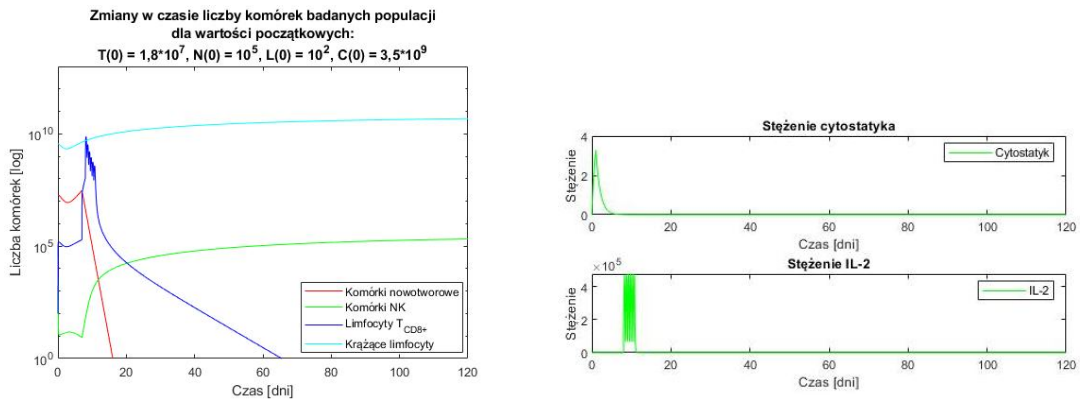
9.1.1 Zmiana długości cyklu chemioterapii

W Tab. 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.

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).

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	$6,71 \cdot 10^{-87}$	$6,71 \cdot 10^{-93}$	$1,2 \cdot 10^{-31}$

Rys. 9.2 ukazuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla leczenia skojarzonego metodami chemioterapii i immunoterapii, gdzie długość cyklu chemioterapii wynosi 200 dni (Rys. 9.2a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka i IL-2 (Rys. 9.2b). Warunki początkowe immunoterapii przedstawia Tab. 8.1. Dawka cytostatyka $V_M = 5$. Czas dawkowania cytostatyka wynosi 1 dzień (24 godziny). Liczba powtórzeń cyklu chemioterapii wynosi 9 (cykl o długości 200 dni i czasie symulacji $T_k = 120$ obejmuje tylko jedno powtórzenie). Długość przerwy pomiędzy kolejnymi powtórzeniami cyklu chemioterapii wynosi 199 dni. Rozpoczęcie dozowania cytostatyka następuje w pierwszym dniu symulacji. Przy równoczesnym wykorzystaniu immunoterapii, regresja nowotworu jest możliwa nawet przy bardzo długim cyklu dozowania cytostatyka. Regresja występuje w 17 dniu symulacji.



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla długości cyklu chemioterapii równej 200 dni (w leczeniu skojarzonym). Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 17$ dni (408 godzin).

(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 200 dni (w leczeniu skojarzonym).

Rys. 9.2: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 200 dni. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

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 opóźnień 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).

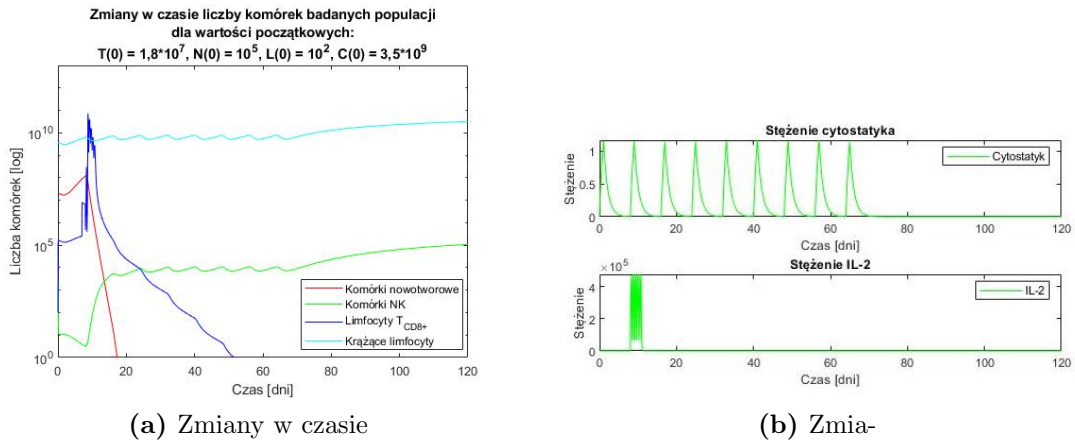
9.1.2 Zmiana dawki dozowanego cytostatyka

W Tab. 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.

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.

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

Rys. 9.3 ukazuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla leczenia skojarzonego metodami chemioterapii i immunoterapii, gdzie długość cyklu chemioterapii wynosi 8 dni (Rys. 9.3a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka i IL-2 (Rys. 9.2b). Warunki początkowe immunoterapii przedstawia Tab. 8.1. Dawkę cytostatyka zmniejszono do wartości $V_M = 1,75$, ponieważ jest to najmniejsza dawka skuteczna (powodująca regresję guza) przy niezmiennych pozostałych wartościach początkowych. Regresja występuje w 18 dniu symulacji.



liczby komórek badanych populacji dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni oraz dawki dozowanego cytostatyka $V_M = 1,75$. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 18$ dni (432 godzin).

ny w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni oraz dawki dozowanego cytostatyka $V_M = 1,75$.

Rys. 9.3: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni oraz dawki dozowanego cytostatyka $V_M = 1,75$. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Wnioski:

- skuteczność leczenia skojarzonego zależy od wielkości dawki dozowanego w chemioterapii cytostatyka; dla krótkiego cyklu (4 dni) dawką wystarczającą do osiągnięcia zamierzonego efektu (regresji nowotworu) w 18 dniu symulacji jest $V_M = 0,75$ (w przypadku leczenia wyłącznie metodą chemioterapii ta dawka to $V_M = 3,5$, czyli ponad cztery razy więcej, podczas gdy dzień regresji to 50 dzień symulacji), natomiast dla dłuższych cykli (8 oraz 200 dni) jest to dawka $V_M = 1,75$ (wartość tą wykorzystano w dalszych symulacjach), podczas gdy w leczeniu wyłącznie metodą chemioterapii dla cyklu o długości 8 dni regresja nie występuje lub występuje dla bardzo dużej wartości dawki ($V_M = 13$); leczenie skojarzone umożliwia osiągnięcie regresji nowotworu, które jest nieosiągalne w leczeniu wyłącznie metodą chemioterapii (dla takich samych warunków początkowych);

- dawka może zostać kilkakrotnie zmniejszona w porównaniu do leczenia wyłącznie metoda chemioterapii, co pozwala na mniejsze zniszczenie zdrowych tkanek pacjenta (będące skutkiem użycia cytostatyka).

