

## Wybrane zastosowania modeli komputerowych w medycynie

### Selected applications of computer models in medicine

Emilia Mikołajewska<sup>1</sup>, Dariusz Mikołajewski<sup>2</sup>

#### STRESZCZENIE

Coraz szersze wykorzystanie systemów informatycznych w medycynie sprzyja znajdowaniu dla nich wciąż nowych zastosowań. Przykładem jest tworzenie modeli komputerowych wykorzystywanych w naukach medycznych i biologicznych. Artykuł przybliży ich wybrane zastosowania oraz możliwe kierunki rozwoju w świetle najnowszej wiedzy.

#### SŁOWA KLUCZOWE

modele w medycynie, założenia modeli, komputerowy system wspomagania decyzji medycznych, analiza sygnałów biomedycznych.

#### ABSTRACT

Wide application of IT systems in medicine conduces to find new applications for them. One of the above is performing simulation in medical and biological sciences with the use of computer models. This article aims at familiarizing their selected applications and possible directions of further researches according to the latest knowledge.

#### KEY WORDS

models in medicine, assumptions of models, computer medical decision support system, biomedical data analysis

<sup>1</sup> Oddział Kliniczny Paraplegii z Pododdziałem Wybudzeń, Oddział Kliniczny Wczesnej Rehabilitacji Neurologicznej, Klinika Rehabilitacji 10. Wojskowego Szpitala Klinicznego z Polikliniką SP ZOZ w Bydgoszczy  
<sup>2</sup> Katedra Informatyki Stosowanej Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

#### ADRES

##### DO KORESPONDENCJI:

Dr n. biol. Emilia Mikołajewska  
Klinika Rehabilitacji  
10. Wojskowego Szpitala Klinicznego z  
Polikliniką SP ZOZ  
ul. Powstańców Warszawy 5  
85-681 Bydgoszcz  
tel. 725 88 99 09  
e-mail: e.mikolajewska@wp.pl

Ann. Acad. Med. Siles. 2011, 65, 1-2, 78-87  
Copyright © Śląski Uniwersytet Medyczny  
w Katowicach  
ISSN 0208-5607

WPROWADZENIE

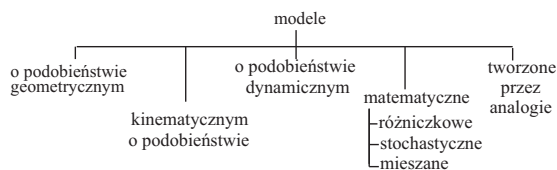
Zastosowania informatyki w medycynie już się rozpowszechniły [1]. Dzieje się tak z kilku zasadniczych powodów:

- 1) starzenie się społeczeństwa oraz wzrost przeżywalności wypadków i ciężkich schorzeń prowadzi do wzrostu zapotrzebowania na usługi medyczne, a tym samym zwiększenia zasobu danych do wprowadzenia, przechowywania, analizy i udostępniania,
- 2) system służby zdrowia musi być kompromisem między oczekiwaniami pacjentów a możliwościami finansowymi,
- 3) rosnący popyt na specjalistów medycznych stosujących coraz bardziej wyszukane metody terapeutyczne nie jest zaspokajany ze względu na wydłużający się czas ich kształcenia i nabywania niezbędnego doświadczenia klinicznego,
- 4) rozwój narzędzi informatycznych pozwala na stosowanie rozwiązań wcześniej niedostępnych, jak np. systemy telemedyczne, zdalne nauczanie czy systemy ekspertowe oparte na sztucznej inteligencji.

Metody oparte na przetwarzaniu danych i wykorzystaniu sztucznej inteligencji trafiły również do systemów biometrycznych stosowanych w medycynie sądowej [2]. Pomimo braku przekonania części kadr medycznych co do możliwości symulacji komputerowych, stosowanie modeli w omawianym zakresie obejmuje całe nauki medyczne i biologiczne, od diagnostyki obrazowej, poprzez neurologię i neurofizjologię, kardiologię, ortopedię, traumatologię i rehabilitację, aż po medycynę reprodukcyjną, biologię medyczną i farmację. Wynika z tego ogromna różnorodność rodzajów wykorzystywanych modeli, którą trudno objąć niespecjalistom.

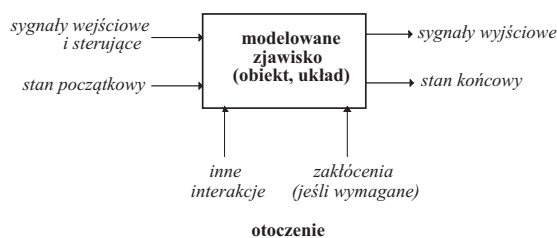
Proces ten będzie postępował, gdyż przy nieustannym postępie w tym zakresie część z poznanych procesów, w tym neurofizjologicznych, już dawno przekroczyła pod względem złożoności i szczegółowości poziom percepcji pojedynczego badacza [3]. Geneza modeli informatycznych w medycynie sięga pierwszej połowy XX w. – prac J. von Neumanna, N. Wienera, A. L. Hodgkina, A. Huxleya i G. H. Hardy’ego, a z naukowców polskich – prof. J. J. Trąbki [4]. Obecnie synergia nauk przyrodniczych i ścisłych w tym zakresie jest szczególnie widoczna dzięki szerszemu wykorzystaniu

osiągnięć bioinformatyki, neurobiologii, biocybernetyki i neurocybernetyki oraz inżynierii biomedycznej.



Ryc. 1. Zasadniczy podział modeli (wariant).  
Fig. 1. Basic classification of models (version).

Model w tym wypadku oznacza uproszczony system, funkcjonujący dla wybranych aspektów jego działania, podobnie – z wystarczającą w danym zastosowaniu dokładnością – jak modelowane zjawisko/obiekt. Pozwala on za pomocą obliczeń przewidzieć np. przebieg modelowanego procesu. Model matematyczny jest podstawą do stworzenia modelu komputerowego, znacznie zwiększającego jego możliwości. Model komputerowy (symulacyjny) to program mający na celu opisanie związków między co najmniej dwiema wielkościami lub reprezentacjami numerycznymi analizowanych cech. Umożliwia on, po wprowadzeniu określonych parametrów modelowanego zjawiska/obiektu oraz jego stanu początkowego, otrzymanie na drodze obliczeniowej określonych przebiegów czasowych i charakterystyk. Bezpośrednim celem ww. modeli jest opisanie i symulowanie oddziaływań wewnątrz modelowanego systemu i/lub jego interakcji z otoczeniem.



