

## Artykuły na zaproszenie Redakcji

### Porównanie radioterapii stereotaktycznej z zastosowaniem systemów Gamma Knife i CyberKnife w praktyce St. Joseph's Hospital i Barrow Neurological Institute

John J. Kresl

*Zastosowania kliniczne radioterapii stereotaktycznej stają się coraz szersze, ale pomimo to nie istnieje jedna stała, ujęta w standardy technika jej prowadzenia. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest obecność na rynku kilku różnych systemów umożliwiających leczenie z zastosowaniem radioterapii stereotaktycznej, a każdą z nich cechują inne możliwości i ograniczenia. W przypadku zmian śródczaszkowych najczęściej stosowana jest technika Gamma Knife. Pierwszy zintegrowany system do radioterapii stereotaktycznej sterowany uzyskanym obrazem nosi nazwę CyberKnife. Oba te systemy są dostępne w Barrow Neurological Institute (BNI). Celem niniejszej pracy jest przedstawienie naszych doświadczeń w zakresie stosowania tych dwóch różnych technik leczenia. Znajomość obu systemów pozwala nam na przeprowadzenie porównania z wyszczególnieniem zalet i wad obu metod.*

**Słowa kluczowe:** radioterapia stereotaktyczna, Gamma Knife, CyberKnife, guzy wewnątrzczaszkowe, guzy zewnątrzczaszkowe

#### Wstęp

W pracy przedstawiam przeprowadzone przez siebie porównanie dwóch systemów radioterapii stereotaktycznej (*stereotactic radiotherapy* SRT): systemu Gamma Knife (GK), używanego w Barrow Neurological Institute (BNI) od 1997 roku, i systemu CyberKnife (CK), zainstalowanego w naszym ośrodku w roku 2003. Porównanie ma charakter serii tabel. Wstęp do pracy stanowi krótka historia rozwoju SRT, wraz z omówieniem samej idei zastosowania leczenia nakierowywanego na zmiany śródczaszkowe. Przedstawiam również charakterystykę metod radioterapii z zastosowaniem źródeł radowych, które poprzedziły stosowanie SRT o kilka dziesięcioleci, punkty zwrotne na drodze rozwoju SRT oraz definicję SRT wg American Society for Therapeutic Radiology & Oncology/American College of Radiology (ASTRO/ACR) (Amerykańskiego Towarzystwa Radiologii Terapeutycznej i Onkologii oraz Amerykańskiej Szkoły Radiologii).

#### Definicja stereotaksji

*Słownik języka angielskiego Chambers'a* w wydaniu z 1988 roku [1] definiuje przedrostek „stereo-” jako „złożony, jednolity, twardy, spoisty, trójwymiarowy”, podczas gdy objaśnienie słowa „stereotaksja” brzmi następująco: „odnosząca się do precyzyjnej lokalizacji odpowiednich struktur mózgu w badaniu trójwymiarowym”. Również w edycji z roku 1988 *Ilustrowany słownik medyczny Dorlanda* [2] definiuje przymiotnik „stereotaktyczny” jako „odnoszący się do lub charakteryzujący się precyzyjnym umiejscowieniem w przestrzeni; najczęściej dotyczy ściśle określonych obszarów mózgu odpowiedzialnych za dane funkcje”. Wydaje się, że pierwszym autorem który zastosował określenie „stereotaktyczny” w kontekście radioterapii był Lars Leksell w 1951 [3] – wówczas w połączeniu z terminem „radiochirurgia”.

W odniesieniu do ram unieruchamiających przymiotnika „stereotaktyczny” użyli po raz pierwszy Barton Guthrie i John Adler [4]. Opisali w ten sposób stereotaktyczną ramę stosowaną przez Roberta Clarka u zwierząt. Ostatni prototyp tego urządzenia został zakupiony przez Uniwersytet Johna Hopkinsa w 1920 roku. Clarke sądził, że choć „od jej zastosowania u zwierząt do zaadaptowania jej na potrzeby leczenia ludzi droga jest bardzo daleka... ale... jeśli o mnie chodzi, nie mam żadnych wątpliwości co do tego, że wykorzystanie jej w leczeniu chirurgicznym ludzi jest wyłącznie kwestią czasu”. Termin „dostęp stereotaktyczny” został ukuty przez Clarka już na początku XX wieku [5].