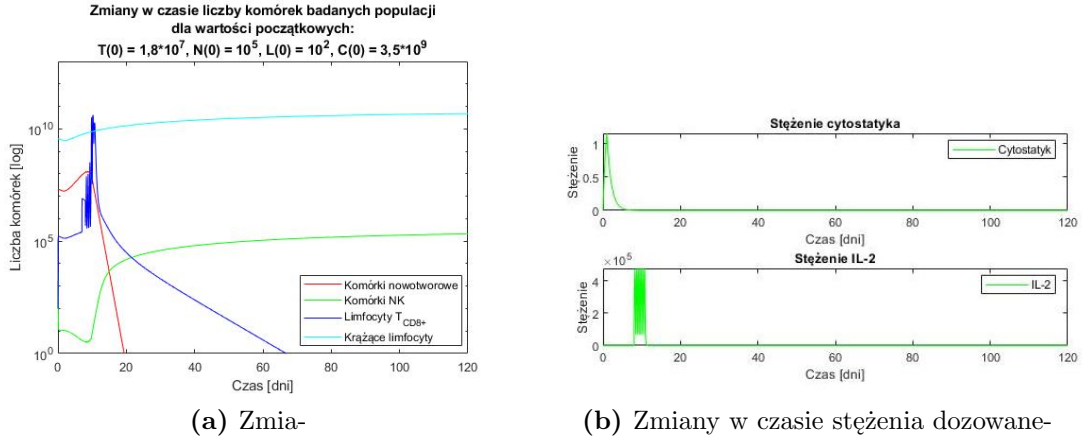
9.1.3 Zmiana liczby powtórzeń cyklu chemioterapii

W Tab. 9.3 przedstawiono jak zmieniano dawkę liczbę powtórzeń cyklu 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 (wybrano taką długość cyklu ze względu na porównanie pozytywnego efektu (wystąpienia regresji) leczenia skojarzonego dla tej wartości z brakiem wystąpienia tego efektu w leczeniu wyłącznie metodą chemioterapii dla tej długości cyklu) oraz dawki cytostatyka $V_M = 1,75$ (analizę przeprowadzono dla takiej wartości dawki, ponieważ jest to najmniejsza, a tym samym najmniej szkodliwa wartość, przy której następuje regresja nowotworu dla długich cykli (8 oraz 200 dni)).

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 $V_M = 1,75$.

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	$3,92 \cdot 10^{-84}$	$3,92 \cdot 10^{-90}$	$9,8 \cdot 10^{-31}$

Rys. 9.4 ukazuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla leczenia skojarzonego metodami chemioterapii i immunoterapii, gdzie długość cyklu chemioterapii wynosi 8 dni (Rys. 9.4a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka i IL-2 (Rys. 9.4b). Warunki początkowe immunoterapii przedstawia Tab. 8.1. Dawka cytostatyka wynosi $V_M = 1,75$. Liczba powtórzeń cyklu chemioterapii wynosząca 1 jest wystarczająca do spowodowania regresji nowotworu przy niezmiennych pozostałych wartościach początkowych. Regresja występuje w 20 dniu symulacji.



ny w czasie liczby komórek badanych populacji dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki dozowanego cytotatyka $V_M = 1,75$ oraz liczby powtórzeń cyklu równej 1. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 20$ dni (480 godzin).

go podczas leczenia skojarzonego cytotatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki dozowanego cytotatyka $V_M = 1,75$ oraz liczby powtórzeń cyklu równej 1.

Rys. 9.4: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytotatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki dozowanego cytotatyka $V_M = 1,75$ oraz liczby powtórzeń cyklu równej 1. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Wnioski:

- liczba powtórzeń cyklu nie ma wpływu na skuteczność leczenia (wystąpienie regresji nowotworu) w leczeniu skojarzonym; zarówno dla 9 powtórzeń (podobnie jak we wcześniejszych symulacjach dla leczenia wyłącznie metodą chemioterapii oraz wyłącznie metodą immunoterapii), jak i dla pojedynczego dozowania cytotatyka (brak regresji we wcześniejszych symulacjach) następuje regresja nowotworu;
- liczba powtórzeń cyklu nie wpływa lub wpływa nieznacznie na czas wystąpienia regresji, dla 3 do 9 powtórzeń jest to dokładnie ten sam moment (dzień 18), dla 2 powtórzeń ten sam dzień, jednak nieznacznie później, natomiast dla 1 powtórzenia cyklu dniem regresji jest 20 dzień symulacji.

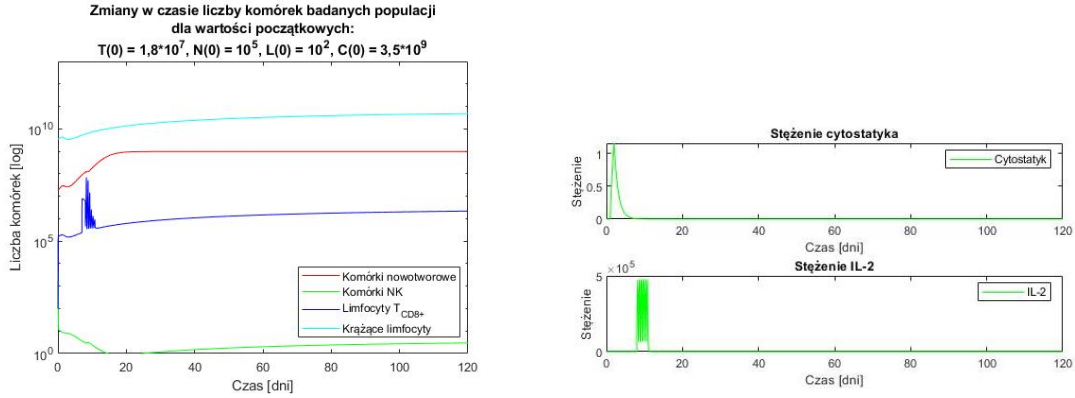
9.1.4 Zmiana dnia rozpoczęcia chemioterapii

W Tab. 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.

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.

