WIADOMOŚCI PARAZYTOLOGICZNE
T. 49 (3) 2003: 239–244

ARTYKUŁY PRZEGLĄDOWE

TEORIA CHAOSU W PARAZYTOLOGII

ROŚCISŁAW KADŁUBOWSKI

Zakład Biologii i Parazytologii Lekarskiej, Uniwersytet Medyczny, Plac Gen. J. Hallera 1, 90-647 Łódź

ABSTRACT. The chaos theory in parasitology. Fundamental ideas of the chaotic non-linear dynamical systems and their application in parasitology (e.g. *Cephalomyia populations*, *Trichomonas vaginalis* invasions, *Homo-Plasmodium* systems) are discussed.

Key words: chaotic systems, parasitology.

Poznając świat zewnętrzny, czyli świat rzeczy, tworzymy ich abstrakcyjne modele: geometryczne (np. linia, koło, sześcian, kula) lub algebraiczne (liczba, logarytm, równanie, różniczka itp.). Dodam tu, że geometria i algebra to gałęzie matematyki o różnych pewnikach podstawowych. Szczęśliwie udało się je połączyć w geometrii analitycznej, a głównym narzędziem modelowania matematycznego świata stały się równania różniczkowe.

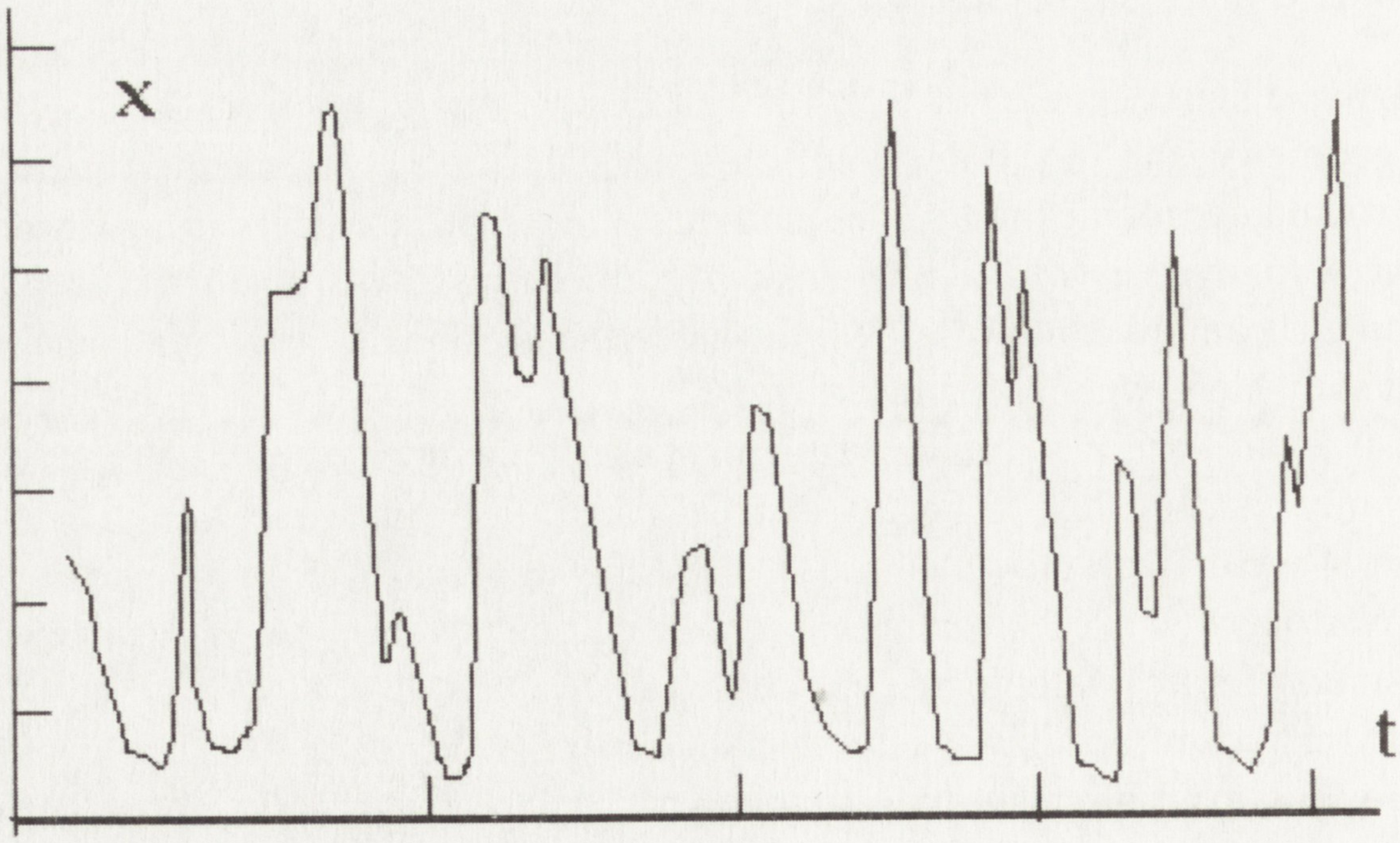
Postrzegane przez nas rzeczy zmieniają się w pozornie ciągłej kolejności, którą nazywamy czasem. Jest to istotny wymiar świata rozpatrywanego jako czasoprzestrzeń o 4 wymiarach głównych i 6 (a może nawet przeszło 20) wymiarach zwiniętych. Warto zaznaczyć, iż według najnowszych danych w opisie Wszechświata mają wystarczyć pojęcia geometrii euklidesowej.

