DYNAMIKA NAUKI

Seria
ROZPRAWY OBI

1. Zbigniew Wolak, *Neotomizm a szkoła lwowsko–warszawska*, Kraków 1993.
2. Jacek Dembek, *Przestrzeń i nieskończoność. Koncepcja matematyki H. Weyla i jej realizacja w pojęciu przestrzeni jako kontinuum*, Kraków 1994.
3. Józef Kloch, *Świadomość komputerów? Argument „Chińskiego Pokoju" w krytyce mocnej sztucznej inteligencji według Johna Searla*, Kraków 1996.
4. Zbigniew Liana, *Koncepcja Logosu i natury w Szkole w Chartres. Heurystyczne funkcje chrześcijańskiej koncepcji Logosu w kształtowaniu się nowożytnego pojęcia natury*, Kraków 1996.
5. Bogusław Wójcik, *Świadomość ponowoczesna i jej krytyka. Funkcjonalizm homunkularny w interpretacji świadomości Daniela C. Dennetta*, Tarnów 1997.
6. Tadeusz Sierotowicz, *Nauka a wiara — przestrzeń dialogu. Obrazy świata jako przestrzeń dialogu pomiędzy nauką i teologią*, Tarnów 1997.
7. Stanisław Wszołek, *Nieusuwalność metafizyki. Logiczno–lingwistyczne debaty Rudolfa Carnapa z Ludwikiem Wittgensteinem i Karlem R. Popperem*, Tarnów 1998.
8. Janusz Mączka, *Od matematyki do filozofii. Twórcza droga Alfreda N. Whiteheada*, Tarnów 1998.
9. Jerzy Witczak, *Eddington i teoria względności*, Tarnów 1999.
10. Zbigniew Kępa, *Marksizm i ewolucja. „Twórczy darwinizm" jako narzędzie propagandy antyreligijnej w latach 1948–1956*, Tarnów 1999.
11. Jerzy Dadaczyński, *Matematyka w oczach filozofa. Jedenaście artykułów z filozofii matematyki*, Tarnów 2002.
12. Krzysztof Wójtowicz, *Platonizm matematyczny. Studium filozofii matematyki Kurta Gödla*, Tarnów 2002.
13. Jacek Dębiec, *Mózg i matematyka*, Tarnów 2002.
14. Robert Janusz, *Program dla Wszechświata. Filozoficzne aspekty języków obiektowych*, Kraków 2002.
15. Teresa Obolevitch, *Nauka w poszukiwaniu metafizyki. Aspekty poznania naukowego w teorii wiedzy integralnej Włodzimierza Sołowjowa*, Tarnów 2004.
16. Maria Piesko, *Naukowa metafizyka Zygmunta Zawirskiego*, Tarnów 2004.
17. Anna Brożek, *Symetria w muzyce czyli o pierwiastku racjonalnym w komponowaniu dzieł muzycznych*, Tarnów 2004.

PAWEŁ POLAK

Dynamika nauki

Filozoficzne aspekty modelowania rozwoju nauki przy pomocy układów dynamicznych

OBI

Biblos

ISBN 83-7332-239-6

Redakcja: *Małgorzata Szczerbińska–Polak*
Korekty: *Małgorzata Wielek–Konopka,*
Małgorzata Szczerbińska–Polak
Skład w systemie LaTeX: *Paweł Polak*
Projekt okładki: *Artur Piątek*

OŚRODEK BADAŃ INTERDYSCYPLINARNYCH
PRZY WYDZIALE FILOZOFICZNYM
PAPIESKIEJ AKADEMII TEOLOGICZNEJ
W KRAKOWIE
`http://www.obi.opoka.org/`

Wydawnictwo Diecezji Tarnowskiej
Biblos
Plac Katedralny 6, 33–100 Tarnów
tel. (0–14) 621–27–77
fax (0–14) 622–40–40
e-mail: `biblos@wsd.tarnow.pl`
`http://www.wsd.tarnow.pl/biblos/`

Spis treści

Wstęp

W poszukiwaniu istoty rozwoju nauki

„Od szeregu lat nauka stała się sama przedmiotem badań naukowych” — tymi słowami Maria i Stanisław Ossowscy rozpoczęli w 1935 roku artykuł, zatytułowany „Nauka o nauce”[1]. Praca ta zainicjowała nową dyscyplinę badań — naukoznawstwo (*science of science*)[2]. Już wówczas dostrzeżono, że nauka może badać samą siebie jako pewien fenomen społeczny (a nawet przyrodniczy). Co więcej — wkrótce okazało się, że nauka, opisując samą siebie, robiła to coraz skuteczniej, a skuteczność ta mierzona była coraz większymi możliwościami predykcyjnymi tworzonych modeli.

Wydaje się, że co do tego w nauce zawsze panowała jednomyślność: jeżeli umiemy skutecznie przewidywać przyszły przebieg zjawiska, to wnioskujemy z tego, że poznaliśmy wystarczająco dobrze podstawowe, istotne mechanizmy jego działania[3].

W trakcie rozwoju naukoznawstwa wyodrębniła się z niego dyscyplina zwana *naukometrią*[4]. Jej początki sięgają lat trzydziestych XX wieku[5], choć prekursorska praca Alphonsa de Candolle’a, dotycząca

---

[1] M. Ossowska, S. Ossowski, „Nauka o nauce”, *Nauka Polska*, 20 (1935), 1–12.

[2] Opinię taką wyrażało wielu znanych badaczy zajmujących sie tą dyscypliną. Dla przykładu wymieńmy Johna D. Bernala i Dereka J. de Solla Price’a (por. J. D. Bernal, A. L. Mackay, „Na drodze do naukoznawstwa”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 2 (1966), 9–17; D. J. de Solla Price, „The History of Science as Training and Research for Administration and Political Decision–making”, *Organon*, 1 (1964), 21–24). Zobacz również współczesny artykuł o badaniach naukoznawczych w Polsce: P. Hübner, „Nauka o nauce”, *Forum Akademickie*, 3 (2001). Inna polska nazwa tej dyscypliny to *nauka o nauce*.

[3] Powyższe stwierdzenie, za pomocą współczesnego języka filozoficznego, wyraża intuicje, towarzyszące naukowcom w ich pracy już od wielu stuleci.

[4] Najprościej można powiedzieć, że naukometria zajmuje się badaniem ilościowych aspektów nauki. Definicję taką przyjęto przy określaniu tematyki najbardziej znaczącego czasopisma z tej dziedziny — *Scientometrics*.

[5] Najczęściej przyjmuje się, że zapoczątkowana została pracą brytyjskiego krysta-

„pomiarów nauki", pojawiła się pod koniec XIX wieku. Jego monografia, zatytułowana *Historie de science et des savants depuis deux siècles*[6], znacznie wyprzedziła swoją epokę. Nazwę *naukometria* nadał nowej dyscyplinie w 1966 r. sowiecki naukowiec W. W. Nalimow[7]. W latach sześćdziesiątych XX wieku został zapoczątkowany okres burzliwego rozwoju tej dyscypliny. Naukometria zyskała duże znaczenie ze względu na możliwość zastosowania jej wyników do kształtowania polityki naukowej (*science policy*). Bardzo ważnym zagadnieniem okazała się predykcja przyszłego rozwoju nauki, w związku z czym wzrosło zapotrzebowanie na dobre modele matematyczne.