Ryc. 2. Istota modelu komputerowego (symulacyjnego).  
Fig. 2. Computer model: the essence of the matter.

Wyjściowe modele matematyczne tworzone są zwykle dwuetapowo:

- etap I obejmuje ilościowy i jakościowy opis modelowanego procesu/zjawiska, przeprowadzony z założoną dokładnością (np. z zastosowaniem założeń upraszczających itp.),

- etap II obejmuje stworzenie oraz testy struktury matematycznej odzwierciedlającej ww. opis.

Realizacja tej procedury zakłada otrzymanie w efekcie stabilnego modelu dającego jednoznaczne rozwiązania. Właściwie wykonane modele:

- mogą działać w zmienionej skali czasu i/lub przestrzeni,
- pomagają wyodrębnić istotne mechanizmy modelowanego procesu,
- pomagają poznać lepiej dynamikę działania procesu, ograniczeń, jakim podlega, ich wpływ oraz możliwe sposoby wyeliminowania go,
- w wypadkach złożonych procesów dopiero modele, dzięki przyjętym uproszczeniom, mogą uczynić je zrozumiałymi,
- uzupełniają badania eksperymentalne, które m.in. przez niepełne zrozumienie mechanizmów działania, mogą nie uwzględniać wszystkich zmiennych/parametrów,
- niekiedy dopiero model, poprzez fizyczną symulację określonych mechanizmów biologicznych (i np. wielokrotne testowanie ich pod wpływem bodźców różnego typu) weryfikuje, czy są prawidłowe i, co ważniejsze, istotne dla działania całości,
- znacząco rozszerzają możliwości badacza dzięki możliwości wielokrotnego powtarzania badań, również w warunkach niemożliwych lub zbyt kosztownych do osiągnięcia w naturze,
- często pozwalają, już na wstępnym etapie badań, wyeliminować koncepcje skrajne, pozostawiając do głębszego zbadania tylko godne uwagi.

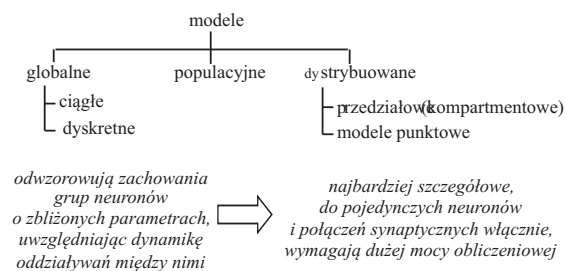
Modele pozwalają nie tylko na lepsze poznanie mechanizmów rządzących modelowanymi zjawiskami, ale również na tworzenie na ich podstawie hipotez dotyczących działania układu/zjawiska. W ten sposób modele komputerowe, dzięki możliwości testowania różnych hipotez za pomocą obliczeń, stanowią ogniwo pośrednie między rozważaniami czysto teoretycznymi a technikami eksperymentalnymi, umożliwiając m.in.:

- integrację doświadczeń uzyskanych wszystkimi dostępnymi sposobami,
- interpretację ich jako całości,
- obrazowanie założeń poczynionych na podstawie eksperymentów i obliczeń teoretycznych oraz dokonanych intuicyjnie (np. w przypadku nieznanych mechanizmów).

Modele nie są pozbawione wad, gdyż trudno zbudować model dobrze dopasowany do modelowanego obiektu lub mechanizmu. Należy przy tym uwzględnić następujące ograniczenia:

- model prosty nie może być jednocześnie wielopoziomowy,
- model zbyt złożony może być niepraktyczny w implementacji i rozbudowie,
- w wielu wypadkach nie wiadomo precyzyjnie, co należy uwzględnić w modelu, nawet jeśli wszystkie mechanizmy zostaną prawidłowo zaimplementowane,
- model nie daje odpowiedzi na wszystkie pytania, a przeważnie tylko na postawione przez autora.

Często na obecnym etapie rozwoju, w takich obszarach, jak symulacja działania układu nerwowego człowieka, liczba badań jest niewystarczająca, a brak standaryzacji utrudnia porównanie kilku różnych modeli.



**Ryc. 3.** Klasyfikacja modeli funkcji neurofizjologicznych w zależności od skali (wariant).  
**Fig. 3.** Classification of the neurophysiological functions' models depends on the scale (version).

Najczęściej tworzenie modelu obejmuje trzy zasadnicze etapy:

- 1) stworzenie modelu dla określonej sytuacji klinicznej,
- 2) analizę modelu z użyciem różnych narzędzi w zależności od celu,
- 3) analizę wyników, przekształcenie ich w dane/wielkości istotne dla danej sytuacji klinicznej oraz ich interpretację.

Z technicznego punktu widzenia zasadnicze etapy procesu tworzenia modelu informatycznego obejmują:

- 1) zdefiniowanie celu,
- 2) identyfikację modelowanego obiektu/zjawiska oraz sformułowanie założeń modelu,
- 3) zdefiniowanie ograniczeń modelu, jego istotnych cech oraz istotnych relacji między nimi,

- 4) opracowanie modelu koncepcyjnego,
- 5) budowę modelu,
- 6) weryfikację poprawności modelu,
- 7) testowanie modelu,
- 8) strojenie i adaptację modelu.

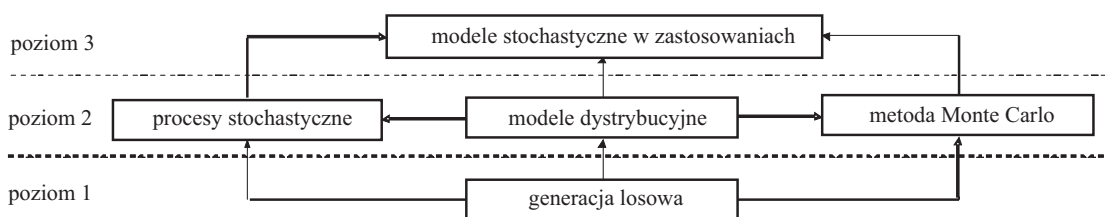
**METODY STATYSTYCZNE, STOCHASTYCZNE I FARMAKOEKONOMICZNE**

Informatyzacja tradycyjnych obliczeń statystycznych pozwala na przyspieszenie i zwiększenie dokładności statystycznej analizy danych oraz ich czytelne i wszechstronne zobrazowanie. Pozwala też na tworzenie banków tego typu danych, umożliwiając złożone badania porównawcze tak między różnymi badaniami, jak i w obrębie jednego czy kilku badań rozłożonych w czasie. Obecnie analityka tego typu jest znacznie rozbudowana, jednak wszystkie metody mają swoje obszary zastosowań oraz ograniczenia [5]. Do najczęściej stosowanych metod należą tu regresja liniowa i nieliniowa, a często spotykanymi narzędziami są pakiety oprogramowania typu STATISTICA.