Optymistyczne oczekiwanie determinizmu przyrodniczego, zapowiadające, że znając w jakimś momencie wszystkie siły działające i wzajemne położenie rzeczy można w jednym równaniu różniczkowym streścić stan Wszechświata, nie spełniło się. Działanie na siebie 2 kul możemy jeszcze dobrze opisać posługując się prawami Newtona. Natomiast oddziaływanie na siebie 3 kul, na przykład 2 planet i znacznie mniejszej sondy kosmicznej, jest bardzo trudne do obliczenia – jest to kłębowisko różnych torów i wielu ich kombinacji – a udało się ostatnio tylko w przybliżeniu przy użyciu złożonych komputerów. To jest właśnie przykład chaosu, czyli stanu rzeczy o najwyższym stopniu nieuporządkowania. Nic więc dziwnego, że dotychczas nie udało się rozwiązać równań ruchu dla około 50 dużych ciał Układu

Słonecznego, nie mówiąc już o układach wielu drobnych cząstek.

Niedawno (2002) wykryto, że do naszego Układu przedostała się planetoida, która może się zderzyć z Ziemią. Tor planetoidy jest starannie badany – według początkowych obliczeń dobrze wyposażonych pracowni NASA – mogłaby się ona spotkać z Ziemią w styczniu 2019 r. z prawdopodobieństwem 1/250 tys. Nowsze dane wskazują jednak, że może to nastąpić dopiero w roku 2060. Świadczy to o ograniczeniach oceny procesów chaotycznych.

Zależnie od skali rozpatrywanych zdarzeń, świat zewnętrzny wydaje się nam pełen chaosu. Poznaniem jego zajmuje się żywo rozwijająca się nowa dziedzina matematyki – teoria dynamiki nieliniowej układów chaotycznych. Objaśnię ją najlepiej na przykładzie. Jeśli do kieszonkowego kalkulatora elektronicznego wprowadzimy funkcję, na przykład $(x^2 - 1)$ i będziemy dla wartości $0 > x > 1$ powtarzać (iterować) tę informację, to otrzymamy krzywą składającą się z regularnych oscylacji. Jeżeli natomiast wprowadzimy do komputera funkcję niewiele różniącą się od poprzedniej $(2x^2 - 1)$, to początkowa krzywa jest regularna, lecz po kilkudziesięciu iteracjach otrzymujemy nieliniową krzywą dynamiki chaotycznej, składającą się z nieregularnych fluktuacji, zbliżoną do krzywej na rysunku 1 (wartość x na osi pionowej, czas t – na osi poziomej).