Przełomowymi dla rozwoju nowej dyscypliny okazały się prace brytyjskiego historyka nauki i fizyka, Dereka de Solla Price'a (*Węzłowe problemy historii nauki*[8] i *Mała Nauka — Wielka Nauka*[9]) oraz pierwsza monografia z tej dziedziny, autorstwa W. W. Nalimowa i Z. M. Mulczenki, zatytułowana *Naukometria*[10].

lografa J. D. Bernala — *The Social Function of Science*, London 1939.

[6] *Historie des sciences et des savants depuis deux siècles précédée et suivie d'autres études sur des sujets scientifiques en particulier sur l'hérédité et la sélection dans l'espèce humain*, par Alphonse de Candolle, Associé étranger de l'Academie des sciences de Paris, Membre étranger des Sociétés royales de Londres, Edinbourg et Dublin, des Academies de Berlin, Munich, Saint–Pétersbourg, Stockholm, Copenhague, Bruxelles, Amsterdam, Rome, de l'Academie américaine, etc., Dr en droit de l'ancienne Académie de Geneve. Deuxiemme édition considérablement augmentée, H. Georg, Lyon meme Maison, Genève–Bale, 1885. Wydanie współczesne: Alphonse de Candolle, *Historie des Sciences et des Savants Depuis Deux Siècles, d'après l'Opinion des Principales Académies ou Sociétés Scientifiques*, Librairie Arthème Fayard, Paris 1987. Zob. także: S. Mikulinsky, „Alphonse de Candolle's «Histoire des sciences et des savants depuis deux siècles» and its historic significance", *Organon*, 10 (1973), 223–243; A. T. Szabó, „Alphonse de Candolle's early scientometrics (1883, 1885) with references to recent trends in the field (1978–1983)", *Scientometrics*, 8 (1985), 13–33.

[7] Por. Yu. V. Granovsky, „Comments on V. V. Nalimov recipent of The 1987 Derek de Solla Price Award", *Scientometrics*, 15 (1989), 8–9.

[8] D. J. de Solla Price, *Węzłowe problemy historii nauki*, PWN, Warszawa 1965.

[9] D. J. de Solla Price, *Mała Nauka — Wielka Nauka*, PWN, Warszawa 1967.

[10] W. W. Nalimow, Z. M. Mulczenko, *Naukometria*, WNT, Warszawa 1971.

W związku z rozwojem naukometrii i koniecznością międzynarodowej wymiany doświadczeń, w 1978 roku utworzono anglojęzyczne czasopismo *Scientometrics*[11]. Pomimo istniejących wówczas silnych podziałów politycznych, publikowali w nim swe artykuły autorzy z całego świata. Na łamach pisma ukazywały się prace wszystkich badaczy, którzy wnieśli znaczący wkład w rozwój naukometrii. Wspomniane czasopismo do dziś jest największym forum wymiany doświadczeń i informacji z zakresu naukometrii. Stanowi ono najpoważniejsze źródło wiadomości o badaniach naukometrycznych na świecie i jest fundamentalnym źródłem informacji w kwestiach modelowania rozwoju nauki.

Na gruncie naukometrii powstało wiele modeli rozwoju nauki, zbudowanych na bazie teorii układów dynamicznych. Modele dynamiczne, czyli modele konstruowane w oparciu o formalizm układów dynamicznych, są szeroko wykorzystywane do modelowania różnych procesów zmiennych w czasie. Spotkamy je wszędzie tam, gdzie mamy do czynienia ze zjawiskami zmiennymi — dla przykładu w fizyce, w ekologii lub w ekonomii. Układy dynamiczne są w istocie układami równań różniczkowych zależnych od czasu[12].

Ze względu na interesujące nas zastosowania, modele dynamiczne można podzielić na dwie klasy: jednoznaczne i statystyczne[13]. Różnica zachodząca pomiędzy nimi polega na tym, że pierwsze operują układami równań różniczkowych opisujących *zmiany wartości* pewnych parametrów w czasie, a drugie — *zmiany prawdopodobieństw*.

---

[11] *Scientometrics*, An International Journal for all Quantitative Aspects of the Science of Science, Communication in Science and Science Policy, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam–Oxford–NewYork, Akadémiai Kiadó, Budapest. Ukazuje się od 1978. Zobacz także: <`http://www.kluweronline.com/issn/0138-9130`>.

[12] Por. np. M. Szydłowski, A. Krawiec, „Złożone zachowanie prostych układów nieliniowych”, *Filozofia Nauki*, VI, 3–4 (1998), 78–79. Teorii układów dynamicznych poświęcono wiele opracowań. Jako przykłady można podać: W. Szlenk, *Wstęp do teorii gładkich układów dynamicznych*, PWN, Warszawa 1982; W. I. Arnold, *Równania różniczkowe zwyczajne*, PWN, Warszawa 1975.

[13] Por. klasyfikacja praw w: W. Krajewski, *Prawa nauki. Przegląd zagadnień metodologicznych i filozoficznych*, Książka i Wiedza, Warszawa 1998, ss. 206–208. W praktyce naukowej stosuje się również nazwy: *modele deterministyczne* i *probabilistyczne*.

W niniejszym opracowaniu będziemy się zajmować modelami jednoznacznymi, ponieważ badania nad poznaniem ich natury są bardziej zaawansowane niż w przypadku modeli probabilistycznych. Te ostatnie operują z reguły bardziej skomplikowanymi metodami matematycznymi, a ich interpretacja budzi więcej kontrowersji[14]. Modele deterministyczne — w odróżnieniu od probabilistycznych[15] — nie doczekały się jeszcze żadnego całościowego opracowania. Jest to dodatkowy argument, aby w niniejszej pracy skupić się właśnie na nich.

Sukcesy związane z zastosowaniami matematyczno–empirycznych modeli nauki skłaniają do postawienia pytania, czy opisywane modele mogą w jakiś sposób wzbogacić filozoficzną refleksję nad rozwojem nauki. Pytanie to wprowadza nowy wątek do współczesnej filozofii nauki, której badania koncentrowały się dotychczas wokół innych, „tradycyjnych" kierunków refleksji nad istotą nauki. Badania naukometryczne, rozwijające się owocnie od przeszło czterdziestu lat, pozostają ciągle niezauważone przez filozofów. Co więcej, wielu przedstwicieli naukoznawstwa[16] trwało w przekonaniu, że prowadzone przez nich badania ujmują istotę rozwoju nauki.

Wydaje się jednak, że analiza dynamicznych modeli rozwoju nauki może dostarczyć cennych informacji o rozwoju nauki[17], koniecznych do zbudowania bardziej adekwatnej filozofii nauki. Szczególnie interesujący jest problem możliwości matematycznego ujęcia problemu rozwoju nauki. Pozytywne rozstrzygnięcie tej kwestii umożliwiłoby przeniesie-

---

[14] Podobne stanowisko zajmują np. W. E. Herfel i C. A. Hooker w pracy „From formal machine to social colony: Toward a complex dynamical philosophy of science" w: *Language, Quantum, Music: Select Proceedings of the 10th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science*, M. L. Dalla Chiara et al. (red.), Kluwer Academic Publishers, Boston 1998, ss. 7–16.

[15] S. M. Kot, *Modele stochastyczne rozwoju dyscyplin naukowych*, praca doktorska nieopublikowana, Akademia Ekonomiczna, Kraków 1975.

[16] Na przykład Derek de Solla Price.

[17] Taki pogląd podziela np. Józef Życiński. Por. J. Życiński, „Spór o racjonalność nauki a zasada naturalności interdyscyplinarnej", *Analecta Cracoviensia*, 19 (1987), 517.

nie dyskusji o racjonalności rozwoju nauki na nowe, obiecujące tory[18].