Modele stochastyczne (ryc. 4) są przydatne jako narzędzia opisu rzeczywistych czynności, zjawisk i procesów. Szybko tworzone, wiarygodne i tanie modele stochastyczne łatwo poddają się analizie [6]. W służbie zdrowia modele stochastyczne, w połączeniu z teorią kolejek, mogą być skutecznie wykorzystywane do opisu przepływu pacjentów w celu minimalizacji kosztów oraz optymalizacji wykorzystania łóżek szpitalnych. Medycyna może korzystać z narzędzi symulacyjnych zmniejszających liczbę niezbędnych eksperymentów na zwierzętach [6]

**MODELE PROGNOSTYCZNE**

Modele prognostyczne stanowią zaawansowane probabilistyczne modele przyczynowo-skutkowe wykorzystywane najczęściej do wsparcia podejmowania decyzji diagnostycznych<sup>1</sup>. Umożliwiają one obserwację prognozowanych stanów modelowanego zjawiska w kolejnych chwilach. Koncepcja *predictive medicine* zakłada planowanie, analizę oraz optymalizację na podstawie przewidywanych rezultatów kolejnych etapów terapii, dzięki realistycznym, trójwymiarowym, opartym na cechach indywidualnych pacjenta, modelom. Pozwalają one nie tylko prześledzić układ organów i tkanek przed zabiegiem, ale również układać oraz badać różnorodne scenariusze rozwoju wydarzeń po zabiegu, a nawet ich serii. Coraz popularniejsze w medycynie staje się użycie uczenia maszynowego (*machine learning*), m.in. sztucznych sieci neuronowych (*artificial neural networks – ANN*). Są one szczególnie użyteczne w sytuacji bardzo ograniczonej ilości danych z badań (np. przy małej zapadalności na bardzo poważne schorzenia). Klasyczne metody statystyczne tu zawodzą, gdyż dla otrzymania dokładnych wyników potrzebne są duże próby. Jednak również przy użyciu modeli prognostycznych na małych próbach należy zachować daleko idącą ostrożność, szczególnie przy interpretacji wyników gromadzonych przez lata przez różnych badaczy [8,9,10]. Próby modelowania podjęto w wielu obszarach, takich jak serce i choroby sercowo-naczyniowe czy układu ruchu [11].



**Ryc. 4.** Poziomy symulacji w modelu stochastycznym (wariant) [6].  
**Fig. 4.** Levels of the simulation in the stochastic model (version) [6].

W farmakoekonomicie w celu ułatwienia podejmowania decyzji na temat praktyki klinicznej i alokacji zasobów w opiece zdrowotnej wykorzystuje się w różnych odmianach (w tym mieszanych): drzewa decyzyjne, modele Markowa, symulacje zdarzeń dyskretnych/modelę indukcyjnej wstecznej i symulacje Monte Carlo [7].

**NEURONAUKA OBLICZENIOWA I MODELE NEUROCYBERNETYCZNE**

Założenie, że nawet bardzo szczegółowa znajomość anatomii i fizjologii nie daje pełnego zro-

<sup>1</sup> Por. modele HEPAR i HEPAR II do diagnozowania chorób wątroby.



zumienia funkcjonowania układu nerwowego, znalazło swoje odzwierciedlenie w tworzeniu realistycznych biologicznie modeli elementów układu nerwowego. Realizm biologiczny przejawia się zarówno:

- w konstrukcji modelu – wszystkie jego elementy, w tym wejście i wyjście, mają konkretną interpretację w anatomii i fizjologii,
- w parametrach neuronów (np. w modelu Hodgkina-Huxleya),
- w postaci przetwarzanych i otrzymywanych sygnałów.

W omawianym zakresie autor niniejszej pracy prowadzi badania w zakresie modelowania funkcjonowania mózgu, w tym m.in. funkcji pnia mózgu oraz mechanizmów mających udział w różnych schorzeniach z szerokiego spektrum autyzmu (*autism spectrum disorders* – ASD).

Termin „neurocybernetyka” został szerzej wprowadzony przez prof. Tadeusiewicza z AGHw Krakowie w celu wyróżnienia badań mających na celu wierne modelowanie rzeczywistych neuronów i ich grup oraz realizowanych przez nie procesów nerwowych. Podejście takie pozwala na odrzucenie niekiedy dotychczas stosowanych uproszczeń, dotyczących zarówno zróżnicowania budowy neuronów, jak i bogactwa ich połączeń. W rezultacie możliwe jest stosowanie modeli bardziej zbliżonych do rzeczywistych w świetle współczesnej wiedzy neurobiologicznej, umożliwiając badanie z użyciem modeli zarówno pojedynczych neuronów i ich grup, jak i – w ograniczonym na razie zakresie – bardziej złożonych procesów neurofizjologicznych i kognitywnych [12]. Podejście takie stawia coraz wyższe wymagania dotychczas wykorzystywanemu oprogramowaniu, m.in. GENESIS, NEURON, EMERGENT itp.

#### MODELE LUDZKICH TKANEK I ZACHODZĄCYCH W NICH PROCESÓW ORAZ KONCEPCJA WIRTUALNEGO PACJENTA

Numeryczne modele ludzkich tkanek kostnych i miękkich są wykorzystywane do prowadzenia badań symulacyjnych, wizualizacji budowy, analizy własności oraz prowadzenia analiz i obliczeń z wykorzystaniem grafiki komputerowej. Należą do nich: modele tkanki kostnej (opracowywane m.in. w Zakładzie Komputerowych Systemów Biomedycznych Uniwersytetu Śląskiego) oraz modele mięśni szkieletowych czy serca.