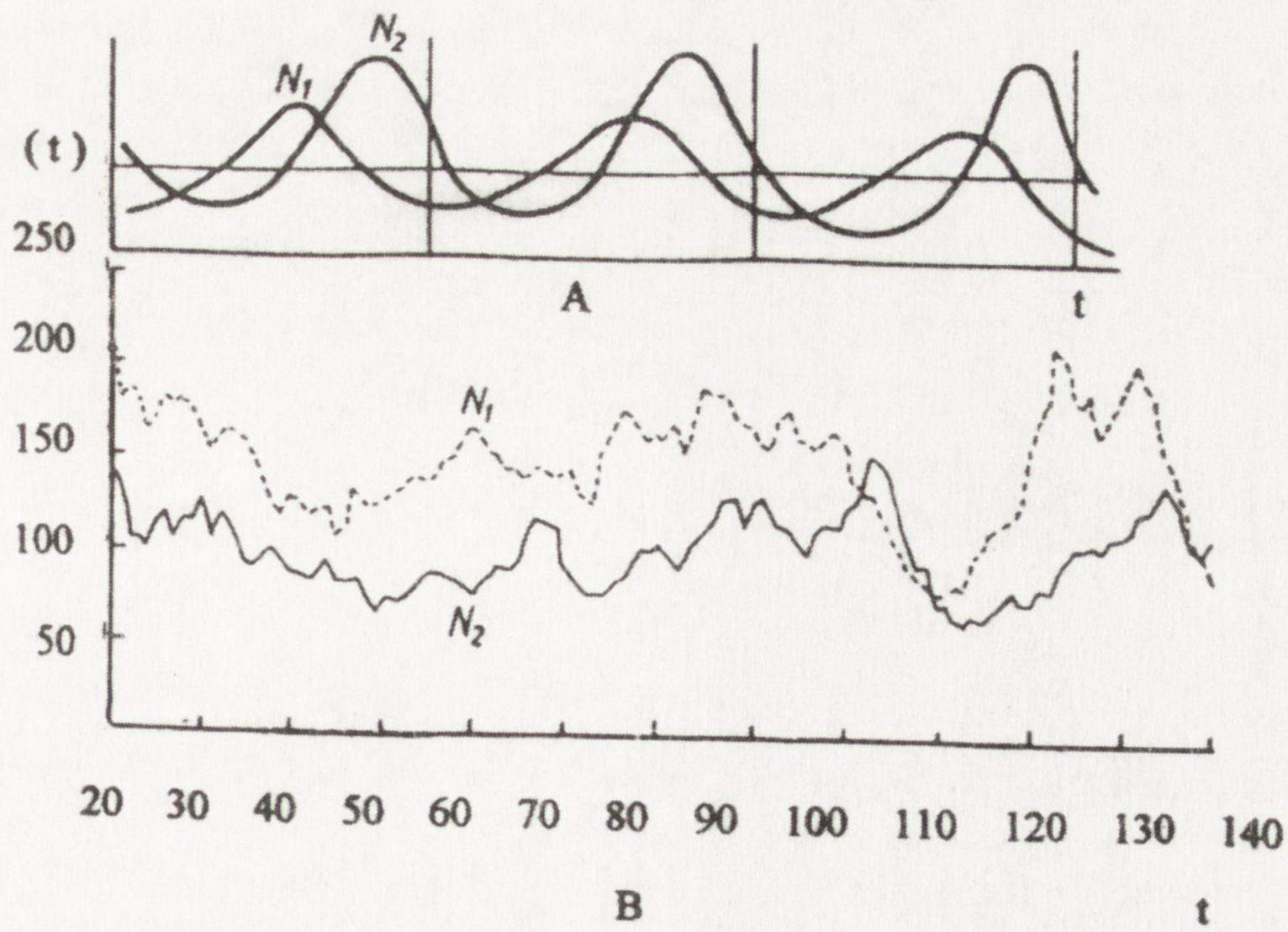
Rys.1. Przykład krzywej chaotycznej dynamiki nieliniowej. Różnokształtne fluktuacje o zmiennej wysokości (x), w czasie (t)