W związku z tym, iż naukometria pojawiła się w obrębie dociekań filozoficznych, konieczne stało się określenie znaczenia wyników naukometrycznych dla filozofii nauki. Wyniki te uznawane są powszechnie za przynależące do socjologii pozapoznawczej (*non–cognitive sociology*)[19]. Mimo, że kwestia ich znaczenia dla filozofii nie budzi większych kontrowersji[20], otwarte pozostaje wciąż pytanie, na czym owa przydatność polega. Jest to jedno z najważniejszych pytań, na które postaram się udzielić odpowiedzi. Rozważania te podzielone zostały na dwie części. Pierwsza część książki (rozdziały 1–3) zawiera prezentację zagadnienia modelowania rozwoju nauki przy pomocy jednoznacznych układów dynamicznych[21], w drugiej dokonam analizy zagadnień filozoficznych związanych z wykorzystaniem tych modeli.

---

[18] Na tę kwestię zwrócił uwagę M. Heller. Zob. tego autora „Kilka uwag o rozwoju nauki” w: *Fizyka ruchu i czasoprzestrzeni*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993, ss. 168–180; M. Heller, „Nieliniowa ewolucja nauki” w: *Szczęście w przestrzeniach Banacha*, ZNAK, Kraków 1995, ss. 159–160; M. Heller, *Filozofia nauki. Wprowadzenie*, OBI–Wydawnictwo Naukowe PAT, Kraków 1992, ss. 53–72.

[19] Przedmiotem badań socjologii pozapoznawczej są uwarunkowania rozwoju nauki, które nie wpływają na treść wyników nauki.

[20] W przeciwieństwie do wyników socjologii poznawczej, która próbuje wytłumaczyć wpływ uwarunkowań społecznych na treść wiedzy naukowej. Por. J. Życiński, „Spór o racjonalność nauki…, s. 517. Więcej o różnicach pomiędzy wymienionymi odmianami socjologii nauki można znaleźć na stronie 141 niniejszej pracy.

[21] W pierwszej części pracy pojawiają się z konieczności liczne wzory matematyczne. Ich liczba została ograniczona do niezbędnego minimum. Do zrozumienia zaprezentowanego aparatu matematycznego wystarczy wiedza z tej dziedziny na poziomie szkoły średniej.

1. Dynamiczne modele rozwoju nauki o prostym zachowaniu

Rozważania dotyczące zagadnienia modelowania rozwoju nauki rozpoczniemy od przyjrzenia się istniejącym już modelom naukometrycznym.

Pierwsze dynamiczne modele rozwoju nauki pojawiły się na początku dwudziestego wieku. Pierwotnie były to modele o prostej dynamice. W większości przypadków wykorzystywano w nich analogie do istniejących wcześniej modeli, które z powodzeniem funkcjonowały w innych dziedzinach nauki. Prostota tych modeli podyktowana była w dużej mierze ograniczeniami, wynikającymi z istniejących wówczas możliwości obliczeniowych.

1.1. Model liniowy (1907)

Najstarsza hipoteza, związana z rozwojem nauki, postulowała liniową zależność rozwoju nauki od czasu[22]. Założenie takie prowadzi do sformułowania najprostszego modelu dynamicznego, w którym prędkość wzrostu wyników badań naukowych (i informacji) zależy liniowo od czasu, a przyspieszenie jest stałe:

$$\frac{dI}{dt} = at, \qquad \frac{d^2I}{dt^2} = a, \tag{1}$$

gdzie:

I — ilość informacji lub wyników badań naukowych,

$a = const$ — stała proporcjonalności (przyspieszenie rozwoju).

Taki prosty układ dynamiczny posiada jednoznaczne rozwiązanie o postaci:

[22] Por. A. Avramescu, „Eksploracyjne metody prognozowania”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 7 (1971), 220–234.

$$I(t) = \int_{t_0=0}^{t} a\tau \, d\tau = \frac{a}{2}t^2. \tag{2}$$

Szybko okazało się, że model taki nie odpowiada rzeczywistości — ilość informacji otrzymywanej w wyniku działalności naukowej rośnie wraz z upływem czasu znacznie szybciej niż funkcja kwadratowa. Empiryczne pomiary wskaźników rozwoju nauki (np. liczby publikowanych prac, liczby udowodnionych twierdzeń matematycznych, itp.) sfalsyfikowały ten model. Obecnie wspomina się o nim jedynie ze względów historycznych.

1.2. Model eksponencjalny (ok. 1960)

Bardzo trudno jest określić pierwsze próby wykorzystania modelu wykładniczego wzrostu do opisu rozwoju nauki[23]. W wielu rozmaitych dziedzinach już wcześniej obserwowano bowiem bardzo szybki, zbliżony do eksponencjalnego, przyrost wskaźników charakteryzujących wielkość (lub ilość) wytworów ludzkiej działalności[24]. Zachowanie takie obserwuje się w procesach, w których występuje kumulacyjny wzrost osiągnięć — kolejne, coraz większe przyrosty dodają się do poprzedniego stanu systemu.

O ile trudno wskazać jednoznacznie twórcę modelu eksponencjalnego, o tyle można jednak śmiało powiedzieć, że największą rolę przy wprowadzeniu jego do naukometrii odegrała niewielka książeczka Dereka de Solla Price'a pt. *Mała Nauka — Wielka Nauka*, opublikowa-

[23] Model ten został wprowadzony do nauki przez T. R. Malthusa, który użył go do opisania rozwoju populacji w słynnej pracy *Essay on Populations* (1798). Por. S. Blackburn, „Malthus Thomas Robert (1766–1834)" w: *Oksfordzki słownik filozoficzny*, Książka i Wiedza, Warszawa 1997, s. 225.

[24] Wymieńmy tu dla przykładu najważniejszy artykuł poruszający to zagadnienie: H. C. Lehman, „The exponential increase of man's cultural output", *Social Forces*, 25 (1947), 281–290.

na w 1963 roku[25]. Uczony ten był fizykiem, który zmienił następnie dziedzinę swych zainteresowań na historię nauki. Przedstawił koncepcję wykorzystania metod nauki do badania historii jej rozwoju. Postawił równocześnie hipotezę wykładniczego wzrostu nauki, którą oparł na rozległym materiale empirycznym, dotyczącym różnych aspektów rozwoju nauki. Model eksponencjalny, za którego twórcę uważany jest Solla Price, szybko zyskał dużą popularność wśród badaczy, stając się modlelm najczęściej stosowanym w praktyce badawczej[26].

[25] Świadczy o tym choćby fakt, że wspomniana książka była najczęściej cytowaną pracą w czasopiśmie *Scientometrics*. Zob. A. Schubert, „The Web of Scientometrics. A statistical overview of the first 50 volumes of the journal", *Scientometrics*, 53 (2002), 14.