## Idea lokalizowania zmian śródczaszkowych z zastosowaniem ram mocowanych do głowy

Idea lokalizowania zmian śródczaszkowych z wykorzystaniem ram mocowanych do struktur czaszki sięga XIX wieku. Stosując antropologiczne techniki kraniotomii, rosyjski anatom Zernow zaprojektował mocowaną do czaszki ramę, na której zamocowane było kilka łukowatych struktur służących do mapowania i pomiarów zwojów mózgowych. W roku 1881 Minor i Altuchow wykorzystali to urządzenie u kilku pacjentów w celu zlokalizowania i usunięcia zmian powierzchniowych w obrębie kory mózgowej. Opisana technika łącząca kraniotomię z czynnościową lokalizacją zmian śródczaszkowych okazała się być przydatna w znajdowaniu obszarów śródczaszkowych będących przyczyną istotnych znacznych patologii, ale choroby, u których stosowano wspomnianą metodę ginęły z powodu niedoskonałości technik chirurgicznych i powikłań ogólnomedycznych [6].

## Rad i radon w leczeniu zmian śródczaszkowych

Pod koniec lat trzydziestych XX wieku guzy mózgu leczono z zastosowaniem napromieniania wiązkami zewnętrznymi, stosując promienie rentgenowskie lub tzw. bomby radowe. Stosowano również specjalne noszone przez chorych czapki lub hełmy, w których umocowane było kilka źródeł promieniowania. Wykonywane były one ze skóry lub specjalnego tworzywa. Czasem wprowadzano bezpośrednio do mózgu igły lub rurki radowe (brachyterapia śródtkankowa z wykorzystaniem radu) – technika ta stosowana była bardzo rzadko, ale zachowało się w literaturze kilka opisów jej przypadków. Jeden z nich przedstawia próbę zastosowania takiego leczenia podjętą przez Harveya Cushinga już w 1923 roku, jednak Cushing był rozczarowany wynikami tej metody i poniechał prac nad jej dalszym rozwojem [7, 8].

Inny przykład pochodzi z 1929 r. – tym razem spod pióra Sir Henry'ego Souttara [9], chirurga z London Ho-

spital. W leczeniu naczyńniaka opon zastosował technikę, w której w obrębie danego obszaru czaszki pozostawiał umiejscowiony centralnie otwór, poprzez który igły radowe można było usunąć po zakończeniu terapii. Souttar wykorzystał sześć igieł radowych, każda miała 2 cm długości i aktywność promieniotwórczą odpowiadającą 2 mg radu. Podsumowując wyniki swojej pracy, Souttar stwierdził: „otwiera się przed nami zupełnie nowy obszar chirurgii, którego ograniczeń nie jesteśmy w stanie dostrzec” [9].

Jednak ani Cushing, ani Souttar nie stosowali ram stereotaktycznych. Zostały one wprowadzone do praktyki klinicznej dopiero w latach pięćdziesiątych – początkowo jedynie podczas procedur wszczepiania implantów radonowych do przysadki mózgowej. Kiedy po II wojnie światowej sztuczne izotopy stały się dostępne dla celów medycznych, ziarna radonu zastąpiono w latach sześćdziesiątych małymi źródłami  $^{90}\text{Itr}$ .  $^{90}\text{Itr}$  jest czystym izotopem emitującym promieniowanie beta posiadającym maksymalną energię 2,25 MeV i czas półtrwania 64,2 godziny [10]. Potem na horyzoncie pojawił się Lars Leksell, system Knife, stereotaktyczna radioterapia z wykorzystaniem akceleratora liniowego z zastosowaniem mocowanej do głowy rami oraz system CyberKnife. I oto cała historia.

## Punkty zwrotne w dziejach SRT

Tabela I przedstawia najważniejsze punkty zwrotne w dziejach SRT, poczynając od oryginalnego systemu opracowanego przez Larsa Leksella w 1951 r. do pierwszego klinicznego zastosowania systemu CyberKnife na terenie Stanford University w 1994 r.