Nieliniowość oznacza, że równanie różniczkowe opisujące działanie takiego układu zawiera wyższe potęgi lub (i) iloczyny zmiennych, ewentualnie ich pochodne. Układ nieliniowej dynamiki chaotycznej jest w istocie deterministyczny, bo jego nieregularności wynikają z właściwości dynamiki samego układu. Dla takich układów można skonstruować modele matematyczne użyteczne w praktyce, a tak-

że nieraz udaje się poddać je analizie skutkowo-przyczynowej. W przytoczonym przykładzie przyczyną nieliniowej dynamiki komputera okazała się jego ograniczona zdolność zaokrąglania liczb po przecinku. A więc podłożem złożonego działania chaotycznego może być dość prosta właściwość fizyczna układu.

Poznana została już znaczna liczba układów dynamiki nieliniowej (tylko takie układy przyjęto w matematyce określać jako chaos!). Dotyczy to przede wszystkim układów fizycznych – od niepewności mechaniki kwantowej, zderzeń cząstek gazu, oscylacji obwodów elektronicznych, laserów, hydrodynamiki, konwekcji cieplnej, modeli termodynamicznych, mieszania się płynów, aż do zmian pogody, trzęsień ziemi, ruchu planet. Pomijam tu ciekawe zagadnienie fraktalnych konstrukcji geometrycznych natury (patrz Tempczyk 2002).

Prawidłowości chaotycznej dynamiki nieliniowej wykryto również w układach biologicznych, na przykład w działaniu sieci neuronowych, w niemiarowości pracy serca (również w badanych jego fragmentach *in vitro*), a także w interakcjach ekologicznych. Już dawniej w znanym modelu deterministycznym Volterry interakcja drapiestwa została przedstawiona jako układ 2 równań różniczkowych (Rys. 2A) na przykładzie populacji ryb w Adriatyku. Szczegółowe dane liczbowe (Rys. 2B) wskazują jednak wyraźnie w modelu takiej interakcji ekologicznej na jej dynamikę chaotyczną. Dokładna analiza wzrostu populacji pasożyta – gza owczego (*Cephalomyia ovis*), którego larwy rozwijają się w jamach czaszki żywiciela, wykazała dynamikę nieliniową populacji (wg Stewarta 1997). Przyczyną okresowych fluktuacji, podobnych jak na Rys. 1 maksimów i zmian ich wysokości, okazały się opóźnienia rozwoju zależne od dostępności pokarmu. Po ich uwzględnieniu otrzymano regularne krzywe okresowe rozwoju populacji pasożyta.