Modele procesów zachodzących w ludzkim organizmie mają na celu umożliwienie prowa-

dzenia badań i terapii w wielu zaburzeniach. W tym zakresie model ludzkiego metabolizmu opracowany na Uniwersytecie w San Diego służy m.in. do badania cukrzycy, a modele oddychania człowieka są obecnie obszarem wysiłku wielu grup badawczych.

Powstają również modele pacjenta o różnym przeznaczeniu i różnym stopniu zaawansowania:

- 1) projekt „Człowiek biotyczny” (*biotic man*) prowadzony przez GE Global Research w celu przyspieszenia badań nad lekami,
- 2) ośrodki symulacji medycznej na wzór Centrum Symulacji Medycznej w Poznaniu,
- 3) możliwość planowania i nauki prowadzenia operacji chirurgicznych na wirtualnym pacjencie, np. w ramach wirtualnej rzeczywistości w systemie PHANTOMDesktop,
- 4) oprogramowanie do edukacji kadr medycznych w ramach nauczania problemowego (*problem based learning* – PBL), w tym: europejski projekt eViP (*electronic virtual patients*) w Polsce, realizowany na CM UJ w Krakowie, oraz rozwiązania typu ClinSpace i DynaPatients.

Kwestię dyskusyjną stanowi zakres i sposób standaryzacji/indywidualizacji wirtualnego pacjenta czy też fantomu pacjenta (w zależności od rozwiązania) oraz tworzenie możliwie efektywnych scenariuszy tego typu zajęć. Podejście takie kształtuje miejsce, zakres i formę symulacji komputerowych w programach nauczania medycznych studiów przed- i podyplomowych oraz kształcenia kursowego<sup>2</sup>.

Odrębną kwestią są modele motoryki rzeczywistego człowieka (zarówno chorego, jak i zdrowego), pozyskiwane m.in. za pomocą urządzeń do analizy chodu typu Vicon. Gromadzone w ten sposób dane można wykorzystywać do tworzenia modeli populacyjnych dotyczących mieszkańców określonego obszaru, również w zależności od wieku i płci, a także do obserwacji ich zmian w czasie, tworzenia modeli odniesienia, wytycznych i prognoz w tym zakresie. Pozwoli to też na rozwój inżynierii rehabilitacyjnej w obszarze modelowania, np. wpływu na chód patologiczny, elementów zaopatrzenia ortopedycznego (rehabilitacyjnego).

<sup>2</sup> Por. Materiały Międzynarodowej Konferencji „Innowacyjność edukacji medycznej. Symulacja medyczna i e-learning”. Uniwersytet Medyczny im. K. Marcinkowskiego w Poznaniu, 28–29.10.2010 r.

**WSPARCIE PODEJMOWANIA DECYZJI  
W WARUNKACH PARADYGMATU EBM**

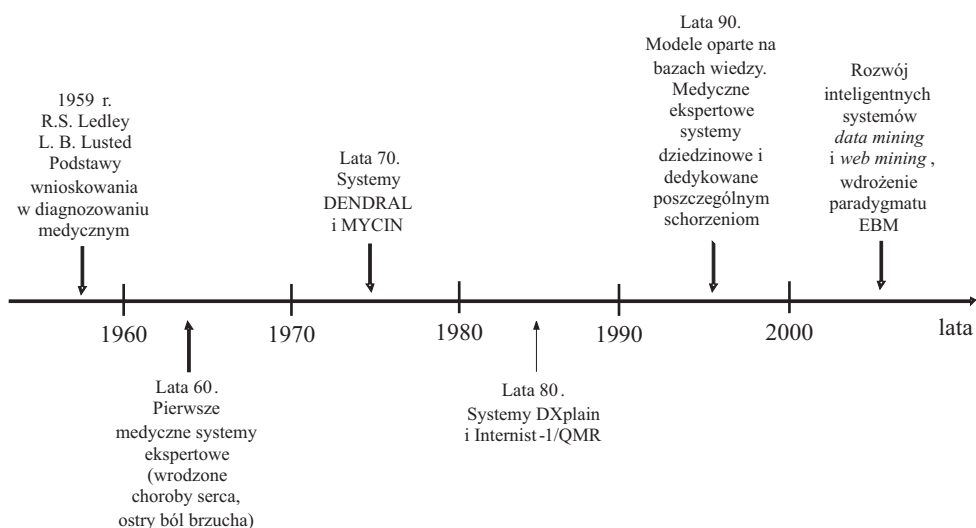
Integralną częścią opieki zdrowotnej jest diagnozowanie i stawianie prognoz dotyczących terapii i stanu zdrowia pacjenta. Do tego celu doskonale nadają się techniki informatyczne wykrywające odległe nawet powiązania między wynikami badań, stanem zdrowia pacjenta (również: klasyfikacją w ICD-10 i ICF) a rekomendowanym postępowaniem terapeutycznym (farmakoterapia, interwencja chirurgiczna, rehabilitacja i inne) i jego prognozowanymi rezultatami krótko- i długoterminowymi. Każdy analizowany przypadek jest automatycznie dopisywany do bazy wiedzy, prowadząc z czasem do powstania zbioru danych na temat stanu zdrowia populacji mieszkającej na danym terenie itp. Szersze rozpowszechnienie systemów informatycznych wspierających podejmowanie decyzji klinicznych ma na celu:

- zmniejszenie odchyleń od wzorców (reguł, wytycznych, wskazówek) postępowania klinicznego,
- zapewnienie tzw. drugiej opinii, również na potrzeby sytuacji spornych i procesów sądowych,
- nadzór „w tle” pracy personelu medycznego, intensywności i kompletności działań terapeutycznych.

nikających się pętli decyzyjnych, również przy niepełnej wiedzy lub w warunkach trudnych do obiektywnego ilościowego opisu na potrzeby modelu informatycznego (np. zaburzenia świadomości czy zmiany nastroju). Dodatkowy wymiar wprowadza paradygmat medycyny opartej na faktach (*evidence based medicine* – EBM) (ryc. 6) [13,14,15].

Ze względu na złożoność procesu decyzyjnego spotyka się m.in. rozbudowane modele trzy-pętlowe (ryc. 7).