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

Rys. 9.5 przedstawia zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla leczenia skojarzonego metodami chemioterapii i immunoterapii, gdzie długość cyklu chemioterapii wynosi 8 dni (Rys. 9.5a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka i IL-2 (Rys. 9.5b). Warunki początkowe immunoterapii przedstawia Tab. 8.1. Dawka cytostatyka wynosi $V_M = 1,75$. Liczba powtórzeń cyklu chemioterapii wynosi 1. Dla podanych warunków chemioterapii opóźnienie rozpoczęcia leczenia o 1 dzień skutkuje brakiem regresji nowotworu i stabilizacją komórek nowotworowych w 32 dniu symulacji na poziomie $9,8 \cdot 10^8$.



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki dozowanego cytostatyka $V_M = 1,75$, liczby powtórzeń cyklu równej 1 oraz chemioterapii rozpoczętej 2 dnia. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 32$ dni (768 godzin) około wartości $9,8 \cdot 10^8$.

(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki dozowanego cytostatyka $V_M = 1,75$, liczby powtórzeń cyklu równej 1 oraz chemioterapii rozpoczętej 2 dnia.

Rys. 9.5: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki dozowanego cytostatyka $V_M = 1,75$, liczby powtórzeń cyklu równej 1 oraz chemioterapii rozpoczętej 2 dnia. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Wnioski:

- leczenie skojarzone dla warunków początkowych immunoterapii (Tab. 8.1) daje pozytywny skutek (występuje regresja nowotworu) dla rozważanych warunków chemioterapii (długość cyklu = 8 dni, dawka cytostatyka $V_M = 1,75$, liczba powtórzeń cyklu: 1) tylko w przypadku, gdy pierwszy dzień symulacji jest równocześnie pierwszym dniem leczenia (rozpoczęcie dozowania cytostatyka następuje w pierwszym dniu symulacji); chemioterapia dla rozważanych warunków jest więc w maksymalnym stopniu ograniczona (przy warunkach początkowych immunoterapii) tak, aby otrzymać oczekiwany efekt przy jednoczesnych jak najmniejszych skutkach ubocznych chemioterapii (które mogą być spowodowane dawką zbyt dużą cytostatyka czy długim czasem leczenia metodą chemioterapii).

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 Tab. 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 Tab. 9.5. 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 Tab. 8.1.

Tab. 9.5: Warunki początkowe modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia za pomocą chemioterapii.

Długość cyklu [dni]	Czas dozowania cytostatyka [dni]	Schemat cyklu	Dawka dozowanego cytostatyka V_M	Liczba powtórzeń cyklu	Dzień rozpoczęcia chemioterapii
8	1	[1 7]	5	9	1

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu uwzględniającego leczenie ukazano w Tab. 5.2 i Tab. 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 Tab. 9.6, Tab. 9.7 oraz Tab. 9.8.

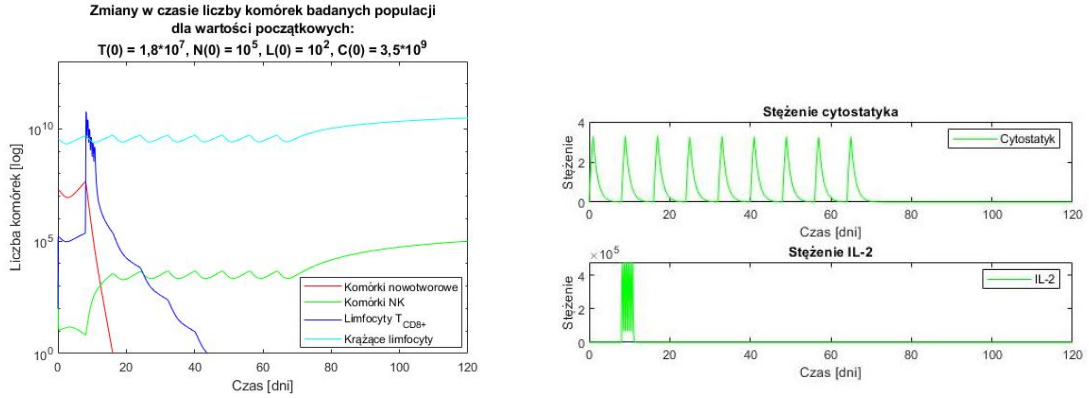
9.2.1 Zmiana dawki IL-2

W Tab. 9.6 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.

Tab. 9.6: 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 (9.5) i leczenia z wykorzystaniem TIL oraz bez wykorzystania TIL.

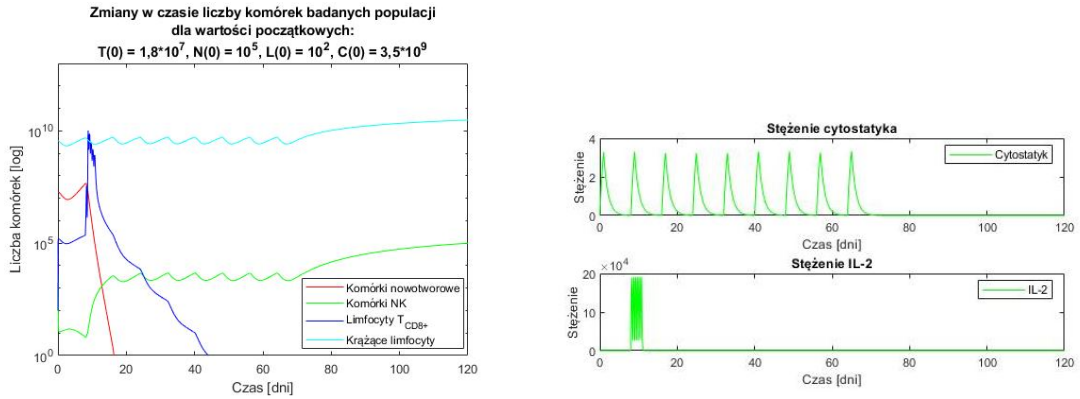
Leczenie z wykorzystaniem TIL				
Dawka IL-2 V_I	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$5 \cdot 10^6$	14,79	$5,57 \cdot 10^{-95}$	$5,57 \cdot 10^{-101}$	$1,4 \cdot 10^{-34}$
$1 \cdot 10^6$	14,79	$5,46 \cdot 10^{-95}$	$5,46 \cdot 10^{-101}$	$2,4 \cdot 10^{-34}$
$9 \cdot 10^5$	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

Rys. 9.6 ukazuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla leczenia skojarzonego metodami chemioterapii i immunoterapii, gdzie długość cyklu chemioterapii wynosi 8 dni, a dawka IL-2 $V_I = 5 \cdot 10^6$ (Rys. 9.6a) i $V_I = 2 \cdot 10^6$ (Rys. 9.6c), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytotstatyka i IL-2 (Rys. 9.6b i Rys. 9.6d). Pozostałe warunki początkowe chemioterapii przedstawia Tab. 7.1. Symulacja nie obejmuje leczenia z wykorzystaniem TIL. Dawkę IL-2 zmniejszono do wartości $V_I = 2 \cdot 10^6$, ponieważ jest to najmniejsza dawka skuteczna (powodująca regresję guza) przy niezmiennych pozostałych wartościach początkowych. Regresja występuje w 17 dniu symulacji.