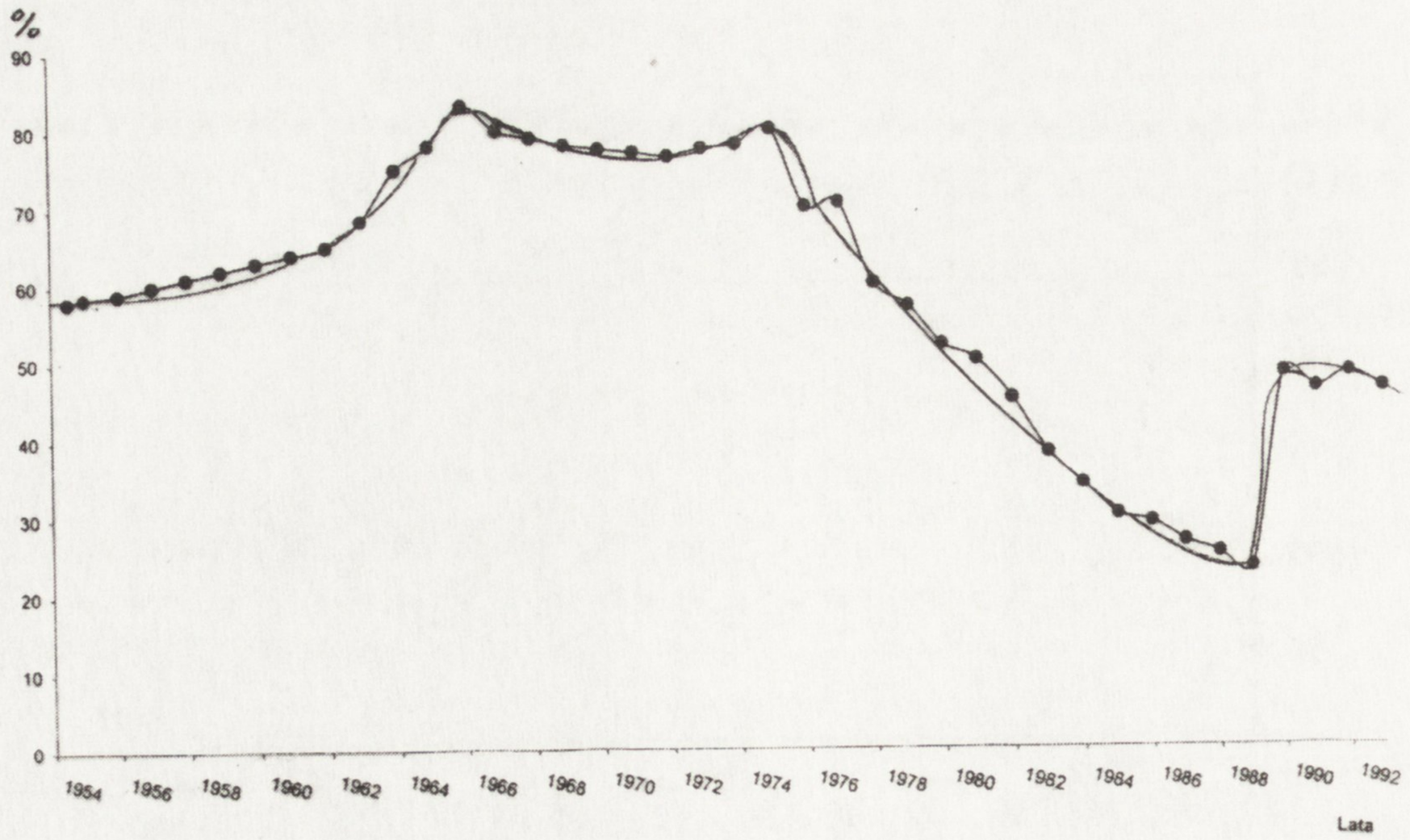


Rys.2. Krzywe liczebności populacji w interakcji drapiestwa. *A* – model Volterry, *B* – krzywe empiryczne, N_1 – populacja ofiary, N_2 – populacja drapieżcy (wg. Kadłubowskiego, w druku).