Medyczne systemy ekspertowe nie mogą na chwilę obecną konkurować z zespołem doświadczonych specjalistów, przede wszystkim ze względu na duży stopień komplikacji działania. Nie wiadomo jednak, czy takie postawienie sprawy jest w ogóle potrzebne: systemy te nie mają konkurować z człowiekiem, lecz uzupełniać oraz porządkować jego wiedzę i doświadczenie, wspomagając podjęcie decyzji i nie zwalniając od odpowiedzialności. Proponowane rozwiązania mogą być wieloetapowe i obejmować m.in. diagnozowanie wstępne (najbardziej prawdopodobnych jednostek chorobowych na podstawie symptomów chorobowych i czynników ryzyka), połączone z kolejnym etapem: diagnozowania specjalistycznego typującego optymalny w danym przypadku zestaw dalszych badań [17,18,19]. Istnieje

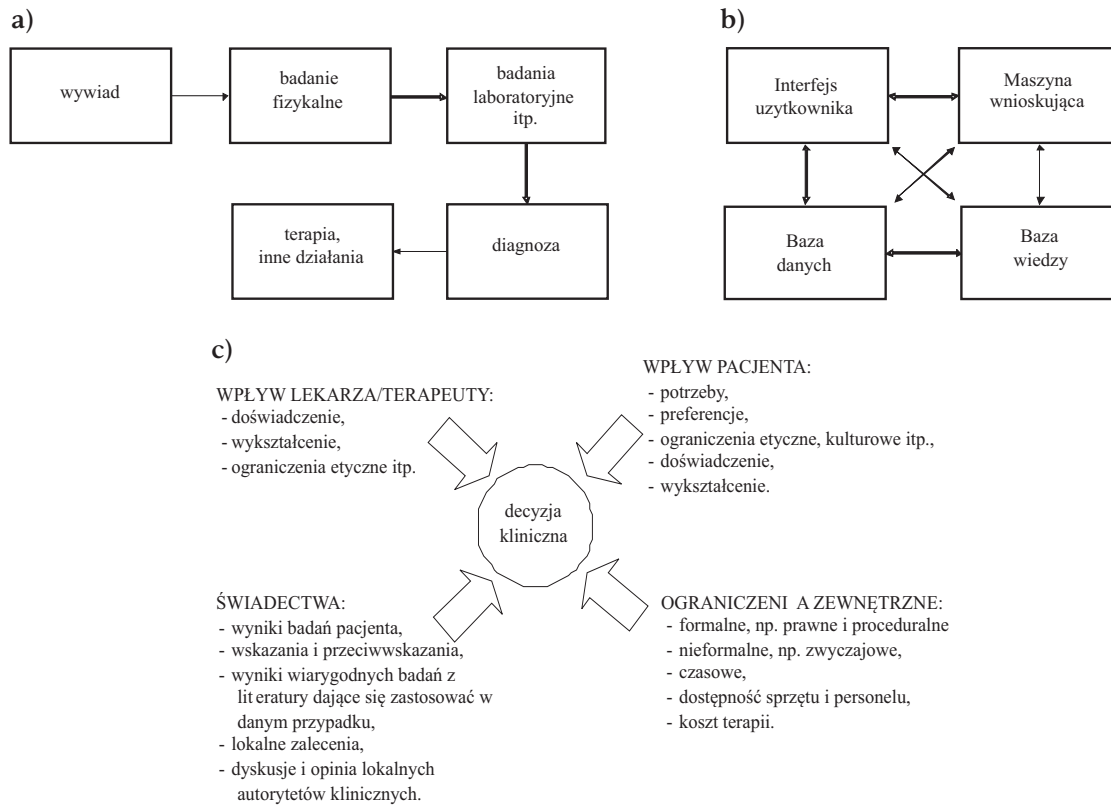


Ryc. 5. Kamienie milowe w historii medycznych systemów ekspertowych.

Fig. 5. Milestones in the history of medical expert systems.

Zasadniczy problem stanowi w tym przypadku wielowymiarowość opieki zdrowotnej, często sprawowanej przez zespół wielodyscyplinarny, wymagająca jednoczesnej realizacji wielu prze-

również grupa rozwiązań integrujących na potrzeby różnicowania decyzji terapeutycznych dane demograficzne, kliniczne i informacje o markerach genetycznych [20].

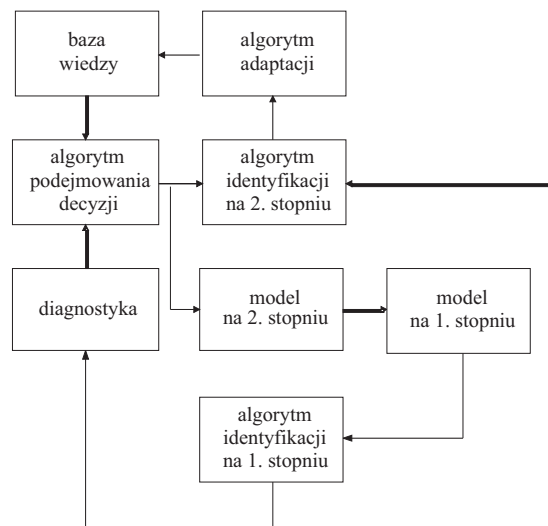


**Ryc. 6.** Informatyczne wsparcie podejmowania decyzji: a) model pętli decyzyjnej (wariant), b) idea systemu ekspertowego do wspomaganie diagnozy (wariant), c) czynniki wpływające na decyzję kliniczną zgodnie z paradygmatem EBM (wariant).

**Fig. 6.** IT support of the decision-making process: a) model of the decision loop (version), b) idea of expert system for supporting diagnosis purposes (version), c) factors influencing clinical decision according to the EBM paradigm (version).

**MODELE DOPASOWANE DO INDYWIDUALNEGO PACJENTA**

W nowoczesnej praktyce medycznej niewystarczające stają się nawet zaawansowane trójwymiarowe atlasy anatomiczne. Dzieje się tak dlatego, że odnoszą się one do pacjenta „znormalizowanego”, o typowej, uśrednionej budowie i cechach organizmu. Tymczasem skuteczna medycyna coraz częściej skupia się również na cechach indywidualnych pacjenta – terapia jest „szyta na miarę”. Powoduje to znaczny wzrost złożoności procesu diagnostycznego i decyzyjnego. Przy dużym natłoku danych (np. z wielu badań laboratoryjnych i diagnostyki obrazowej jednocześnie) niezbędne stają się wskazówki i wytyczne postępowania oraz systemy wsparcia podejmowania decyzji, stanowiące tzw. drugą opinię. Systemy informatyczne mogą zaoferować pełniejsze, zindywidualizowane zobrazowanie pacjenta (w postaci wirtualnej), zarówno do potrzeb precyzyjniejszej wizualizacji (np. dzięki opracowaniu dróg dostępu w chirurgii), jak i modelowania zmian dokonanych w wyniku zabiegu [11].