## Cechy konformalne radioterapii stereotaktycznej

Pod koniec lat osiemdziesiątych ograniczenia radioterapii stereotaktycznej prowadzonej w oparciu o mocowane do czaszki rami stawały się coraz bardziej oczywiste. Główny problem stanowiło opracowanie metody lecze-

Tab. I. Punkty zwrotne w rozwoju SRT

Rok	Autor	Rozwój SRT
1951	Leksell	Opis metody i zastosowanie u pierwszego chorego: Sztokholm [3]
1958	Larsson	Zastosowanie wiązki protonowej o mocy 185 MeV: Upsala [11]
1967	Leksell	Pierwszy chory leczony w systemie Gamma Unit [12]
1974	Larsson	Zaproponowanie izocentrycznych akceleratorów liniowych jako korzystnych źródeł w SRT [13]
1975	Leksell	Opracowanie systemu Gamma Unit drugiej generacji [14]
1983	Betti	Pierwsza modyfikacja akceleratora liniowego na potrzeby SRT: Buenos Aires [15, 16]
1985	Colombo	Zastosowanie kliniczne techniki nie-współpłaszczyznowych, nakładających się na siebie łuków: Vicenza [17] i Heidelberg (Hartman [18])
1986	Lutz	Początek SRT opartej na nie-współpłaszczyznowych akceleratorach liniowych na terenie Ameryki Północnej: uniwersytet Harvarda, Boston [19] I Uniwersytet McGill, Montreal przez Podgorsaka [20, 21]
1991	Adler	Opisanie techniki CyberKnife [4]
1994	Adler	Pierwsze zastosowanie CyberKnife do leczenia zmian śródczaszkowych [22]

nia zmian z zastosowaniem konformalnej SRT posiadającej następujące cechy: (1) brak konieczności stosowania unieruchomienia w ramie, (2) możliwość umiejscowienia danej zmiany względem znaczników radiograficznych i stałych punktów anatomicznych i (3) zapewnienie pozyskiwania obrazów i planowania w czasie zbliżonym do rzeczywistego

Stało się jasne, że uzupełnienie systemów do prowadzenia SRT o elementy zapewniające wymienione cechy umożliwi zastosowanie SRT w każdej okolicy anatomicznej oraz skompensowanie ewentualnych zmian napromienienia wywołanych poruszaniem się całego człowieka oraz narządów wewnętrznych i leczonej zmiany, a – co więcej – umożliwi frakcjonowanie napromieniania. Systemem posiadającym wszystkie wymienione cechy okazał się system CyberKnife [4, 22].

### Wytyczne ASTRO/ACR (American Society for Therapeutic Radiology & Oncology/American College of Radiology) dotyczące kodowania procedur z zakresu radiologii onkologicznej

Wskazówki ASTRO/ACR dotyczące kodowania procedur z zakresu radiologii onkologicznej na rok 2005 [23] definiują SRT jako „wysoce precyzyjne podanie ablacyjnej dawki promieniowania na określoną zmianę, typowo w obrębie mózgu. SRT jest zazwyczaj prowadzona z zastosowaniem wysokich dawek w jednej frakcji, za pomocą mniejszych dawek powtarzanych w kilku frakcjach na przestrzeni dni lub tygodni lub poprzez wielokrotne hiperfrakcjonowanie dawki w ciągu jednego dnia w celu minimalizacji uszkodzeń zdrowych tkanek”.

„Wytyczne” definiują również radioterapię stereotaktyczną ciała (*stereotactic body radiation therapy* – SBRT) jako nową, rozwijającą się metodę leczenia polegającą na wysoce precyzyjnym dostarczeniu wysokich dawek promieniowania na określony obszar w obrębie całego ciała z zastosowaniem pojedynczej dawki lub kilku mniejszych frakcji.