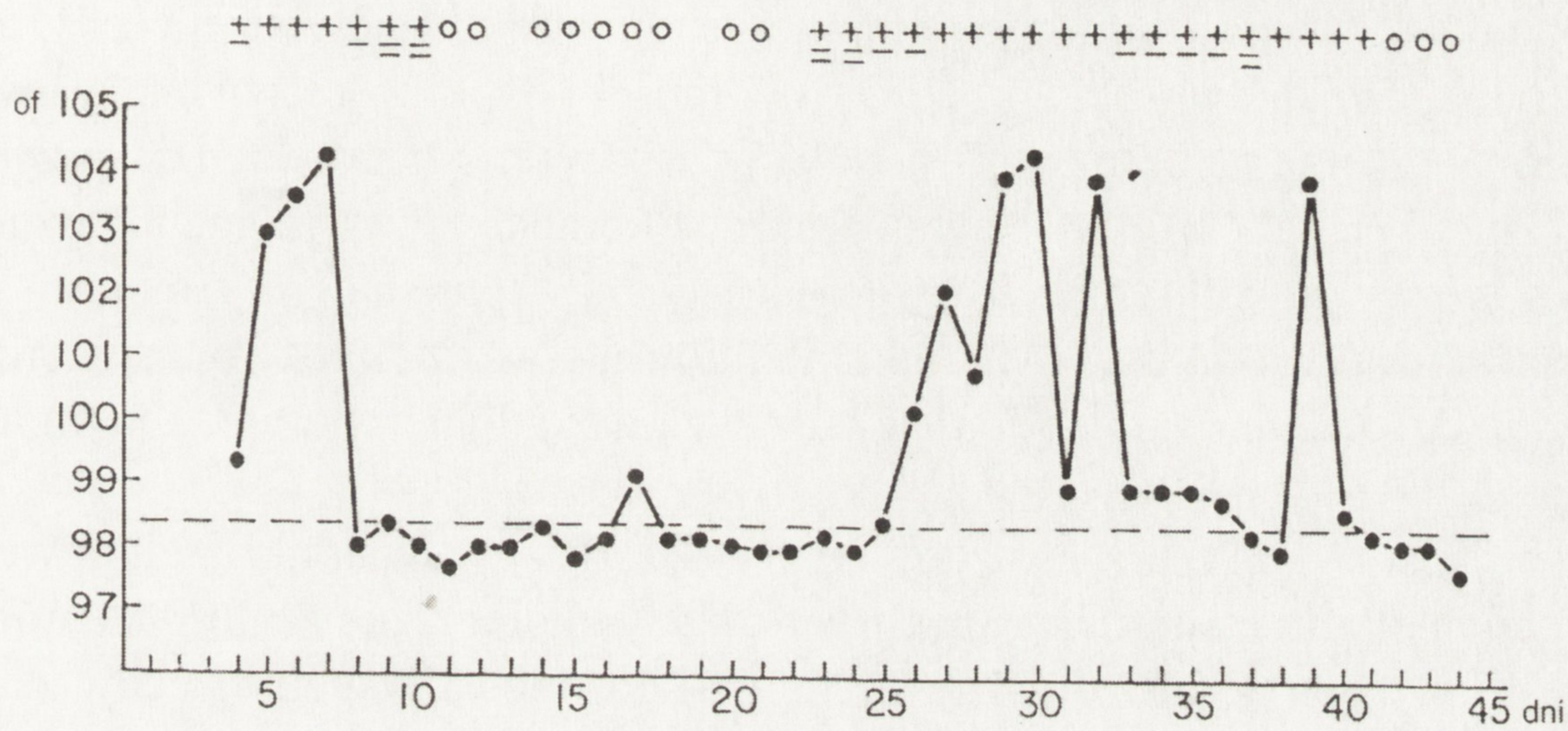
Teoria dynamiki nieliniowej może być również wykorzystana w epidemiologii. Na przykład szczegółowe opracowanie częstości zachorowań na odrę w Nowym Jorku i Baltimore sugerowało ich dynamikę chaotyczną. Jednakże nie udało się rozstrzygnąć czy nie są to zjawiska losowe. Dalsze badania uniemożliwiło wprowadzenie szczepień ochronnych przeciw odrze.

Warto dodać, że losowość jest w zasadzie przeciwieństwem dynamiki chaotycznej. Nie wnikając tu w wątpliwości teoriopoznawcze leżące u podstaw matematycznych teorii prawdopodobieństwa trzeba jednak zaznaczyć, że z praktycznego punktu widzenia główną trudnością w analizie probabilistycznej jest niejednorodność jednostek składających się na ocenianą populację – nie tylko osobników, lecz nawet cząstek – jak również założenie, że wszystkie badane zdarzenia są jednakowo prawdopodobne.