[26] Trzeba zaznaczyć, że wskazywane były również inne źródła tego modelu. Dla przykładu sowiecki uczony G. M. Dobrow uważał Engelsa za twórcę koncepcji głoszącej, że prędkość rozwoju nauki jest proporcjonalna do zgromadzonej wiedzy, co popierał cytatem z *Dzieł zebranych* K. Marksa i F. Engelsa (por. G. M. Dobrow, „Tiendiencyi razwitia organizacyi nauki", *Organon*, 2 (1965), 227–242). Trzeba jednak stwierdzić, że badania historyczne wskazują, iż faktycznie naukometria w ZSRS rozwijała się bardziej pod wpływem prac D. de Solla Price'a, niż z inspiracji dziełami Marksa i Engelsa (por. artykuł P. Woutersa, *Scientometrics by Hand. The Ups and Downs of Scientometrics in Russia*, 30.11.2004, <`http://www.upmf-grenoble.fr/adest/seminaires/wouters.html`>). Jedynie twórca grupy kijowskiej, G. M. Dobrow, zająwszy się głównie kierowaniem polityką naukową, przyjął oficjalną ideologię państwową i próbował dostosowywać do niej swoje badania, uzasadniając w nich historyczną rolę marksizmu. Stąd zapewne wzięło sie owo stwierdzenie, które prawdopodobnie zostało postawione *ex post* (por. L. G. Gurjeva, *Early Soviet Scientometrics and Scientometricians*, Thesis for the degree of MSc in Science Dynamics, collegekaartnr. 9177035, Wetenchapsdynamica Universiteit van Amsterdam, Amsterdam 1992, ss. 61–62).

Faktycznie największy wpływ odegrały prace de Solla Price'a. Na rzecz tej tezy świadczy fakt, że to Price jest najczęściej cytowanym autorem w czasopiśmie *Scientometrics*, a Engels nie jest w ogóle wspominany. (Por. A. Schubert, „The Web of Scientometrics...", s. 14). Kolejnym potwierdzeniem tej tezy jest fakt, iż wszyscy znani naukowcy sowieccy zajmujący się naukometrią odwoływali się do wyników zaprezentowanych w książce *Mała Nauka – Wielka Nauka*.

Praca Price'a wywołała rewolucję w naukometrii i zapoczątkowała cały ciąg statystycznych badań nad nauką[27]. Wraz ze znanym dziełem T. Kuhna, *Struktura rewolucji naukowych*[28], zainicjowała ona socjologiczny nurt badań nauki i stworzyła pewien naukometryczny paradygmat. Skutkiem tego po dzień dzisiejszy wielu naukowców stara się uzasadniać w swych badaniach eksponencjalny rozwój nauki, mimo iż od razu było wiadomo, że model ten jest odpowiedni tylko w pewnych specyficznych warunkach (tj. przy przyjęciu mocnych ograniczeń), o których wspomnimy w dalszej części pracy.

Z matematycznego punktu widzenia model eksponencjalnego wzrostu jest niezwykle prosty — zakłada bowiem, że prędkość rozwoju nauki jest wprost proporcjonalna do obecnego poziomu jej rozwoju. Innymi słowy: istnieje dodatnie sprzężenie zwrotne pomiędzy prędkością rozwoju nauki a jej obecnym stanem — im „większa" jest nauka, tym szybciej się rozwija, im szybciej się rozwija, tym staje się „większa", itd. Założenie takie daje się opisać bardzo prostym układem dynamicznym:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \alpha y(t), \tag{3}$$

gdzie $y(t)$ jest pewnym mierzalnym parametrem, opisującym rozwój nauki (np. liczbę publikacji), natomiast α jest współczynnikiem proporcjonalności[29]. Rozwiązanie analityczne tego równania jest jednym z najprostszych w teorii równań różniczkowych — jest nim krzywa wykładnicza, od której model wziął swoją nazwę.

---

[27] Por. B. C. Griffith, „Derek Price (1922–1983) and the social studies of science", *Scientometrics*, 6 (1984), 5–7.

[28] T. S. Kuhn, *Struktura rewolucji naukowych*, Aletheia, Warszawa 2001 (pierwsze wydanie: *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Illinois 1962).

[29] Różniczka $dy(t)/dt$ modeluje zmianę (przyrost) wielkości y zależnej od parametru t (czasu). Druga strona równania opisuje „przyczynę" tej zmiany. W interesującym nas przypadku jest to aktualny stan wielkości $y(t)$, odzwierciedlającej poziom rozwoju nauki. Modele dynamiczne wyjaśniają więc wewnętrzne (tj. należące do modelu) przyczyny zmiany stanu układu.

Solla Price wykazał na wielu przykładach, że rozwój nauki do lat sześćdziesiątych XX wieku (tj. do chwili publikacji jego pracy) miał właśnie charakter eksponencjalny. Liczba czasopism, liczba publikacji, liczba naukowców, nakłady na naukę — wszystkie te wielkości wzrastały wówczas wykładniczo. Okres podwojenia[30] liczby naukowców, wyznaczony na podstawie danych zebranych przez tego badacza, wynosił 14 lat. Solla Price tak podsumował swoje rozważania: „jeżeli się mierzy dostatecznie duży fragment nauki w jakikolwiek rozsądny sposób, to normalny wzrost ma charakter wykładniczy"[31].

Badacz ten pod wpływem uzyskanych wyników, posunął się nawet do tryumfalnego stwierdzenia, dotyczącego prawa wzrostu wykładniczego: „Prawo to sięga tak daleko, że nie waham się twierdzić, iż stanowi ono fundamentalną zasadę **wszelkiej** analizy nauki"[32]. Powyższe zdanie jest interesujące z punktu widzenia naszych rozważań. Pokazuje ono, że celem modelowania było znalezienie pewnej „fundamentalnej zasady" rozwoju nauki. Takie naświetlenie problemu ukazuje jasno, że wskazany cel jest bardzo bliski temu, do którego dąży filozofia nauki.

Bardzo szybko zauważono jednak, że jeżeli nauka miałaby się rozwijać ściśle według modelu wykładniczego, to liczba naukowców wkrótce przekroczyłaby liczbę ludności na całym świecie (wliczając w to noworodki, dzieci i starców), a masa papieru zużytego na publikacje naukowe przewyższyłaby masę Ziemi[33]. Stało się jasne, że nauka jest procesem, który rozwija się w ograniczonym środowisku, musi więc nastąpić moment, kiedy krzywe wzrostu wejdą w obszar nasycenia, przyrosty wskaźników będą maleć do zera, a stan nauki będzie zbliżać się do pewnej granicy[34]. Z drugiej strony pozostawało ewidentnym faktem, że

[30] Jest to czas, po którym dana wielkość osiągnie wartość dwa razy większą od wyjściowej przy założeniu stałej prędkości jej przyrostu ($\alpha = const$).

[31] D. J. de Solla Price, *Mała Nauka — Wielka Nauka*, PWN, Warszawa 1967, s. 14.

[32] D. J. de Solla Price, *Mała Nauka*..., s. 14 (podkreślenie P.P.).

[33] Por. D. J. de Solla Price, *Węzłowe problemy historii nauki*, PWN, Warszawa 1965, s. 110.

[34] Świadomy tego zjawiska był już sam Derek de Solla Price. Niestety, jego kontynuatorzy pozostawali bardziej bezkrytyczni.

krzywa wykładnicza opisywała dobrze szybki rozwój nowych dziedzin w początkowej fazie rozwoju.

Z pomocą w rozwiązaniu tego problemu przyszła pewna analogia. Naukowcy szybko zauważyli (np. Solla Price, Nalimow i Mulczenko), że analogiczne równanie opisuje wzrost kultury bakterii przy nieograniczonych zasobach środowiska. Naturalnym krokiem było zastosowanie istniejącego już w ekologii modelu wzrostu kolonii organizmów w warunkach ograniczonych rozmiarów środowiska[35]. W ten sposób z modelu eksponencjalnego uwaga przeniosła się na model logistyczny.