Początkowo SRT stosowana była jedynie w leczeniu zmian śródczaszkowych z zastosowaniem jednej frakcji i nazywana była wówczas radiochirurgią stereotaktyczną (SRS). Jednakże bardziej nowoczesne systemy SRT umożliwiają zastosowanie jej w dowolnej okolicy anatomicznej, czy to za pomocą jednej dawki, czy też stosując odpowiednie schematy hipofrakcjonowania, a zatem zamiast

SRS należy raczej stosować określenia takie jak SBRT lub (preferowane przez mnie) SRT.

### System Gamma Knife

BNI to jeden z niewielu ośrodków wyposażonych zarówno w system Gamma Knife, jak i CyberKnife. W Tabeli II przedstawiłem wykaz jednostek chorobowych, w leczeniu których stosowaliśmy system Gamma Knife. System CyberKnife został zainstalowany później. Wprowadziliśmy go ze względu na ograniczenia związane ze stosowaniem SRT w oparciu o ramy stereotaktyczne występujące w przypadku systemu Gamma Knife. Ograniczenia te zostały przedstawione w Tabeli III, podczas gdy w Tabeli IV ujęto przypuszczalne przyczyny niedokładności obserwowanych w przypadku stosowania SRT opartej na technice ram. Rycina 1 ukazuje przypadek kliniczny stanowiący przykład sytuacji, w której niemożliwe jest zastosowanie opartego na technice systemu Gamma Knife.

Tab. II. Pacjenci BNI leczeni za pomocą systemu Gamma Knife w okresie od marca 1997 do sierpnia 2004 r.

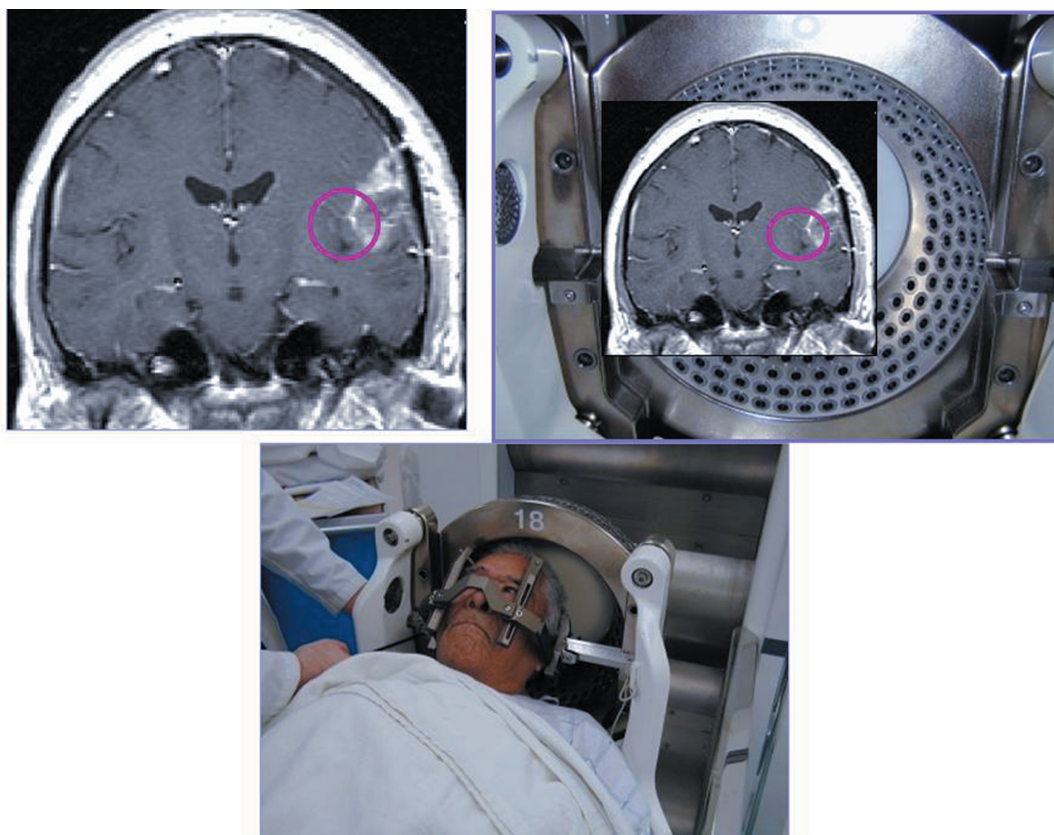
Schorzenie	Liczba przypadków
Przerzuty do mózgu	715
Łagodne guzy	587
Glejaki	405
Zaburzenia czynnościowe (neuralgia n. trójdzielnego)	337
Zmiany naczyniowe	149
Różne zmiany w obrębie podstawy czaszki	63
W sumie	2256