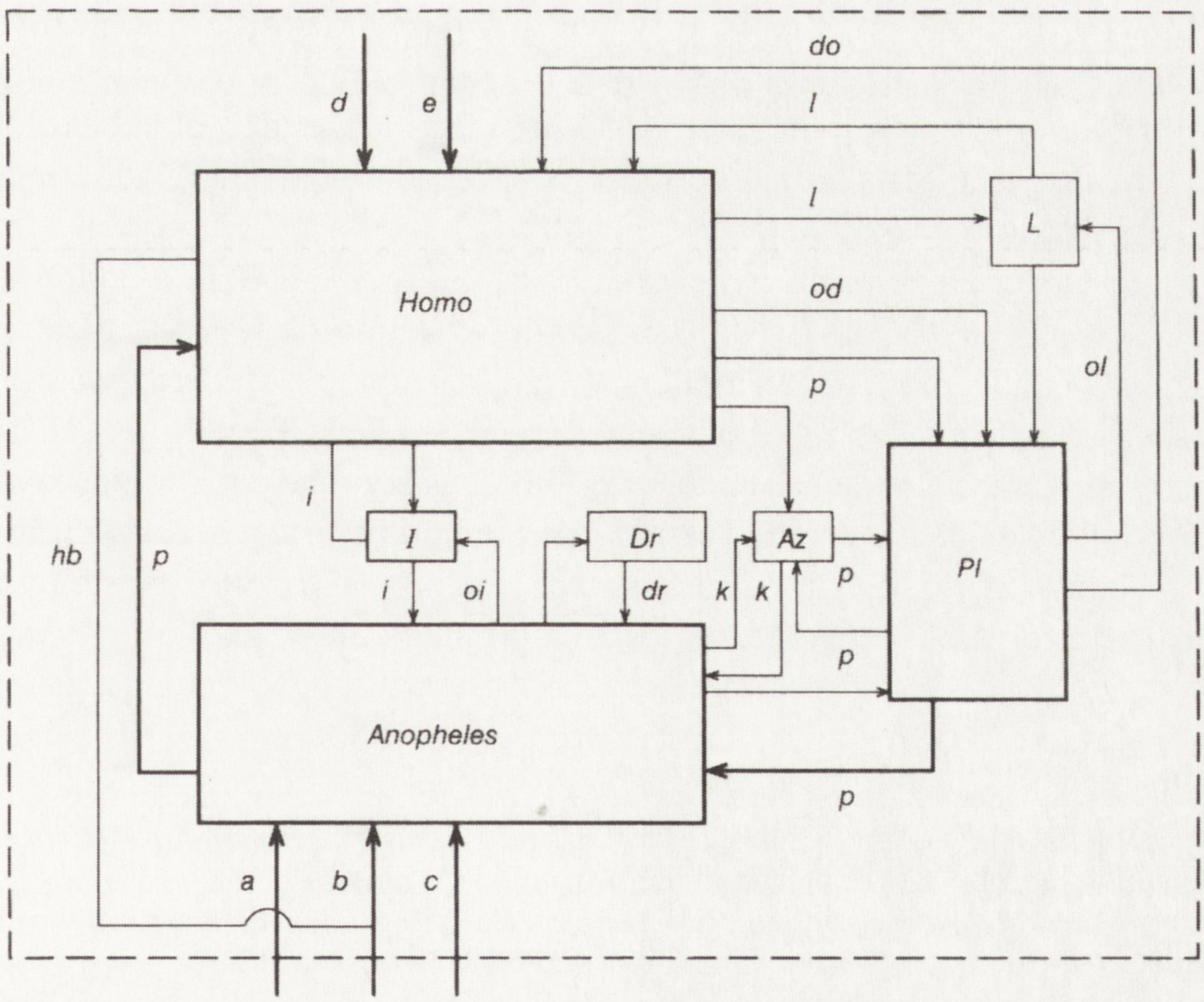
W interesującej krzywej częstości zarażeń rzęsistkiem pochwowym kobiet zgłaszających się ze stanami zapalnymi układu moczowo-płciowego do Ośrodka Leczenia Chorób Pasożytniczych i Grzybic Katedry Biologii i Parazytologii Lekarskiej AM w Łodzi w latach 1955-1992 przedstawionej na rysunku 3, (wg danych Kurnatowskiej 1999, uzupełnione) kilka fluktuacji świadczy o okresowości tego zjawiska, a gwałtowne załamanie krzywej w latach 1975-1988 wskazuje na możliwość sterowania tym układem (skutek leczenia nowymi lekami, poprawa warunków społeczno-higienicznych, stosowanie środków antykoncepcyjnych?). Jak widać z przebiegu krzywej ten układ patologiczny ma ograniczoną zdolność samoregulacji – fluktuacja w latach 1988-1992 (wzrost oporności populacji rzęsistka na leki, zmiany odporności populacji żywiciela?). Niestety brak dalszych danych.



Rys.3. Krzywe (empiryczna i uśredniona) częstości zarażeń rzęsistkiem pochwowym w Łodzi w latach 1955-1992 (wg Kadłubowskiego, w druku).