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki IL-2 $V_I = 5 \cdot 10^6$ oraz leczenia bez wykorzystania TIL. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 17$ dni (408 godzin).

(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki IL-2 $V_I = 5 \cdot 10^6$ oraz leczenia bez wykorzystania TIL.



(c) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$ oraz leczenia bez wykorzystania TIL. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 17$ dni (408 godzin).

(d) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$ oraz leczenia bez wykorzystania TIL.

Rys. 9.6: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki IL-2 $V_I = 5 \cdot 10^6$ i $V_I = 2 \cdot 10^6$ oraz leczenia bez wykorzystania TIL. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Wnioski:

- w leczeniu z wykorzystaniem TIL wielkość dawki IL-2 nie wpływa na skuteczność (wystąpienie regresji nowotworu) terapii skojarzonej; niezależnie od wielkości dawki IL-2 regresja następuje w 15 dniu symulacji;
- możliwe jest osiągnięcie regresji nowotworu bez udziału IL-2 w leczeniu, jeśli

zastosowano TIL oraz chemioterapię zgodnie z warunkami początkowymi (Tab. 8.1, 9.5);

- w leczeniu bez wykorzystania TIL skuteczność (wystąpienie regresji nowotworu) terapii skojarzonej zależy od wielkości dawki IL-2 (regresja dla dawki $V_I = 2 \cdot 10^6$, brak regresji dla dawki $V_I = 1 \cdot 10^6$), natomiast moment wystąpienia regresji zmienia się nieznacznie zależnie od wybranej dawki.

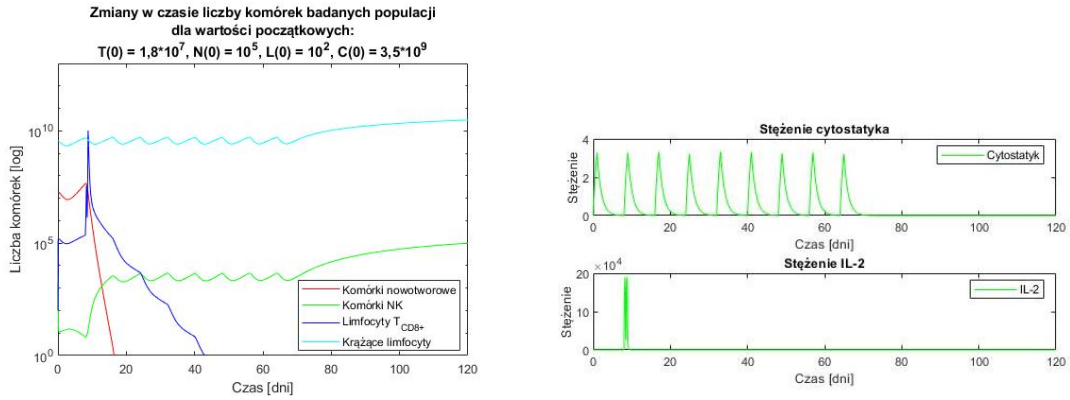
9.2.2 Zmiana liczby powtórzeń cyklu IL-2 dla leczenia bez wykorzystania TIL

W Tab. 9.7 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 w celu sprawdzenia skuteczności terapii z wykorzystaniem wyłącznie IL-2 (jak wykazano w symulacji 9.2.1, leczenie wykorzystujące TIL jest skuteczne w każdym przypadku dla podanych warunków początkowych 8.1) oraz dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$ (najmniejszej dawki, przy której możliwe jest zniszczenie (regresja) nowotworu).

Tab. 9.7: 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 (9.5) dla leczenia bez wykorzystania TIL oraz dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$.

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]
6	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

Rys. 9.7 ukazuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla leczenia skojarzonego metodami chemioterapii i immunoterapii, gdzie długość cyklu chemioterapii wynosi 8 dni, dawka IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$, a liczba powtórzeń cyklu IL-2 wynosi 2 (Rys. 9.7a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka i IL-2 (Rys. 9.7b). Pozostałe warunki początkowe chemioterapii przedstawia Tab. 7.1. Symulacja nie obejmuje leczenia z wykorzystaniem TIL. Podwójne powtórzenie cyklu IL-2 jest wystarczające do wystąpienia regresji nowotworu przy niezmiennych pozostałych wartościach początkowych. Regresja występuje w 17 dniu symulacji.



(a) Zmiany w czasie liczby

komórek badanych populacji dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$, leczenia bez wykorzystania TIL oraz liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 2. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 17$ dni (408 godzin).

(b) Zmia-

ny w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$, leczenia bez wykorzystania TIL oraz liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 2.

Rys. 9.7: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$, leczenia bez wykorzystania TIL oraz liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 2. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Wnioski:

- skuteczność leczenia skojarzonego z wykorzystaniem chemioterapii i IL-2 oraz bez wykorzystania TIL jest zależna od liczby powtórzeń cyklu IL-2; konieczne są co najmniej 2 powtórzenia cyklu do uzyskania regresji nowotworu;
- dzień regresji nowotworu nie zależy od liczby powtórzeń (większej lub równej 2); zawsze jest to 17 dzień symulacji.