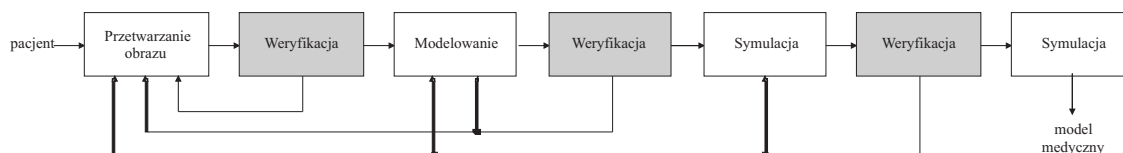
**Ryc. 7.** Idea podejmowania decyzji z wykorzystaniem identyfikacji dwustopniowej w przypadku wspomaganie procesu rehabilitacji osób cierpiących na spastyczność [16].

**Fig. 7.** Idea of decision-making process using two-stage identification proposed to support rehabilitation of patients with spasticity [16].

Rozwiązania takie są dostępne zarówno dzięki zaawansowaniu technik informatycznych (przetwarzanie obrazów biomedycznych, rozpoznawanie obiektów, rekonstrukcji, wizualizacja trójwymiarowa, wstawianie markerów), jak i opracowaniu odpowiednio wyposażonych urządzeń medycznych. Większość funkcjonujących dotychczas rozwiązań opracowano pod kątem konkretnego zastosowania (systemy chirurgiczne, edukacyjne, wirtualne atlasy), trwają jednak prace zarówno nad zwiększeniem ich uniwersalności, jak i nad obniżeniem kosztów, co dałoby wymierne rezultaty w postaci rozpowszechnienia się przedmiotowej metody [11].

dokonywana zwykle na podstawie jednej z czterech metod: pikseli (lub progowej), konturów, obszarów lub mieszanej – jej wybór zależy m.in. od typu rozpoznawanego obiektu i techniki obrazowania (USG, MRI, CT itp.),

- rekonstrukcja obrazu 3D, a przede wszystkim jej dokładność, wynika z rezultatów segmentacji (w postaci przekrojów) i jest zależna m.in. od gęstości przekrojów i ich wzajemnego położenia, a także parametrów obrazu – występują tu problemy związane np. z odwzorowaniem w 3D serii obrazów wykonanych w 2D;
- 3) modelowanie i symulacja za pomocą dedykowanych narzędzi (MSC Software Suite,



Procedura weryfikacji (ang. verification) doskonali poszczególne kroki konstrukcji modelu.

Przebieg weryfikacji jest inny po każdym z etapów.

Ryc. 8. Uproszczona zasada konstrukcji wirtualnego modelu medycznego [11].

Fig. 8. Simplified principle of virtual medical model construction [11].

Konstrukcja wirtualnych modeli odzwierciedlających cechy indywidualne pacjenta jest problemem złożonym i wieloetapowym (ryc. 8). Zwykle zasadnicze etapy obejmują:

- 1) pozyskanie materiału do obrazowania (*patient-specific data*):
  - metodami nieinwazyjnymi (np. MRI, CT, USG), o określonych parametrach zależnych od obrazowanych organów lub tkanek,
  - pozyskanie dodatkowych informacji, weryfikujących model i podwyższających jego wiarygodność, np. praca pod obciążeniem w przypadku układów kostno-stawowych i mięśni;
- 2) przetwarzanie obrazu i rekonstrukcja obrazu 3D:
  - przetwarzanie wstępne: usuwanie artefaktów oraz uwypuklanie pożądaných cech obrazu,
  - segmentacja, tj. grupowanie pikseli (wokseli) o zbliżonych cechach w określone elementy obrazu, dokonywana automatycznie (zwykle wymagana weryfikacja) lub półautomatycznie (z udziałem specjalisty klinicznego, brak konieczności weryfikacji),
  - klasyfikacja obiektów (2D lub 3D) na: organy i tkanki, tło, szумы i zakłócenia,

PAM Suite, ABAQUS i inne) – modelowanie jest najmniej zautomatyzowaną częścią całego procesu, wykonywaną z reguły przez przeszkolonego operatora i zależną przede wszystkim od jego wiedzy i doświadczenia, ma na celu imitację funkcjonalności, rzeczywistych własności (kolor, tekstura, gęstość, sztywność, współczynniki tarcia, punkty mocowania, kinematyka ruchu) oraz scenariuszy zachowania się organów/ tkanek w różnych sytuacjach:

- przyporządkowanie odpowiednich właściwości do każdej ze struktur modelowanego organu/tkanki,
- uwzględnienie zależności (w tym: w ruchu) między poszczególnymi elementami modelowanego organu/tkanki,
- uwzględnienie parametrów kinematycznych, w tym sztywności, zakresu ruchu, kątów i działających sił w odniesieniu do poszczególnych elementów modelu itp. [11].

Otrzymany w ten sposób model podlega „strojeniu” i porównaniu z wynikami rzeczywistymi. Kolejny etap stanowi symulacja dostarczająca danych (obrazy, parametry mierzalne, inne wg potrzeb), które można porównać z innymi modelami, obiektami rzeczywistymi,



normalizować w celach statystycznych lub, w bardziej skomplikowanych przypadkach, użyć do budowy modelu bardziej złożonego, np. modelu chodu na podstawie modeli poszczególnych stawów i mięśni kończyn dolnych.