### System CyberKnife

Odstąpienie od stosowania ramy i przyłożenie znaczników bezpośrednio do głowy pozwala ostatecznie uciec od problemów wynikających ze stosowania ram. Rozwiązanie takie zostało zastosowane w technice CyberKnife – system ten nie wymaga stosowania ramy stereotaktycznej. W Tabeli V przedstawiłem wykaz jednostek chorobowych, w leczeniu których stosowaliśmy system CyberKnife, a w Tabeli VI wyszczególnione zostały cechy charakterystyczne tego systemu. Tabela VII przedstawia przypusz-

Tab. III. Ograniczenia systemu SRT opartego na stosowaniu ramy

- Ból w miejscu wprowadzenia szpilek, również w okresie pooperacyjnym – wymaga to zatrudnienia anestezjologa i pielęgniarki oraz zmusza do monitorowania chorego
- Napromienianie niektórych zmian jest bardzo trudne, a nawet niemożliwe ze względu na ich umiejscowienie. Wynika to z ograniczeń technicznych w pewnych ułożeniach pacjent lub rama kolidowałaby z resztą wyposażenia
- Konieczne jest przeprowadzenie obrazowania w tym samym dniu
- Frakcjonowanie dawek jest utrudnione, a z punktu widzenia chorego związane z niewygodami
- Nie istnieje możliwość leczenia zmian zewnątrzczaszkowych
- Obrazowanie w trakcie napromieniania nie jest możliwe
- Nie jest możliwe zaobserwowanie i przeanalizowanie ruchów chorego podczas napromieniania



Ryc. 1. Przypadek kliniczny ilustrujący brak możliwości leczenia z zastosowaniem systemu Gamma Knife ze względu na lokalizację zmiany – w tym przypadku rama stereotaktyczna wchodziłaby w kolizję z kolimatorem

Tab. IV. Prawdopodobne przyczyny niedokładności obserwowane podczas stosowania techniki SRT opartej na ramie

- Błędy związane ze skokowymi ustawieniami stosowanymi podczas techniki SRT opartej na ramie [24]
  - wyбір punktu
  - obliczenia wektorowe
  - ustawienia Vernierowskie
  - złącza i przemieszczenia mechaniczne
- Mechaniczne ograniczenia ram stosowanych podczas SRT: czynniki związane z cechami samej ramy [25]
  - szttywne i całkowite unieruchomienie głowy chorego w ramie referencyjnej
  - mechaniczne cechy samej konstrukcji ramy, tj. jej projekt inżynierski i materiały, z których została skonstruowana
  - mechaniczne obciążenie ramy związane z ciężarem głowy i ramion chorego, które może powodować fizyczne odkształcenie samej ramy
- Błędy związane z ułożeniem pacjenta związane ze zmianami pozycji – z pleców na brzuch [25]

Tab. V. Pacjenci BNI leczeni za pomocą systemu CyberKnife w okresie od października 2003 do marca 2005 r.

Schorzenie	Liczba przypadków
Śródczaszkowo	
Przerzuty do mózgu	33
Głejaki	17
Oponiaki	33
Guzy przysadki/ucha	21
Inne	17
Zewnątrzczaszkowo	
Guzy okolicy głowy i szyi	7
Guzy kręgosłupa	34
Guzy płuca	9
Inne	7
W sumie	178