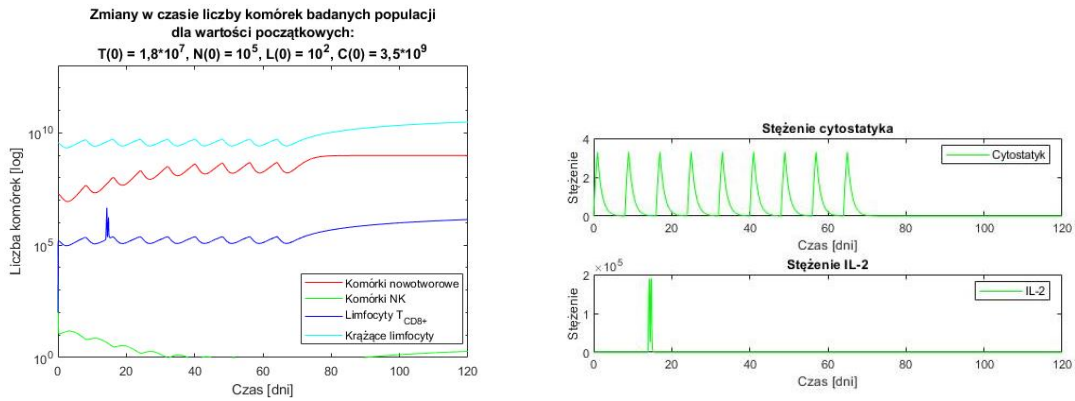
9.2.3 Zmiana dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2) dla leczenia bez wykorzystania TIL

W Tab. 9.8 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 (najmniejszej możliwej liczby powtórzeń do uzyskania regresji nowotworu).

Tab. 9.8: 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 (9.5) dla leczenia bez wykorzystania TIL, dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$ oraz liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 2.

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

Rys. 9.8 ukazuje zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla leczenia skojarzonego metodami chemioterapii i immunoterapii, gdzie długość cyklu chemioterapii wynosi 8 dni, dawka IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$, a liczba powtórzeń cyklu IL-2 wynosi 2 (Rys. 9.8a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka i IL-2 (Rys. 9.8b). Pozostałe warunki początkowe chemioterapii przedstawia Tab. 7.1. Symulacja nie obejmuje leczenia z wykorzystaniem TIL. Dla wymienionych warunków immunoterapia (dozowanie IL-2) rozpoczynająca się w 15 dniu symulacji nie jest skuteczna, a liczba komórek nowotworowych stabilizuje się na poziomie $9,8 \cdot 10^8$ w 91 dniu symulacji.



(a) Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$, leczenia bez wykorzystania TIL, liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 2 oraz immunoterapii rozpoczętej w 15 dniu. Stabilizacja liczby komórek nowotworowych po czasie $T_s \approx 91$ dni (2184 godzin) około wartości $9,8 \cdot 10^8$.

(b) Zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$, leczenia bez wykorzystania TIL, liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 2 oraz immunoterapii rozpoczętej w 15 dniu.

Rys. 9.8: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^6$, leczenia bez wykorzystania TIL, liczby powtórzeń cyklu IL-2 równej 2 oraz immunoterapii rozpoczętej w 15 dniu. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Wnioski:

- skuteczność leczenia skojarzonego zależy od dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-2); aby doszło do regresji nowotworu, może się ona rozpocząć najpóźniej w 14 dniu symulacji (dzień regresji: 22);
- dzień regresji w leczeniu skojarzonym zależy od dnia rozpoczęcia immunoterapii (dozowania IL-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 Tab. 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 Tab. 9.9. 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 Tab. 8.1.

Tab. 9.9: Warunki początkowe chemioterapii dla modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór z uwzględnieniem procesu leczenia skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii.

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

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

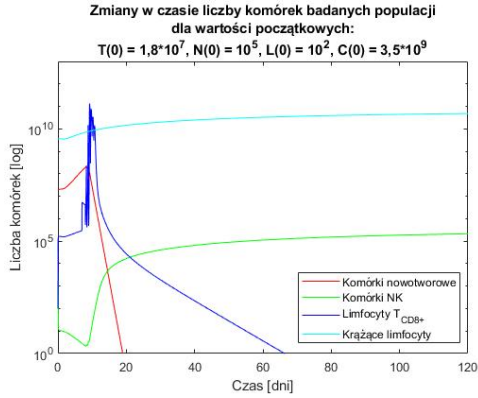
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniających się parametrów chemioterapii przy stałej wartości parametrów immunoterapii zebrano w Tab. 9.10.

W Tab. 9.10 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 $V_M = 0,5$.

Tab. 9.10: 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 (9.9) oraz leczenia z wykorzystaniem TIL.

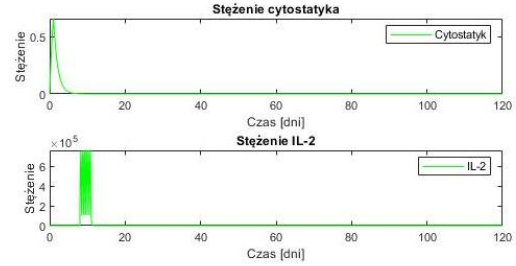
$V_M = 1$				
Dawka IL-2 V_I	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
$5 \cdot 10^6$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$6 \cdot 10^6$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$7 \cdot 10^6$	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
$8 \cdot 10^6$	18,96	$1,72 \cdot 10^{-84}$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

Rys. 9.9 przedstawia zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla leczenia skojarzonego metodami chemioterapii i immunoterapii, gdzie dawka cytostatyka $V_M = 1$, dawka IL-2 $V_I = 8 \cdot 10^6$ (Rysw. 9.9a) oraz dawka cytostatyka $V_M = 0,5$, dawka IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^7$ (Rys. 9.9c), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka i IL-2 (Rys. 9.9b i Rys. 9.9d). Pozostałe warunki początkowe immunoterapii przedstawia Tab. 8.1. Symulacja nie obejmuje leczenia z wykorzystaniem TIL. Długość cyklu chemioterapii wynosi 8 dni. Czas dozowania cytostatyka wynosi 1 dzień (24 godziny). Liczba powtórzeń cyklu chemioterapii wynosi 1. Chemioterapia rozpoczyna się w pierwszym dniu symulacji. Dla dawki cytostatyka $V_M = 1$ dawką skuteczną IL-2 konieczną do regresji nowotworu jest $V_I = 8 \cdot 10^6$ (regresja w 19 dniu symulacji), natomiast dla dawki $V_M = 0,5$ konieczna jest dawka IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^7$ (regresja w 19 dniu symulacji).