Rys.4. Krzywa temperatury ciała (^0F) u chorego na zimnicę leczoną proguanilem oraz chininą; (+) oznacza obecność pasożyta w preparacie krwi (-) – brak pasożyta, (o) – niewykonanie preparatu (wg. Kadłubowskiego, w druku).



Rys.5. Struktura układu ekologicznego zimnicy człowieka. *Anopheles* – populacje widliszków, *Az* – populacja widliszka zoofilnego, *Dr* – populacje drapieżców, *Homo* – populacja człowieka, *I* – insektycydy, *L* – leki przeciwzimnicze, *Pl* – populacje zarodźców. Działanie: *a* – temperatury, *b* – wody, *c* – związków chemicznych, *d*, *e* – różnych czynników środowiska, *do* – na odporność człowieka, *dr* – drapieżców, *hb* – osuszania środowiska, *i* – insektycydów, *k* – konkurencji, *l* – leków przeciwzimniczych, *od* – odporności człowieka; *oi* – odporność na insektycyd, *ol* – oporność na lek, *p* – krążenie zarodźca (wg Kadłubowskiego 2001).

Wszyscy znamy charakterystyczne krzywe temperatury u chorych na zimnicę – mają one potwierdzone dla układu nieliniowej dynamiki chaotycznej cechy, a zależą od gry między sprawnością procesów oporności i odporności żywiciela a właściwościami i przebiegiem rozwoju populacji pasożyta. Na przykładzie przypadku trzeciaczki (Rys. 4) z próbą sterowania nim za pomocą leku (proguanil) widoczny jest początkowy powrót temperatury do normy, a następnie nawrót zimnicy – odbudowa patologicznego układu dynamiki nieliniowej – wskutek rozwoju stwierdzonej oporności zarodźca na ten lek. Skuteczna okazała się dopiero terapia innym lekiem (chinina).

Jak wynika z naszych rozważań, układy chaotyczne dynamiki nieliniowej występują od poziomu kwantowego, poprzez układy ekologiczne aż do systemów planetarnych, wykazując mimo różnego stopnia złożoności wspólne cechy. Zajmuje się tym rozbudowana i opracowana matematycznie teoria złożoności (emergencji) M.Gell-Manna (wyróżnionego nagrodą Nobla). Teoria ta podkreśla, że skomplikowane układy mogą zachowywać się w prosty sposób, a całość układu góruje nad działaniem swych składników. Złożoność jest nieodłączną właściwością układów chaotycznych dynamiki nieliniowej, w tym również układów ekologicznych. Na przykład wspomniany już układ patologiczny zimnicy można rozpatrywać nie tylko na poziomie molekularnym i komórkowym, lecz także jako układ ekologiczny (Rys. 5), w którym można wyróżnić wiele podporządkowanych układów dynamiki nieliniowej (Kadłubowski 2001).

Obecnie teorię złożoności wykorzystuje się także w analizie układów ekonomicznych i społecznych, a zjawisko samokomplikowania się wykryto nieoczekiwanie także w doświadczeniach komputerowych. Mianowicie stwierdzono konstruowanie się samokopiujących się łańcuchów zer i jedynek, konkurujących ze sobą o obszary pamięci, ulegających mutacjom lub „pasożytujących", to znaczy wykorzystujących inne łańcuchy do własnej reprodukcji. Warto zaznaczyć, że teorię układów chaotycznych dynamiki nieliniowej łącznie z teorią złożoności uważa się obecnie za czołowe osiągnięcie nauk ostatniego przełomu wieków.

LITERATURA

Kadłubowski R. 2003. Podstawowe pojęcia ekologii medycznej. W: *Ekologia medyczna*. (Red. A. Kurnatowska, P. Kurnatowski) Promedi, Łódź (w druku).

Kadłubowski R. 2001. Tło ekologiczne nauk medycznych. W: *Ekologia. Jej związki z różnymi dziedzinami wiedzy medycznej*. (Red. A. Kurnatowska) PWN, Warszawa, 12-30.

Stewart I. 1997. The new mathematics of chaos. Penguin Books.

Tempczyk N. 2002. Teoria chaosu dla odważnych. PWN, Warszawa.

Zaakceptowano do druku 26 czerwca 2003