Tab. VI. Cechy charakterystyczne systemu CyberKnife

- Każdorazowo podczas pozycjonowania wiązki z akceleratora liniowego uzyskuje się nowy zestaw obrazów, które poddawane są kolejnej analizie
- Pomiędzy zrobotyzowanym ramieniem a układem obrazowania istnieje sprzężenie zwrotne, które pozwala korygować wiązkę z akceleratora liniowego, kompensując w ten sposób zmiany położenia chorego i ewentualne przemieszczenia obszaru napromienianego, a zatem system CyberKnife rozpoznaje zmiany położenia pacjenta lub celu
- Odstęp czasowy pomiędzy pozyskaniem obrazu a przemieszczeniem akceleratora liniowego wynosi 4-10 sekund
- W typowym przypadku podczas SRT można podać dawkę 6-30 Gy na margines PTV za pomocą 100-300 przecinających się wiązek

**Tab. VII. Prawdopodobne przyczyny niedokładności obserwowane podczas stosowania techniki SRT bez ramy**

– Obróbka danych pozyskanych za pomocą technik obrazowania rejestracja i przenoszenie pozyskanych obrazów do systemu planowania fuzja i skalowanie obrazów pozyskanych za pomocą MRI, TK, angiografii oraz PET
– Protokoły przekrojów TK/Rezonans magnetyczny rozdzielczość obrazów wierność odwzorowania geometrycznego obrazów rozmycie i utrata ostrości obrysów podczas rekonstrukcji inne, zależne od operatora, odchylenia w zakresie odwzorowania struktur wolumetryczna dokładność skanera
– Precyzja podania wiązki wierność zrobotyzowanego pozycjonowania pozycjonowanie i stabilizacja leżanki

czalne przyczyny niedokładności obserwowanych w przypadku stosowania SRT bez stosowania ram.

### Porównanie systemów Gamma Knife i CyberKnife: wady i zalety

Stosując system CyberKnife sterowany obrazem, Chang i wsp. [26] obserwowali stopień dokładności i precyzyjności nie przekraczający jednego voxela (volume pixels) w stosunku do badań obrazowych. W kolejnej pracy Yu i wsp. obserwowano odchylenia rzędu 1 mm [27]. Błędy wpływające na dokładność w stopniu znamionym klinicznie mogą wiązać się z celowaniem na odpowiednią okolicę anatomiczną, ze stereotaktycznym lokalizowaniem oraz z samym napromienianiem. Możliwe do osią-

gnięcia w warunkach klinicznych poziomy dokładności zostały przedstawione w Tabeli VIII. Oceny wad i zalet systemów Gamma Knife i Cyberknife przedstawiono w Tabelach IX i X.

**Tab. VIII. Stopnie dokładności systemów SRT możliwe do osiągnięcia w warunkach klinicznych [24, 25]**

system SRT	Dokładność (mm)
CyberKnife	0,7
Gamma Knife	1,7
Akcelerator liniowy z ruchomym ramieniem	2,0

**Tab. IX. Zalety i wady systemu Gamma Knife**

Zalety
– Optymalizacja odpowiedzi na dawkę oraz ocena wyników oparta na ponad 30 latach doświadczeń klinicznych
– Szybkie planowanie leczenia
– Leczenie malformacji tętnico-żylnych jest porównywalne z systemem CyberKnife bez wykonywania fuzji obrazów uzyskanych za pomocą arteriografii
– Skuteczne leczenie neuralgii nerwu trójdzielnego za pomocą SRT (w przypadku zastosowania systemu CyberKnife konieczne jest wykonanie cysternografii)
– Możliwe wdrożenie terapii w tym samym dniu: cykl leczenia można zakończyć w ciągu tygodnia
– Niezawodność systemu i bardzo niewielkie straty czasu
Wady
– Konieczność montowania ramy
– Niezbędny dodatkowy personel: anestezyjologiczny i pielęgniarski
– Brak możliwości obrazowania w czasie rzeczywistym: brak możliwości kompensowania zmian związanych ze zmianami położenia w trakcie prowadzenia terapii
– Brak możliwości zastosowania w lokalizacjach zewnątrzczaszkowych, ograniczenie stosowania tylko do mózgu i czaszki
– Brak możliwości stosowania dawek frakcjonowanych
– Dużo czasu pozostaje niewykorzystane w dniu leczenia
– Konieczność ponoszenia kosztów wymiany źródła kobaltowego <sup>60</sup> Co co 5-6 lat
– Przeważała technologia <ul style="list-style-type: none"> <li>ograniczenia wynikające z rozmiarów zmiany</li> <li>brak możliwości planowania odwróconego</li> <li>brak możliwości skompensowania homogeniczności dawki</li> </ul>