1.3. Model z „obumieraniem” wyników — krzywa logistyczna (ok. 1960)

„[. . .] «Normalne» [tj. eksponencjalne — P. P.] prawo wzrostu, które rozpatrywaliśmy dotychczas, opisuje w istocie bardzo nienormalny stan rzeczy. W świecie rzeczywistym nic nie rośnie w nieskończoność. Krzywa wykładnicza musi w końcu osiągnąć jakąś granicę, począwszy od której tempo zachodzących procesów będzie słabło i stopniowo ulegnie zahamowaniu, zanim dojdzie do absurdu. Ta bardziej realistyczna funkcja jest także dobrze znana jako krzywa logistyczna”[36].

W przypadku omawianego modelu również niezwykle trudno wskazać, kto pierwszy zastosował go do badania rozwoju nauki[37]. Bardzo

[35] Avramescu podaje przykład wzrostu liczby drozofili zamkniętych w butelce (por. A. Avramescu, „Eksploracyjne metody. . . ”, s. 225).

[36] D. J. de Solla Price, *Mała Nauka. . .* , s. 27.

[37] Równanie logistyczne (zwane również *równaniem Verhulsta*) zostało stworzone w 1838 r. przez belgijskiego matematyka P. F. Verhulsta, który zastosował je do modelowania rozwoju populacji w warunkach ograniczonego środowiska. (M. Barile, *Verhulst, Pierre – Francois (1804–1849) — from Eric Weisstein's World of Scientific Biography*, 30.11.2004, <`http://scienceworld.wolfram.com/biography/Verhulst.html`>. Więcej informacji na temat równania logistycznego można znaleźć w: E. W. Weisstein, *Logistic Equation. From MathWorld–A Wolfram Web Resource*, 2.12.2004, <`http://mathworld.wolfram.com/LogisticEquation.html`>; A. Sharov, *Lo-*

szybko powstała bowiem duża liczba prac na ten temat, praktycznie uniemożliwiając określenie prekursora. Wystarczy stwierdzić, że model logistyczny szybko stał się drugim z najpopularniejszych modeli rozwoju nauki.

Opracowany na gruncie ekologii matematyczny model wzrostu kolonii organizmów przy ograniczonych zasobach środowiska opisywany jest przez następujące równanie różniczkowe:

$$\frac{dy(t)}{dt} = ay(t)(b - y(t)), \qquad a > 0, \tag{4}$$

gdzie:

$y(t)$ — liczebność kolonii,

a — prędkość wzrostu, b — współczynnik hamowania wzrostu.

Rozwiązaniem analitycznym tego modelu jest równanie opisujące tzw. *krzywą logistyczną*:

$$y(t) = \frac{b}{1 + C\exp(-abt)}, \qquad y \in (0; b). \tag{5}$$

Jeżeli dokona się reinterpretacji wielkości tego modelu, w następujący sposób:

$y(t)$ — liczba publikacji,

a — prędkość przyrostu nowych publikacji,

b — współczynnik starzenia się wyników („obumierania”),

C — stała całkowania (dobierana tak, aby równanie (5) spełniało warunki początkowe),

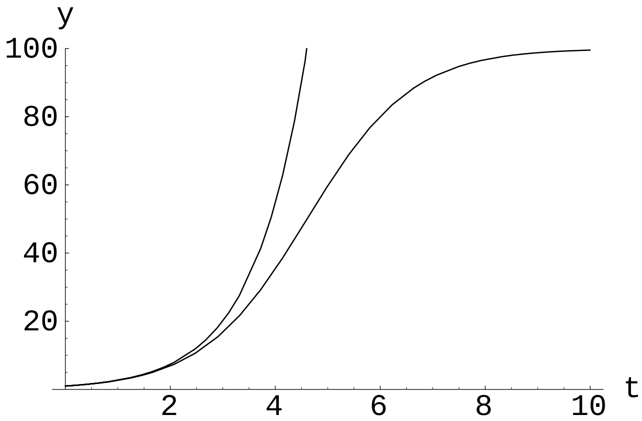
to otrzymujemy drugi z najpopularniejszych modeli nauki — model logistyczny[38].

---

gistic Model, 30.11.2004, <`http://www.ento.vt.edu/~sharov/PopEcol/lec5/logist.html`>).

[38] Zauważmy, że taki zabieg ma jedną, bardzo poważną konsekwencję: okazuje się, że struktura rozwoju kolonii bakterii i struktura rozwoju dziedziny naukowej są pod względem matematycznym izomorficzne. Innymi słowy — z punktu widzenia matematyki modele te nie różnią się. Tak więc *z punktu widzenia struktury* rozwój

Krzywa logistyczna posiada następujące własności: jest rosnąca i ograniczona do przedziału $(0; b)$. Dla małych wartości parametru czasu t (początkowy etap rozwoju) tempo wzrostu jest wykładnicze, następnie coraz większą rolę zaczyna odgrywać czynnik hamujący, zmniejszając od pewnego momentu coraz mocniej tempo wzrostu tak, że funkcja asymptotycznie zmierza do górnej granicy, równej b.



Rys. 1. Wzrost eksponecjalny (górna krzywa) i wzrost logistyczny. Funkcja eksponencjalna szybko dąży do bardzo dużych wartości, co ogranicza użyteczność modelu eksponencjalnego w naukometrii

Układ logistyczny modeluje dosyć dobrze różne aspekty rozwoju nauki, np. rozwój problemów naukowych. Najpierw zainteresowanie nowymi problemami gwałtownie rośnie (wzrost eksponencjalny), potem w miarę rozwiązywania kolejnych części problemu tempo przyrostu wyników spada (rośnie trudność stawianych podproblemów, rośnie czas potrzebny na zapoznanie się z bieżącym stanem badań, itp.), a następnie stan badań nasyca się, dążąc do pewnej granicy.

kolonii bakterii i rozwój dyscypliny naukowej są w istocie tym samym. Fakt ten mógłby wskazywać, że po przyjęciu pewnych założeń co do tego, co uznajemy za naukę, jej rozwój można by uznać za typowy proces osadzony w świecie przyrody. Tak rozumiana nauka leżałaby więc w polu zainteresowania filozofii przyrody, choć uzyskiwane wnioski mogą być interesujące również dla filozofii nauki.

Bardzo istotny jest początkowy fragment krzywej logistycznej. Tłumaczy on, dlaczego model eksponencjalny zgadza się z dużą liczbą obserwowanych przypadków: proces rozwoju nauki, jej dyscyplin lub problemów w swych początkowych fazach ma taki właśnie charakter. W miarę upływu czasu tempo rzeczywistego rozwoju nauki musi jednak spadać i odpowiedniejszy staje się model logistyczny (por. Nalimow i Mulczenko). Ten drugi model uznamy za doskonalszy, ponieważ opisuje rozwój nauki w szerszym horyzoncie czasowym (zatem przy słabszych ograniczeniach). Model logistyczny jest jednak daleki od ideału, daje on gładką krzywą w kształcie litery S, która z całą pewnością nie jest w stanie opisywać złożonego zachowania rzeczywistej nauki.

Równanie różniczkowe, opisujące prezentowany model, można zapisać również w nieco innej formie:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \alpha y(t) - \beta y^2(t), \tag{6}$$

gdzie α odpowiada prędkości wzrostu, a β jest współczynnikiem „obumierania" wyników. W takiej postaci widać lepiej analogię do modelu eksponencjalnego — został on rozbudowany o pewien człon nieliniowy. Człon ten można zinterpretować jako mechanizm starzenia bądź „obumierania" wyników. W rozwoju nauki spotykamy bowiem nie tylko proces ciągłego powstawania nowych rozwiązań, ale również zjawisko dezaktualizowania się pewnych wyników. Wiemy przecież, że niektóre teorie zostają sfalsyfikowane i odrzucone, a pewne twierdzenia stają się przypadkami szczególnymi ogólniejszych. Istnieje więc proces usuwania pewnych wyników z obrębu nauki, wpisany w jej *wewnętrzną logikę*, tak samo, jak proces przyrostu nowych rezultatów.