Niezwykle istotne są kwestie:

- 1) automatyzacji procesu, a przez to podwyższenia jego szybkości i efektywności,
- 2) weryfikacji poprawności i dokładności odzwierciedlenia przez model cech rzeczywistych, a przez to zwiększenie jego wiarygodności,
- 3) minimalizacji błędów na każdym etapie, ze szczególnym uwzględnieniem etapu pozyskiwania danych, gdyż błędy popełnione np. w obrazowaniu MRI nie mogą być usunięte na dalszych etapach – rozwiązaniem w tym przypadku jest rejestracja tego etapu za pomocą kamery, co pozwala zarówno ocenić sam proces, jak i znaleźć źródła ewentualnych błędów w pozyskanym materiale,
- 4) minimalizacji wpływu uproszczeń i zaokrągleń,
- 5) zwiększenia wiarygodności obrazowania dzięki wiedzy o obrazowanych obiektach i cechach ich obrazów uzyskanych za pomocą określonych metod (np. nieostrość krawędzi w obrazie USG), umieszczeniu obiektów w określonym kontekście – może to być dokonywane na etapie segmentacji (jako segmentacja kontekstowa) lub klasyfikacji (klasyfikacja kontekstowa),
- 6) analizy i porównania obrazów uzyskanych z medycznych urządzeń obrazujących różnych producentów, w tym składanie obrazów z różnych źródeł o różnych charakterystykach (np. MRI i CT),
- 7) uwzględnienia potrzeb sprzętowych narzędzi symulacyjnych, gdyż często parametrem krytycznym jest czas trwania symulacji, a nie czynności wymagane od operatora (głównie: modelowanie) [11].

Istotna jest również kwestia czysto użytkowa, tj. oszczędność czasu i prostota wykorzystania systemów. Prawidłowe opracowanie materiałów nie może być zbyt czasochłonne, a jego analiza nie może wymagać bardzo dużego doświadczenia, długiego szkolenia czy szczególnych predyspozycji, gdyż prezentowane rozwiązanie straciłoby swoją funkcjonalność.

#### ZASTOSOWANIA W PRAKTYCE KLINICZNEJ

Obecnie najczęstszym zastosowaniem modeli informatycznych w medycynie jest predykcja.

Już w najbliższej przyszłości modele komputerowe mogą odegrać główną rolę w obszarach związanych z diagnozowaniem, prognozowaniem wyników terapii oraz rekomendowaniem (diagnostyki, terapii, doboru zaopatrzenia ortopedycznego itp.). Mimo szerokiego wykorzystania technik informatycznych do gromadzenia, przetwarzania, przechowywania, przeszukiwania, analizowania i udostępniania (również: w określonej formie obrazowania czy wnioskowania), ich możliwości ciągle nie są w pełni wykorzystane, również z powodu braku wiarygodnych danych w zakresie całych populacji, umożliwiających ich ekstrapolację do konkretnego pacjenta.

#### KIERUNKI ROZWOJU

Zastosowania opisywanych technik już obecnie są szerokie. Kierunki rozwoju, wymuszone częściowo przez paradygmat EBM, są następujące:

- zwiększenie precyzji i pewności decyzji w praktyce klinicznej personelu medycznego,
- rozwój systemów ekspertowych opartych na eksploracji ogromnych klinicznych baz danych (*data mining*, zastępujące np. część badań przesiewowych), wyposażonych w elastyczne i efektywne mechanizmy wnioskowania oraz odpowiednik „zdrowego rozsądku”,
- analiza danych niekompletnych i/lub częściowo zniekształconych (z błędami), zarówno u osób zdrowych, jak i ze zmianami chorobowymi,
- rozwój interakcji człowiek – komputer (*human-computer interaction* – HCI), w tym wielomodalnej, opartej na komunikacji w języku naturalnym z odczytem intonacji, mimiki i gestykulacji mówiącego człowieka,
- zaawansowane środowiska symulacyjne, zarówno wirtualne, jak i oparte na istniejących zasobach (salach operacyjnych, aparaturze medycznej) oraz akcesoriach dodatkowych (fantomy pacjentów, oprogramowanie symulujące ich stan zdrowia) i różnych relacjach personel medyczny – pacjent,
- tworzenie i testowanie nowych usług medycznych, w tym w ramach telemedycyny,
- systemy modelowania organizmu człowieka (od poziomu pojedynczych neuronów aż po całe organy) oraz jego poszczególnych funkcji [21,22], w tym stanów chorobowych i uszkodzeń traumatycznych – doty-

- czy to szczególnie procesów zachodzących w układzie nerwowym, w tym zjawisk neuroplastyczności kompensacyjnej,
- wykrywanie i analiza indywidualnych różnic (także patologicznych) między pacjentami, bez względu na formę danych, tj. w wynikach laboratoryjnych, badaniach obrazowych, przebiegach analogowych itp.,
  - lepsze systemy analizy i obrazowanie danych (również w 3D i ich zmienności w czasie), w tym w diagnostyce obrazowej i analizie ruchu (w tym chodu), również wykrywające i wskazujące potencjalne nieprawidłowości, skracające niezbędny czas na postawienie wiarygodnej diagnozy i zmniejszające ryzyko popełnienia błędu,
  - zaawansowane systemy bezpieczeństwa wymienionych danych (autoryzacja, poufność itd.),
  - rozwój predykcji i wykorzystania biochemii, biofizyki, biomechaniki, automatyki i robotyki systemów medycynie,
  - rozwój modeli edukacyjnych (w tym *e-learningu*),
  - modelowanie systemów biomedycznych w celu poszukiwania parametrów wpływających na poprawę jakości życia.

Należy pamiętać, że wiedza zgromadzona w systemie informatycznym nie zawsze przekłada się na diagnozę: niezbędnym łącznikiem jest tu sztuczna inteligencja systemu, efektywna eksploracja i analiza danych oraz poprawne metodologicznie reguły wnioskowania. Ważne jest również uwzględnienie kolejności preferencji oraz możliwej niedokładności i niekompletności danych.

Każda nowa technologia niesie ze sobą korzyści i ryzyko. W przypadku omawianych rozwiązań korzyści są oczywiste: poprawa efektywności terapii i kontroli stanu pacjentów oraz ich jakości życia (również poprzez brak bólu czy depresji), jednak ryzyko stanowią przede wszystkim:

- niemożliwa do przewidzenia konieczność ponownego zdefiniowania poprzednio

używanych pojęć, procedur i wskazówek klinicznych, również w sposób trudny do przyjęcia zgodnie z dotychczasową wiedzą kliniczną,

- problem z opisem niektórych danych i pojęć,
- możliwość relatywizacji zasad moralnych i etycznych (w tym np. wartości ludzkiego życia i zdrowia), gdyż maszyny ich nie znają.