Tab. X. Zalety i wady systemu CyberKnife SRT

Zalety
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Możliwe stosowanie w obrębie całego ciała, zarówno śródczaszkowo jak i pozaczaszkowo</li> <li>– Możliwe frakcjonowanie</li> <li>– Planowanie leczenia oparte na obrazowaniu za pomocą TK</li> <li>– Możliwość zaobserwowania i skompensowania zmian związanych z poruszeniem się chorego lub przemieszczeniem zmiany</li> <li>– Oprogramowanie umożliwiające planowanie odwrócone</li> <li>– Brak konieczności stosowania ramy; nie wymaga zatrudniania personelu anestezyjologicznego, pielęgniarzkiego czy innego dodatkowego</li> <li>– Możliwe dostosowywanie sekwencyjnego wykorzystywania aparatury na potrzeby różnych pacjentów – lepsze wykorzystanie czasu pracy aparatury</li> </ul>
Wady
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Oprogramowanie w trakcie doskonalenia. Fuzja obrazów i planowanie są bardzo czasochłonne</li> <li>– Konieczność umieszczania znaczników w przypadku lokalizacji w obrębie kręgosłupa lub reszty ciała</li> <li>– Konieczność obrazowania TK w celu planowania leczenia i oceny ewentualnych zmian położenia</li> <li>– Niepełna ocena kliniczna i brak badań klinicznych</li> <li>– Nieznane optymalne schematy frakcjonowania dawek</li> <li>– Nieznane optymalne wartości PTV dla lokalizacji pozaczaszkowych</li> <li>– Konieczność koordynowania planowania leczenia i napromieniania</li> <li>– Brak możliwości sterowania ręcznego bez zastosowania zautomatyzowanego systemu sterowanego komputerowo</li> <li>– Złożona obsługa techniczna</li> </ul>

## Wnioski

W chwili obecnej posiadamy na terenie BNI zarówno system CyberKnife jak i Gamma Knife. Pozwoliło nam to wyłonić grupy chorych, dla których optymalne jest zastosowanie jednej z tych dwóch metod. Opracowanie takie zostało przedstawione w Tabeli XI w oparciu o informacje zawarte w poprzednich tabelach zawartych w niniejszej pracy.

Tab. XI. Preferencje dotyczące wyboru danego systemu SRT w zależności od leczonych schorzeń w doświadczeniu BNI

CyberKnife	Gamma Knife
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kręgosłupy</li> <li>– Lokalizacje pozaczaszkowe</li> <li>– Guzy okolicy skrzyżowania n. wzrokowych</li> <li>– Nerwy czaszkowe</li> <li>– Pień mózgu</li> <li>– Ekstremalne lokalizacje śródczaszkowe</li> <li>– Preferencje chorego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Malformacje tętniczo-żylne</li> <li>– Neuralgia nerwu trójdzielnego</li> <li>– Szybkie terapie</li> <li>– Pacjenci dojeżdżający z daleka</li> </ul>

### John J. Kresl MD, PhD

Department of Radiation Oncology  
 St. Joseph's Hospital & Medical Center  
 CyberKnife Center & Gamma Knife Center  
 Barrow Neurological Institute  
 350 West Thomas Road  
 Phoenix  
 AZ 85013  
 USA