Już na przykładzie powyższych dwóch modeli widać, że stworzone zostały struktury matematyczne, które wychwytują pewne istotne elementy wewnętrznej logiki rozwoju nauki. Wydaje się jednak, że uwzględniają one zbyt mało czynników — już nawet najprostsze intuicje wskazują, że rozwój nauki powodowany jest nie tylko tymi czynnika-mi[39]. Zastanawiające jest jednak, że już tak proste struktury modelują z dużym powodzeniem pewne aspekty rozwoju nauki (patrz prace Dereka de Solla Price'a). Daje to pierwsze informacje o strukturze samej nauki: w pewnych warunkach procesy liniowego wzrostu i nieliniowego „obumierania" wyników decydują w głównej mierze o kształcie rozwoju nauki.

Łatwo też zauważyć, że jest to pierwszy nieliniowy układ dynamiczny modelujący naukę. Jednakże ze względu na jego prostą strukturę nie jest on w stanie wykazywać złożonego zachowania, porównywalnego z zachowaniem rzeczywistego systemu nauki. Niemniej, w wielu pracach wykazano przydatność krzywej logistycznej do opisu i predykcji rozwoju nauki, jej dyscyplin, czy nawet do opisu zainteresowania pojedynczymi problemami. Wynika z tego, iż nawet tak prosta struktura wchodzi już w pewnych warunkach w dosyć dobry „rezonans" z rzeczywistą strukturą nauki. Dalsze poszukiwania będą miały na celu znalezienie modelu, którego zachowanie będzie jak najbardziej zbliżone do realnego zachowania samej nauki. Jednocześnie wysiłki zmierzać muszą do rozszerzenia zakresu stosowalności modeli. Tylko wtedy możemy mieć nadzieję, że znajdywane struktury są coraz bliższe poszukiwanej, nieznanej strukturze nauki.

Jako jeden z praktycznych przykładów zastosowania poprzednich idei podajmy model wykorzystany przez M. Hartmana[40]. Sformułował on układ dynamiczny, opisujący wkład badaczy w rozwój nauki. Zastosował analogię z termodynamiką gazu aby opisać proces wymiany informacji naukowej w trakcie rozwoju nauki. Według tej analogii badacze odpowiadają nieruchomym cząsteczkom ośrodka, z którymi zderzają się na płaszczyźnie wzajemnego styku (σ) cząsteczki informa-

---

[39] Liczne analizy z dziedziny naukoznawstwa i filozofii nauki wskazują na różne uwarunkowania rozwoju nauki. Próbę porównania opisowego modelu rewolucyjnego rozwoju nauki T. Kuhna z matematycznym modelem I. Prigogine'a można znaleźć w: M. Szydłowski, A. Krawiec, „Układy dynamiczne w modelowaniu rozwoju nauki" w: A. Jonkisz (red.), Postacie prawdy 3, *Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego*, 1802 (1999), 108–109.

[40] A. Avramescu, „Eksploracyjne metody...", ss. 224–225.

cji (odpowiednik ruchomych cząstek gazu), poruszające się ze średnią prędkością v. Zderzenie cząstek ruchomych z nieruchomymi odpowiada pojedynczemu aktowi wymiany informacji. Przyjęto również[41], że liczba badaczy zmienia się i rośnie eksponencjalnie: $N(t) = N_0 exp(t/T)$. W modelu Hartmana wzrost ilości informacji opisuje się równaniem[42]:

$$\frac{dI(t)}{dt} = kv\sigma N(t)I(t) = kv\sigma N_0 I_0 \exp(\frac{t}{T}), \tag{7}$$

gdzie:

$I(t)$ — ilość informacji,
$N(t)$ — liczba badaczy,
I_0, N_0 — wartości początkowe,
k — współczynnik proporcjonalności.

Jeżeli przyjmiemy ograniczenie na wzrost informacji ustalając górną granicę I_m, możemy wówczas otrzymać następujący model logistyczny:

$$I(t) = \frac{I_m}{1 + (\frac{I_m}{I_0} - 1)\exp(-bt)}, \tag{8}$$

gdzie $b = kv\sigma N$.

Przedstawiony powyżej model Hartmana jest więc przypadkiem szczególnym jednego ze wspomnianych już modeli: albo eksponencjal-

[41] Porównaj wyniki prac D. J de Solla Price'a przedstawione w paragrafie poświęconym modelowi eksponencjalnemu.

[42] Zauważmy, że podany model nie wynika wprost z opisanej analogii. Zaprezentowany uprzednio mechanizm opisuje tylko proces *wymiany informacji* (liczbę zdarzeń wymiany informacji), natomiast poniższy model opisuje jak wzrasta *ilość informacji* w systemie. Nawiązując do przedstawionej analogii termodynamicznej można powiedzieć, że równanie (7) opisuje jedynie jak wzrasta liczba cząsteczek gazu w danym naczyniu wraz z upływem czasu.

Można wskazać drogę, dzięki której możliwe jest przejście od zaprezentowanej analogii do modelu Hartmana. Należy w tym celu porzucić ścisłą analogię z termodynamiką i przyjąć, że podczas wymiany informacji z prawdopodobieństwem k dochodzi do wytworzenia nowej informacji (przy ścisłej interpretacji oznaczałoby to wytworzenie nowej cząstki(!)).

nego (bez ograniczeń), albo logistycznego. Model Hartmana zasługuje na uwagę szczególnie ze względu na fakt, iż był z powodzeniem stosowany do prognozowania tempa wzrostu liczby publikacji naukowych. Problematyczna jak zawsze była estymacja parametrów (k, v, σ). Przyjmowano więc w praktyce, że model ten daje poprawne predykcje dla okresu zbliżonego do tego, dla którego zebrano dane dla określenia wspomnianych parametrów. Zwykle był to przedział rzędu 10 lat. Model ten ukazuje rolę heurystyczną, którą odegrała termodynamika w badaniach naukoznawczych — prezentowany model naukometryczny powstał poprzez odpowiednią interpretację i rozbudowę struktury modelu termodynamicznego.

Model Hartmana zakłada niejawnie, że komunikowanie badaczy jest możliwe bez żadnych ograniczeń, i że wszystkie nowe informacje są w pełni wykorzystywane. Jak wiadomo, założenia te nie są obecnie możliwe do przyjęcia z uwagi na ogromny przyrost informacji i związane z tym problemy z jej przetwarzaniem.

Innym, znaczącym ograniczeniem prezentowanego modelu, podobnie jak wszystkich poprzednich, jest brak możliwości opisu gwałtownych wzrostów działalności naukowej[43]. Zaprezentowane dotychczas modele nie ujmują pewnych istotnych cech struktury nauki, które prowadzą do takich zachowań. Warto jednak podkreślić, że mimo upraszczającego charakteru modele te były jednak z powodzeniem stosowane w wielu zagadnieniach praktycznych[44].

[43] Por. A. Avramescu, „Eksploracyjne metody…”, ss. 223–228.