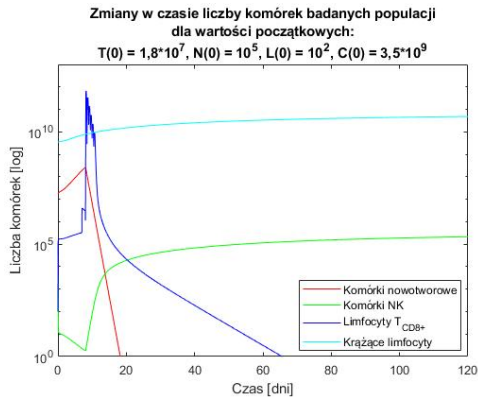
(a) Zmiany w czasie licz-

by komórek badanych populacji dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki cytostatyka $V_M = 1$, liczby powtórzeń cyklu chemioterapii równej 1, chemioterapii rozpoczętej 1 dnia oraz dawki IL-2 $V_I = 8 \cdot 10^6$. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 19$ dni (456 godzin).



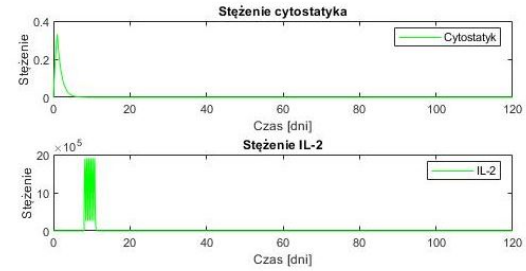
(b) Zmia-

ny w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki cytostatyka $V_M = 1$, liczby powtórzeń cyklu chemioterapii równej 1, chemioterapii rozpoczętej 1 dnia oraz dawki IL-2 $V_I = 8 \cdot 10^6$.



(c) Zmiany w czasie licz-

by komórek badanych populacji dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki cytostatyka $V_M = 0,5$, liczby powtórzeń cyklu chemioterapii równej 1, chemioterapii rozpoczętej 1 dnia oraz dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^7$. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 19$ dni (456 godzin).



(d) Zmia-

ny w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki cytostatyka $V_M = 0,5$, liczby powtórzeń cyklu chemioterapii równej 1, chemioterapii rozpoczętej 1 dnia oraz dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^7$.

Rys. 9.9: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla długości cyklu chemioterapii równej 8 dni, dawki cytostatyka $V_M = 1$ i $V_M = 0,5$, liczby powtórzeń cyklu chemioterapii równej 1, chemioterapii rozpoczętej 1 dnia oraz dawki IL-2 $V_I = 8 \cdot 10^6$ i $V_I = 2 \cdot 10^7$. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Wnioski:

- w leczeniu skojarzonym wykorzystującym chemioterapię zgodnie z warunkami początkowymi (9.9) oraz immunoterapię w oparciu o IL-2 oraz TIL (8.1) możliwe jest uzyskanie regresji nowotworu dla dawki dozowanego cytostatyka $V_M = 1$ oraz $V_M = 0,5$ poprzez nieznaczne zwiększenie dawki IL-2 (dla dawki $V_M = 1$ oraz $V_M = 0,5$ dawka IL-2 wynosi odpowiednio $V_I = 8 \cdot 10^6$ oraz $V_I = 2 \cdot 10^7$, podczas gdy dawka początkowa IL-2 jest równa $V_I = 5 \cdot 10^6$); te dawki cytostatyka są kilka razy mniejsze niż dawki wykorzystane we wcześniejszych symulacjach (dawka początkowa $V_M = 5$) oraz znacznie mniejsze niż dawka konieczna do wystąpienia regresji w leczeniu metodą wyłącznie chemioterapii dla cyklu o długości 8 dni ($V_M = 13$); leczenie skojarzone umożliwia więc zminimalizowanie skutków ubocznych działania cytostatyka poprzez wzmocnienie organizmu większą ilością IL-2.

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 Tab. 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 Tab. 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 Tab. 8.1.

Przyjęte parametry:

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

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

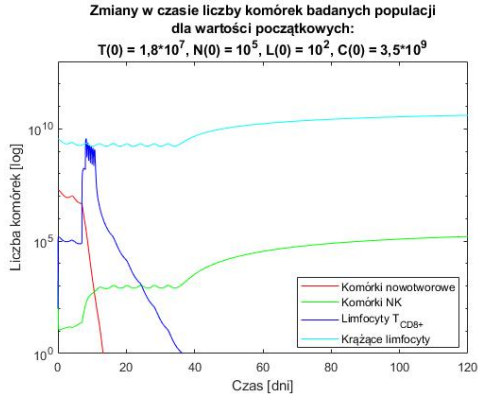
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla zmieniających się czasów wdrożenia poszczególnych terapii zebrano w Tab. 9.11.

W Tab. 9.11 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.

Tab. 9.11: 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).

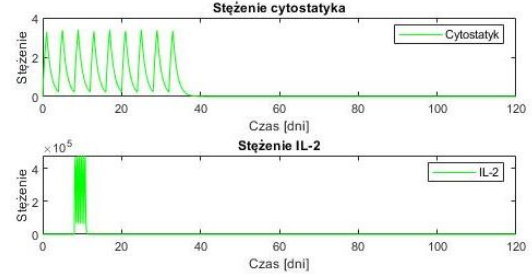
Dzień rozpoczęcia chemioterapii	Dzień rozpoczęcia immunoterapii	Dzień regresji nowotworu	$T(120)$ [liczba komórek]	Objętość nowotworu [mm^3]	Promień nowotworu [mm]
1	8	13,25	$9,43 \cdot 10^{-95}$	$9,43 \cdot 10^{-101}$	$2,8 \cdot 10^{-34}$
1	brak	brak	$9,8 \cdot 10^8$	980	6,16
8	1	8,29	$2,26 \cdot 10^{-101}$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

Rys. 9.10 przedstawia zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla leczenia skojarzonego metodami chemioterapii i immunoterapii, gdzie chemioterapia rozpoczyna się w 1 dniu symulacji, a immunoterapia w 8 dniu symulacji (Rys. 9.10a) oraz chemioterapia rozpoczyna się w 8 dniu symulacji, a immunoterapia w 1 dniu symulacji (Rys. 9.10c), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka i IL-2 (Rys. 9.10b i Rys. 9.10d). Warunki początkowe chemioterapii przedstawia Tab. 7.1, natomiast immunoterapii Tab. 8.1. Dla takich samych warunków początkowych w przypadku rozpoczęcia leczenia od chemioterapii, a następnie wykorzystania immunoterapii regresja następuje o 5 dni później niż w przypadku zastosowania metod leczenia w odwrotnej kolejności.