## Piśmiennictwo

1. *Chamber's English dictionary*. 7 wyd.. Cambridge: Chambers; 1988.
2. *Dorland's illustrated medical dictionary*. 27 wyd. Philadelphia: WB Saunders; 1988.
3. Leksell L. The stereotaxic method and radiosurgery of the brain. *Acta Chir Scand* 1951; 102: 316-9.
4. Guthrie BL, Adler JR. Computer-assisted preoperative planning, interactive surgery and frameless stereotaxy. W: Selman W (red.). *Clinical neurosurgery*. Baltimore: Williams & Wilkins, 1991; p. 112-31.
5. Horsley V, Clarke RH. The structure and function of the cerebellum examined by a new method. *Brain* 1908; 31: 45-124.
6. Kannndel EI, Schavinsky YV. Stereotaxic apparatus and operations in Russia in the 19<sup>th</sup> century. *J Neurosurg* 1972; 37: 407-11.
7. Schulder M, Loeffler JS, Howes AE i wsp. The radium bomb: Harvey Cushing and the interstitial irradiation of gliomas. *J Neurosurg* 1996; 84: 530-2.
8. Schulder M, Rosen J. Therapeutic radiation and the neurosurgeon. *Neurosurg Clin N Am* 2001; 12: 91-100.
9. Souttar HS. *Radium and its surgical applications*. London: Heinemann; 1929.
10. Mould RF. *A century of X-rays and radioactivity in medicine*. Bristol: Institute of Physics Publishing; 1993, s. 140.
11. Breuer H, Smit BJ. *Proton therapy and radiosurgery*. Berlin: Springer; 2000.
12. Leksell L. *Stereotaxis and radiosurgery: an operative system*. Springfield: Charles C Thomas; 1971.
13. Larsson B, Liden K, Sorby B. Irradiation of small structures through intact skull. *Acta Radiol Ther Phys Biol* 1974; 13: 513-34.
14. Arnt J, Backlund EO, Larsson B i wsp. Stereotactic irradiation of intracranial structures: physical and biological considerations. W: Szilka G (red.). *Stereotactic cerebral irradiation*. Amsterdam: Elsevier; 1979, s. 81-2.
15. Betti O, Derechinsky V. Irradiation stéréotaxic multifasceaux. *Neurochirurgie* 1983; 29: 295-8.
16. Betti O, Derechinsky V. Hyperselective encephalic irradiation with linear accelerator. *Acta Neurochir* (Vienna) 1984; 33 suppl: 385-90.
17. Colombo F, Benedetti A, Pozza RC i wsp. External stereotactic irradiation by linear accelerator. *Neurosurg* 1985; 16: 154-60.
18. Hartmann GH, Schlegl W, Sturm V i wsp. Cerebral radiation surgery using moving field irradiation at a linear accelerator facility. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1985; 11: 1185-92.
19. Lutz W, Winston KR, Maleki N. A system for stereotactic radiosurgery with a linear accelerator. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1988; 14: 373-81.
20. Podgorsak EB, Olivier A, Pla M i wsp. Physical aspects of dynamic stereotactic radiosurgery. *Appl Neurophysiol* 1987; 50: 263-8.
21. Podgorsak EB, Olivier A, Pla M i wsp. Dynamic stereotactic radiosurgery. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1988; 14: 115-26.
22. Adler JR, Cox RS. Preliminary experience with the CyberKnife: image-guided stereotactic radiosurgery. W: Alexander E, Kondziolka D, Loeffler JS (red.). *Radiosurgery*. Basel: S Karger; 1996, s. 112-31.
23. *ASTRO/ACR guide to radiation oncology coding 2005. Stereotactic radiation therapy (STR)*, American Society for Therapeutic Radiology and Oncology, Fairfax, and American College of Radiology, Reston, Virginia. 2005, rozdz. 14, 77-82.
24. Maciunas RJ, Galloway, RL, Latimer, JW. The application accuracy of stereotactic frames. *Neurosurg* 1994; 35: 682-95.
25. Rholffing, T, Maurer, CR, Dean, D i wsp. Effects of changing patient position from supine to prone on the accuracy of a BRW stereotactic head frame system. *Neurosurg* 2003; 52: 610-8.
26. Chang SD, Main W, Martin DP i wsp. An analysis of the accuracy of the CyberKnife: a robotic frameless stereotactic radiosurgical system. *Neurosurg* 2003; 52: 140-7.
27. Yu C, Main W, Taylor D i wsp. An anthropomorphic phantom study of the accuracy of CyberKnife radiosurgery. *Neurosurg* 2004; 55: 1138-49.

Otrzymano i przyjęto do druku: 22 stycznia 2006