[44] Nie jest to sytuacja nowa w nauce. Najlepszym przykładem są prawa Newtona, które w świetle dzisiejszej wiedzy są nieprawidłowym (tzn. zbyt ubogim) modelem dynamiki. Jednakże ich prostota i skuteczność predykcyjna w ściśle określonych warunkach sprawiają, że żaden rozsądny naukowiec nie będzie próbował wyrugować ich z arsenału modeli współczesnej fizyki. Analogicznie przedstawia się sprawa z modelami eksponencjalnymi — wiemy, że opisują one rozwój nauki tylko „z grubsza”, ale w wielu przypadkach praktycznych model taki jest zupełnie wystarczający.

1.4. Model Taagepery (1957) — system z samozatruwaniem

Interesującym rozwinięciem idei zastosowania modeli przeniesionych z biologii i ekologii jest model sformułowany przez R. Taageperę[45]. Przedstawia on rozwój systemu z „samozatruwaniem”, czyli takiego, którego rozwój powoduje równocześnie gromadzenie czynnika „zatruwającego”, tzn. przeciwdziałającego wzrostowi. Model ten opisywany jest następującym równaniem w postaci znormalizowanej:

$$\frac{dx(t)}{dt} = (1 - x(t))\left(x(t) - \gamma \int_0^t x(s)\, ds\right), \tag{9}$$

gdzie $x(t)$ opisuje wzrost systemu.

Całka pojawiająca się w równaniu modeluje proces gromadzenia czynnika „zatruwającego” (hamującego). Zauważmy, że jeżeli $\gamma = 0$ (brak wpływu „zatruwającego”) to otrzymujemy równanie logistyczne. Z kolei jeśli przyjmiemy $\gamma \neq 0$, to dla małych wartości parametru t (czasu) wpływ czynnika „zatruwającego” jest mały (mała ilość nagromadzonego czynnika), zatem wzrost odbywa się według krzywej logistycznej. Jednak od pewnego momentu wzrost wyhamowuje swe tempo pod wpływem ciągle zwiększającej się wartości całki, a następnie występuje coraz szybszy spadek do zera.

Powstały propozycje wykorzystania tego modelu do opisu pewnych aspektów rozwoju nauki. Wydaje się, że model ten opisuje dobrze zmiany zainteresowania naukowców niektórymi problemami — na początku zainteresowanie szybko rośnie, potem jednak nasyca się, a w końcu, po rozwiązaniu problemu, następuje bardzo szybki spadek zainteresowania daną tematyką.

---

[45] Por. S. M. Kot, *Modelowanie procesów informacyjnych w nauce*, Wyd. Secesja, Kraków 1992, ss. 41–42.

1.5. Model Gompertza (1992) — uogólnienie modelu eksponencjalnego

Model Gompertza może być uważany za pewne rozszerzenie modelu eksponencjalnego. Opisywany jest on następującą zależnością (zmienna x oznacza liczbę opublikowanych prac)[46]:

$$x(t) = da^{b^t}, \qquad gdzie \qquad a > 1,\ b > 1,\ d > 0. \tag{10}$$

Model ten został zastosowany przez L. Egghe i I. K. Rao do modelowania wzrostu literatury z zakresu nauk społecznych (*social sciences*)[47]. Niestety, dalsze badania w tym kierunku przeprowadzone przez zespół pod kierunkiem B. M. Gupty nie potwierdziły przydatności tego modelu dla innego zestawu danych[48]. Z tej racji poświęcamy temu modelowi jedynie krótką wzmiankę.

1.6. Rozszerzony model potęgowy (2002)

W kolejnym modelu wykorzystuje się funkcję potęgową do modelowania wzrostu danego wskaźnika. Model ten można zapisać w postaci następującego równania różniczkowego:

$$\frac{dx(t)}{dt} = at^b, \tag{11}$$

gdzie $a > 0$, $b > 0$.

Po scałkowaniu powyższego rówania otrzymujemy następującą postać rozszerzonego modelu potęgowego (model potęgowy nie zawiera stałej α)[49]:

---

[46] Por. B. M. Gupta, C. R. Karisiddappa, „Modelling the growth of literature in the area of theoretical population genetics", *Scientometrics*, 49 (2000), 335.

[47] L. Egghe, I. K. Rao, „Classification of growth models based on growth rates and its applications", *Scientometrics*, 25 (1992), 5–46.

[48] Por. B. M. Gupta et al., „Modeling the growth of world social science literature", *Scientometrics*, 53 (2002), 161–164.

[49] Por. B. M. Gupta, C. R. Karisiddappa, „Modelling the growth of literature...", s. 337.

$$x(t) = \alpha + \beta t^{\gamma}, \tag{12}$$

gdzie $\alpha > 0$, $\beta > 0$.

W powyższym modelu, jeżeli parametr γ przyjmuje wartości $0 < \gamma < 1$, to dla $t \in [0, \infty)$ funkcja $x(t)$ jest rosnąca i wklęsła, dla $\gamma = 1$ jest rosnącą funkcją liniową. Natomiast w przypadku, gdy $\gamma > 1$ funkcja ta jest rosnąca i wypukła — ten kształt funkcji najlepiej nadaje się do zastosowania w naukometrii.

B. M. Gupta i C. R. Karisiddappa zastosowali wspomniany model do opisu skumulowanego rozwoju liczby publikacji z pewnego działu genetyki. Opisali nim również rozwój skumulowanej liczby nowych autorów w tej dziedzinie[50]. Pokazali oni, że rozszerzony model potęgowy ($\alpha > 0$, $\gamma > 1$) lepiej opisuje badane procesy niż model eksponencjalny, logistyczny i model Gompertza. Bliższa analiza wyników otrzymanych przez tych badaczy pokazuje jednak, że uzyskane różnice między modelem potęgowym a wykładniczym i logistycznym nie są są zbyt duże[51]. Określenie, który z modeli jest najlepszy, ściśle zależy od tego, którym wskaźnikom przypiszemy większe znaczenie (wartości błędu średniokwadratowego, czy parametrowi R^2). Przykład ten pokazuje, jak ważna w procesie modelowania rozwoju nauki jest poprawna interpretacja wyników analizy statystycznej.

1.7. Modele dyfuzyjne (dyfuzji informacji) (1971)

Dwóch naukowców, A. Avramescu z Rumunii i S. M. Kot z Polski, opracowało niezależnie od siebie dyfuzyjne modele rozwoju nauki[52].

[50] Tamże, ss. 339–354.

[51] Por. tamże, ss. 342–349.

[52] A. Avramescu, „Eksploracyjne metody…”, ss. 228n; S. M. Kot, *Modelowanie procesów…*, ss. 46–55. Informacje dotyczące modelu opracowanego przez Avramescu można znaleźć również w: *International Forum on Information and Documentation*, 1 (1975), 13-19. Zobacz również: S. M. Kot, „Rozwój dyscypliny naukowej w świetle statystycznej analizy cytowań”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 16 (1980), 152–169.

Wychodząc od dwóch różnych analogii (Avramescu — procesy wyładowania elektrycznego, Kot — dyfuzja gazów), doszli oni do podobnych modeli, które opisują rozwój nauki jako proces dyfuzji informacji. Z tego względu rozwiązania te będą omawiane łącznie. W niniejszej pracy przedstawiona zostanie wersja S. M. Kota. Wspomniany badacz, kierując się propozycjami Nalimowa, przyjął, że naukę należy badać jako system informacyjny. Kot zaproponował, że system ten może być rozpatrywany na różnych poziomach ogólności. Można więc równie dobrze opisywać naukę jako całość, poszczególne dyscypliny lub poddyscypliny. S. M. Kot przyjął, że dyscypliny będą podstawowymi jednostkami poddanymi badaniom (dają się one efektywnie wyodrębniać i badać).