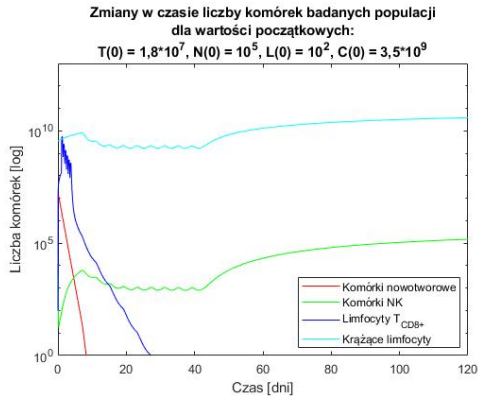
(a) Zmia-

ny w czasie liczby komórek badanych populacji dla chemioterapii rozpoczętej dnia 1 oraz immunoterapii rozpoczętej dnia 8. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 14$ dni (336 godzin).



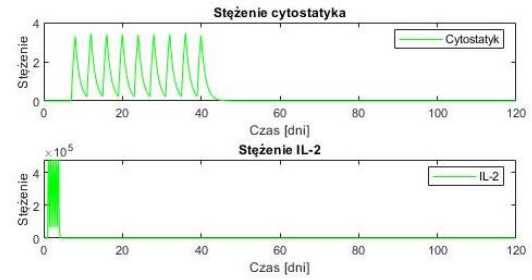
(b) Zmiany w czasie stężenia do-

zowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla chemioterapii rozpoczętej dnia 1 oraz immunoterapii rozpoczętej dnia 8.



(c) Zmia-

ny w czasie liczby komórek badanych populacji dla chemioterapii rozpoczętej dnia 8 oraz immunoterapii rozpoczętej dnia 1. Regresja nowotworu po czasie $T_r \approx 9$ dni (216 godzin).



(d) Zmiany w czasie stężenia do-

zowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla chemioterapii rozpoczętej dnia 8 oraz immunoterapii rozpoczętej dnia 1.

Rys. 9.10: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla chemioterapii rozpoczętej dnia 1 i immunoterapii rozpoczętej dnia 8 oraz dla chemioterapii rozpoczętej dnia 8 i immunoterapii rozpoczętej dnia 1. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Wnioski:

- w leczeniu skojarzonym metodą chemioterapii i immunoterapii czas potrzebny do uzyskania regresji nowotworu zależy od czasu wdrożenia poszczególnych terapii; w przypadku rozpoczęcia chemioterapii w 1 dniu, a immunoterapii w 8 dniu symulacji, regresja następuje w dniu 14, natomiast dla odwrotnej kolejności regresja

następuje około 1,5 razy szybciej, tj. w dniu 9 symulacji.

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 Tab. 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 Tab. 9.12. 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 Tab. 9.13.

Tab. 9.12: 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.

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. 9.13: 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.

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

Przyjęte parametry:

Parametry dla modelu bez uwzględnienia oraz z uwzględnieniem procesu leczenia ukazano w Tab. 9.14 oraz Tab. 6.2.

Tab. 9.14: Wartości parametrów modelu odpowiedzi immunologicznej na rozwijający się nowotwór bez uwzględnienia procesu leczenia dla pacjenta 2.

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	$8 \cdot 10^{-3}$

Czas symulacji:

Czas symulacji wynosił $T_k = 120$ dni.

Wyniki symulacji:

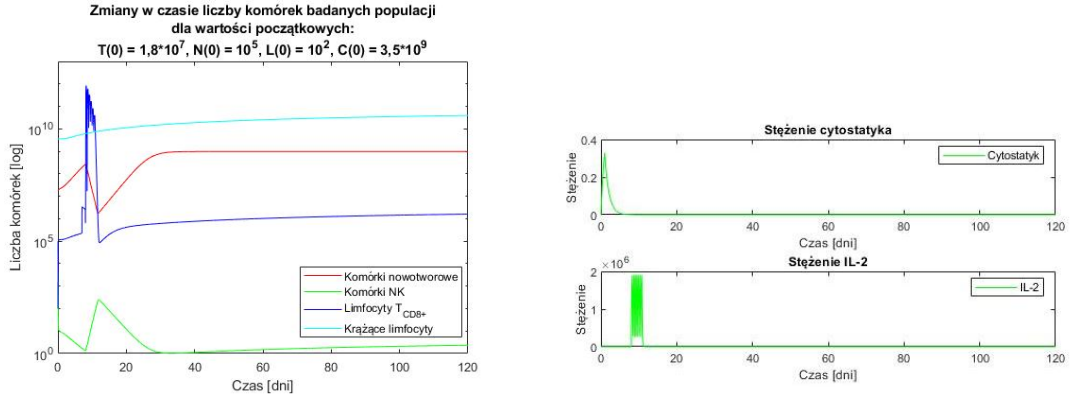
Wyniki przeprowadzonych symulacji dla pacjentów 1 oraz 2 zebrano w Tab. 9.15.

W Tab. 9.15 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.

Tab. 9.15: 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. 9.12 i 9.13).

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

Rys. 9.11 przedstawia zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji, tj. komórek nowotworowych, komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących dla leczenia skojarzonego metodami chemioterapii i immunoterapii u pacjenta 2 (Rys. 9.11a), a także zmiany w czasie stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka i IL-2 (Rys. 9.11b). Warunki początkowe chemioterapii przedstawia Tab. 9.12, natomiast immunoterapii Tab. 9.13. Leczenie skojarzone skuteczne u pacjenta 1 nie ma pozytywnego skutku w przypadku pacjenta 2 (ze względu na jego cechy osobnicze). Liczba komórek nowotworowych stabilizuje się na wysokim poziomie ($9,8 \cdot 10^8$) w 45 dniu symulacji.



Rys. 9.11: Zmiany w czasie liczby komórek badanych populacji oraz stężenia dozowanego podczas leczenia skojarzonego cytostatyka oraz IL-2 dla pacjenta 2 (Tab. 9.14 oraz Tab. 6.2) dla warunków początkowych chemioterapii umieszczonych w Tab. 9.12, immunoterapii umieszczonych w Tab. 9.13 oraz dawki IL-2 $V_I = 2 \cdot 10^7$. Początkowa liczba komórek nowotworowych $T(0) = 1,8 \cdot 10^7$, początkowa liczba komórek NK $N(0) = 10^5$, początkowa liczba limfocytów T_{CD8+} $L(0) = 10^2$, początkowa liczba limfocytów krążących $C(0) = 3,5 \cdot 10^9$.