#### PODSUMOWANIE

Prezentowane metody są metodami perspektywicznymi i mogą stanowić rozwinięcie obecnie stosowanych metod diagnostyki obrazowej, a docelowo systemów wsparcia podejmowania decyzji klinicznych, szczególnie w dynamicznie rozwijających się systemach telemedycznych.

Należy również zauważyć, że wciąż niedostateczna jest informatyzacja klinicznych (szpitalnych itp.) baz danych mających zapewnić informacje „wsadowe” dla wielu omawianych rozwiązań, brak również specjalizowanych systemów dedykowanych specyficie środowiska medycznego, zarówno klinicznego, jak i naukowego. W praktyce klinicznej, ze względu na często absorbującą personel medyczny interakcję z pacjentem, informatyczne systemy medyczne powinny pracować niejako „w tle”, wyprzedzając wskazówkami i komentarzami działania, również w przypadku członków zespołów wielospecjalistycznych.

Trzeba też podkreślić, że pewne elementy tych procesów, oczywiste dla człowieka, mogą nie być tak oczywiste dla systemu informatycznego (np. sprawdzenie aktualności badań, przeciwwskazań wynikających pośrednio z zapisów w karcie pacjenta, szkodliwych interakcji leków, wybór z dostępnych schematów działania lub spoza nich itp.). Niemniej jednak zrozumienie złożoności ludzkiego organizmu warte jest każdego wysiłku w tym zakresie. Być może znaczny udział w ich koordynacji będzie miało nowo utworzone Polskie Towarzystwo Symulacji Medycznej.

#### PIŚMIENICTWO

1. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Informatyka w służbie zdrowia. *Mag. Pielęg. Położ.* 2008; 12: 32.

2. Filipowicz E., Kwiecień J., Kłys. M., Filipowicz B. Analiza możliwości zastosow-

ania metod sztucznej inteligencji w medycynie sądowej. *Bio-Algorithms and Med-Systems* 2005; 1-2: 3-8.

3. Artificial life models in software. Red. M. Komosiński, A. Adamatzky Wyd. 2. Springer, New York 2009.

4. Trąbka J. J. Neuroscience of my own subjective perspective. *Materiały Konferencji „Modelowanie Cybernetyczne Systemów Biologicznych MCSB 2010”*. *Bio-Algorithms and Med-Systems* 2010; 6(12) Supl. 1: 11-12.

5. Oniško A., Druzdel M. J. Effect of imprecision in probabilities on Bayesian network models: an empirical study. Working Notes of the European Conference on Artificial Intelligence in Medicine (AIME-03) Workshop on Qualitative and Model-based Reasoning in Biomedicine 2003: 45–49.
6. Prodan A., Rusu M., Prodan R., Campean R. Stochastic models applied in health care and medical education. Proceedings of the XI-th International Symposium Applied Stochastic Models and Data Analysis ASMDA 2005: 987–996.
7. Szafraniec S. Modele matematyczne w farmakoekonomice. *Farmakoekonomika* 2004; 4: 13–16.
8. Steyerberg E. W. *Clinical prediction models*. Springer-Verlag, New York 2008.
9. Abu-Hanna A., Lucas P. J. F. Prognostic models in medicine. *Methods of Information in Medicine* 2001; 40: 1–5.
10. Taktak A. F., Fisher A. C., Jones A. S., Damato B. E. The role and efficacy of non-linear models in decision making and prognostication. *Conf Proc IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2004; 1: 411–414.
11. Potocnik B., Heric D., Zazula D. i wsp. Construction of patient specific virtual models of medical phenomena. *Informatika* 2005; 29: 209–218.
12. Tadeusiewicz R. Modelowanie cybernetyczne systemu nerwowego od struktur neuropodobnych, przez sieci neuronowe aż do neurocybernetyki. Materiały Konferencji „Modelowanie Cybernetyczne Systemów Biologicznych MCSB 2010”. *Bio-Algorithms and Med-Systems* 2010; 6(12) Supl. 1: 15–17.
13. Mikołajewska E. Dominujące trendy we współczesnej rehabilitacji. *Niepełnosprawność i Rehabilitacja* 2010; 1: 87–102.
14. Mikołajewska E., Mikołajewski D. EBM w fizjoterapii – wykorzystanie zasobów internetowych. *Rehabilitacja w Praktyce* 2008; 4: 50–52.
15. Mikołajewska E. Medycyna oparta na faktach w fizjoterapii. *Valetudinaria* 2007; 2: 88–91.
16. Brzostowski K. Algorytm podejmowania decyzji z wykorzystaniem identyfikacji dwustopniowej. Rozprawa doktorska. Politechnika Wroclawska 2009.
17. Ameljańczyk A. Matematyczny model wspomaganie diagnozowania medycznego na podstawie symptomów chorobowych i czynników ryzyka. Materiały Konferencji „Modelowanie Cybernetyczne Systemów Biologicznych MCSB 2010”. *Bio-Algorithms and Med-Systems* 2010; 6(12) Supl. 1: 33–34.
18. Ameljańczyk A. Modelowanie wzorców medycznych w przestrzeni pajęczynowej. Materiały Konferencji „Modelowanie Cybernetyczne Systemów Biologicznych MCSB 2010”. *Bio-Algorithms and Med-Systems* 2010; 6(12) Supl. 1: 35–36.
19. Ameljańczyk A., Długosz P., Strawa M. Komputerowa implementacja algorytmu wyznaczania wstępnej diagnozy medycznej. Materiały Konferencji „Modelowanie Cybernetyczne Systemów Biologicznych MCSB 2010”. *Bio-Algorithms and Med-Systems* 2010, 6(12), Supl. 1: 37–38.
20. Duplaga M., Matysiak K., Stalmach L. Ewaluacja systemu wspomaganie decyzji terapeutycznych u chorych na raka jelita grubego z wykorzystaniem profili informacyjnych integrujących dane kliniczne i genetyczne. Materiały Konferencji „Modelowanie Cybernetyczne Systemów Biologicznych MCSB 2010”. *Bio-Algorithms and Med-Systems* 2010; 6(12) Supl. 1: 35–36.
21. Beck R., Deuflhard P., Hege H.-C. i wsp. *Mathematical algorithms and visualization in medical treatment*. W: *Visualization and Mathematics*. Red. H.C. Hege, K. Polthier, Springer, New York 1997.
22. Foryś U. *Matematyka w biologii*. WNT, Warszawa 2005.