Wnioski:

- skuteczność leczenia skojarzonego metodą chemioterapii (9.12) i immunoterapii (9.13) zależy od cech osobniczych układu immunologicznego pacjenta takich, jak: tempo dezaktywacji limfocytów T_{CD8+} oraz komórek NK przez komórki nowotworu, cytotoksyczność limfocytów T_{CD8+} czy liczba krążących limfocytów i tempo ich wymierania;
- istnieje możliwość dopasowania symulacji (modelu) do indywidualnego pacjenta (jego cech osobniczych) w celu określenia optymalnego dla niego leczenia skojarzonego.

10. Podsumowanie

W pracy rozważano model matematyczny pozwalający przeprowadzić symulacje rozwoju komórek nowotworowych w organizmie, a także odpowiedzi układu immunologicznego, tj. zmian w czasie liczby komórek NK, limfocytów T_{CD8+} oraz limfocytów krążących na rozwijający się nowotwór. Ponadto model ten umożliwia uwzględnienie procesu leczenia nowotworu metodą chemioterapii, immunoterapii oraz skojarzonymi metodami chemioterapii i immunoterapii. Matematyczne modelowanie umożliwia symulację badania przed przeprowadzeniem go w rzeczywistości, dzięki czemu pozwala poznać zbliżony efekt leczenia. To z kolei daje możliwość lepszego dopasowania terapii do konkretnego pacjenta, może zapobiec negatywnym efektom ubocznym (ujawnionym podczas symulacji), np. poprzez ograniczenie dawki cytostatyka podawanego pacjentowi do wartości granicznej, dla której zostaje osiągnięty zamierzony efekt (np. pokonanie nowotworu) przy jednoczesnej jak najmniejszej szkodliwości dla pacjenta. Ponadto, modelowanie może być przydatne w testowaniu nowych metod leczenia, które nie są jeszcze wykorzystywane w praktyce.

11. Perspektywy rozwoju

11.1 Interferony

Poza wymienionymi w pracy elementami układu odpornościowego ważną rolę odgrywają także interferony. Są to glikoproteiny wytwarzane przez limfocyty, fibroblasty i inne komórki, które biorą udział w odpowiedzi immunologicznej [21]. Należą one do humoralnych mechanizmów obronnych odporności nieswoistej. Ich funkcją jest, między innymi: hamowanie replikacji wirusów w komórce i proliferacji komórek (w szczególności nowotworowych), aktywowanie syntezy enzymów (rybonukleazy, syntetazy, kinazy białkowej) i cytotoksyczności makrofagów oraz limfocytów typu T, a także zwiększenie aktywności komórek cytotoksycznych [7].

Wśród interferonów można wyróżnić interferony [22]:

- α (leukocytarne) – produkowane głównie przez monocyty, makrofagi i limfocyty, zbudowane z białek zawierających od 165 do 166 aminokwasów. Znane są 22 podtypy interferonów α , które są kodowane przez co najmniej 23 geny zlokalizowane w chromosomie 9;
- β – produkowane przez fibroblasty, podobne do interferonów α (posiadają 30% analogicznych aminokwasów). Odpowiadające sobie geny interferonów typów α i β mieszczą się w krótszym ramieniu chromosomu 9;
- γ – produkowane przez limfocyty typu T, po stymulacji antygenami lub mitogenami. Gen kodujący interferony γ znajduje się w obrębie chromosomu 12.

Spśród wymienionych interferonów, największą liczbę podtypów posiada IFN- α . Jest on pierwszą cytokiną zarejestrowaną do leczenia nowotworów [10], stymuluje układ immunologiczny, ingerując w procesy różnicowania się komórek. Zwiększa również aktywność fagocytarną makrofagów i swoiste działanie cytotoksyczne limfocytów. Działa przeciwnowotworowo, poprzez hamowanie angiogenezy i blokowanie syntezy białek. W chorobach nowotworowych dawki interferonu dochodzą do 900 MU w ciągu 6 dni [21].

IFN- $\alpha 2a$ znajduje zastosowanie (w połączeniu z retinoidami) w terapii zaawansowanej postaci raka płaskonabłonkowego skóry i raka szyjki macicy, powodując ich regresję. Podczas terapii naczynek oraz czerniaka, hamuje proliferację komórek śródbłonna naczyń [33].

Interferon posiada wyraźne powinowactwo do komórek nerwowych i w dużym stężeniu działa neurotoksycznie. Podczas leczenia interferonem mogą wystąpić niepożądane zaburzenia psychiczne. Mogą to być stany zmęczenia, pogorszenie koncentracji, uwagi

i pamięci, ale także pełnoobjawowe epizody depresji, manii, zaburzenia lękowe czy zaburzenia świadomości [21].

Stopień ciężkości zaburzeń występujących po terapii interferonem, zależy od dawki oraz częstości podawania. Przy długotrwałym leczeniu IFN- α mogą wystąpić takie skutki uboczne, takie jak: zaburzenia czynności tarczycy, choroby autoimmunologiczne, retinopatia, cukrzyca, zaburzenia psychiczne, wysypka oraz utrata włosów [33].

11.2 Nowa odmiana limfocytów typu T

Odkryto [42, 43] nieznana dotychczas odmianę limfocytów typu T, która potrafi zabić wiele typów nowotworu. Mimo, że nie można jeszcze wykorzystać tej wiedzy w praktyce, wiadomo już, że jest to przełom w walce z nowotworami. Nowo odkryte komórki posiadają receptor wychwytyjący i zabijający komórki nowotworowe równocześnie zupełnie pomijając zdrowe tkanki. Dzięki tym limfocytom typu T podczas eksperymentów pokonano już m. in. komórki nowotworu skóry, kości, jajników oraz nerek. Obecnie nie wiadomo czy limfocyty te rzadko występują czy też znajdujące się na nich receptory w większości przypadków nigdy nie zostały aktywowane. Odkrycie nowej odmiany limfocytów typu T może być rozwiązaniem problemu selektywności stosowania obecnie znanych terapii opartych na modyfikowanych w laboratoriach własnych komórek układu odpornościowego pacjenta (np. CAR-T, TCR-T). Terapie te są stosowane głównie w różnych typach białaczki, natomiast nowa odmiana limfocyty typu T może być stosowana w wielu typach nowotworów i dla dowolnego pacjenta. Dużymi zaletami leczenia z zastosowaniem tego limfocyty byłyby uniwersalność terapii, a co za tym idzie niższy koszt. Testy na pacjentach mają rozpocząć się pod koniec roku [42, 43].

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 Gliński, 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 Wojas-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>

12. Dodatek

12.1 Tabela skrótów

Tab. 12.1: 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 cytotoksyczności
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	Tumor Necrosis Factor	Czynnik martwicy guza
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