Każdy system informacyjny można przedstawić jako złożony z dwóch podsystemów: podsystemu generującego informacje S_g oraz podsystemu wiedzy S_w, gdzie gromadzone są wytworzone informacje. Pomiędzy tymi podsystemami zachodzą procesy wymiany, z których proces przesyłania informacji z podsystemu wiedzy do podsytemu generującego nową wiedzę (z S_w do S_g) jest procesem absorpcji. Podsystem generujący absorbuje wiedzę z „zasobu” wiedzy S_w oraz otrzymuje nowe informacje ze społeczno–fizycznego otoczenia systemu. Na podstawie tych danych generuje on nowe informacje, które tworzą strumień nowych wiadomości (informacji) kierowany z powrotem do S_w.

Jeżeli przez D oznaczymy ilość nowych informacji, a przez G ilość informacji wygenerowanej w systemie S_g w chwili t przy wykorzystaniu pewnej informacji początkowej, to możemy następująco opisać wskazane powyżej mechanizmy, jak to uczynił S. M. Kot:

a) absorpcja nowej informacji

$$\frac{dD(t)}{dt} = -\alpha D(t), \tag{13}$$

b) eliminacja informacji (zastępowanie starej informacji przez doskonalszą wersję)

$$\frac{dG(t)}{dt} = -\beta G(t). \tag{14}$$

Cały model dyfuzyjny prezentuje się wówczas następująco:

$$\begin{aligned} \frac{dD(t)}{dt} &= -\alpha D(t), \\ \frac{dG(t)}{dt} &= \alpha D(t) - \beta G(t), \end{aligned} \tag{15}$$

gdzie α i β są stałymi określającymi prędkość dyfuzji i eliminacji informacji z systemu generującego S_g.

Wspomniany autor zaproponował m.in. uwzględnienie dodatkowo ograniczającego wpływu „rozmiaru" dyscypliny naukowej. W tym celu wprowadził pomocniczą funkcję $R_d(t)$, opisującą „wielkość" dyscypliny naukowej w zależności od czasu. W samym modelu dokonano zmiany, wprowadzając zamiast $G(t)$ funkcję:

$$C(t) = \frac{G(t)}{R_d(t)}, \tag{16}$$

która opisuje *względną ilość informacji* wygenerowanej w systemie S_g z wykorzystaniem informacji początkowej. Model dyfuzyjny przyjmuje wówczas nieco inną postać:

$$\begin{aligned} \frac{dD(t)}{dt} &= -\alpha D(t), \\ \frac{dC(t)}{dt} &= \alpha \frac{D(t)}{R_d(t)} - \beta C(t) - C(t)\frac{dR_d(t)}{dt}. \end{aligned} \tag{17}$$

S. M. Kot przeanalizował w swojej pracy[53] dwa przypadki: gdy „wielkość" dyscypliny jest stała ($R_d = const$) lub gdy rośnie eksponencjalnie według zależności $R_d(t) = R_{d_0} e^{\gamma(t-\tau_0)}$. Jak widać w stosunku do pierwotnej wersji modelu, największą zmianą jest zwrócenie uwagi na względną ilość wygenerowanej informacji (zamiast wartości bezwzględnych) i uzależnienie jej również od prędkości zmian „rozmiarów" samej

[53] S. M. Kot, *Modelowanie procesów...*, ss. 46–52.

dyscypliny. W omawianym modelu problematyczne jest pojęcie „rozmiaru” dyscypliny — nie wiadomo czym ten rozmiar jest i jak można go w praktyce mierzyć.

Wspomniany autor zaproponował, na bazie tego modelu, wprowadzenie ciekawego współczynnika, obrazującego charakter badań naukowych[54]. Potraktował on naukę zgodnie z propozycją Kuhna, wyróżniając w jej rozwoju etapy normalne i rewolucyjne. Zinterpretował procesy absorpcji informacji jako odpowiadające stanowi normalnemu (następuje tylko gromadzenie nowych wyników w obrębie danego paradygmatu), natomiast procesy eliminacji jako odpowiadające rewolucyjnym zmianom (usuwanie „przestarzałych” informacji). Miara „normalności” rozwoju nauki może być wówczas zdefiniowana następująco:

$$f = 1 - \frac{\beta}{\alpha}. \qquad (18)$$

Wartość $f = 1$ odpowiada czystej kumulacji (taką wizję postulował D. J. de Solla Price), natomiast $f = 0$ odpowiada sytuacji, gdy absorpcja nowej wiedzy i usuwanie starej przebiegają z tą samą prędkością ($\alpha = \beta$). Tę drugą sytuację można zinterpretować jako rewolucję permanentną, gdzie powstaniu każdej nowej teorii odpowiada „śmierć” teorii starej. Taka wizja rozwoju nauki bywa łączona z nazwiskiem K. R. Poppera. Intuicja podpowiada, że rzeczywisty rozwój nauki powinien plasować się pomiędzy tymi wartościami skrajnymi. Mimo, iż przyjęta interpretacja zakłada pewne uproszczenia, z którymi można by polemizować od strony filozoficznej, niemniej pozostaje ona bardzo ciekawą propozycją, w jaki sposób można próbować od strony ilościowej ujmować pewne jakościowe cechy procesu rozwoju nauki, uznawane dotychczas za wyłączną domenę modeli opisowych.

Kończąc dział poświęcony modelom dyfuzyjnym, warto nadmienić jeszcze, że S. M. Kot zaproponował również model rozwoju nauki przy wyróżnieniu „frontu badań” i badań peryferyjnych (dotyczących głównie systematyzacji i uogólniania zdobytych już wyników). Podział taki

[54] Por. S. M. Kot, *Modelowanie procesów. . .* , s. 52.

postulowany był od dawna przez wielu badaczy, w tym przez historyków nauki[55]. Model różni się od poprzednich tym, że zamiast jednego członu odpowiadającego eliminacji wyników wprowadzone zostały dwa człony: pierwszy, opisujący dystrybucję informacji z systemu peryferyjnego do frontu badań oraz drugi, odpowiadający eliminacji wyników z frontu badań do systemu peryferyjnego. Wszystkie wymienione tu modele poddane zostały testom empirycznym, wykazującym ich przydatność w pewnych zastosowaniach. Trzeba jednak przyznać, że matematyczna struktura tych modeli (liniowa) jest zbyt uboga, by wystarczająco wiernie zamodelować złożone zachowanie rzeczywistego sytemu, jakim jest nauka.

1.8. Zastosowanie modelu Lotki–Volterry („drapieżca–ofiara") (1972)

Model Lotki–Volterry opracowany został pierwotnie dla potrzeb ekologii. Opisywał on dynamikę rozwoju dwóch współzawodniczących gatunków, stąd nazywany jest często modelem „drapieżca–ofiara"[56]. Twórcami tego modelu byli, niezależnie od siebie, amerykański biofizyk Alfred Lotka (1925) i włoski matematyk Vito Volterra (1926)[57].

[55] Dla przykładu można tu wymienić wielokrotnie cytowaną tu pracę D. de Solla Price'a *Mała Nauka — Wielka Nauka*.

[56] W oryginalnym modelu opracowanym przez Lotkę i Volterrę uwzględniono jedynie oddziaływanie międzygatunkowe, w związku z czym jedyny wpływ na liczebność populacji miało zjawisko drapieżnictwa. W rozszerzonym modelu Lotki–Volterry (opisanym w następnym paragrafie) uwzględniono dodatkowo ograniczjący wpływ pojemności środowiska. Dzięki temu model stał się bardziej realistyczny, choć jego podstawowe właściwości nie uległy zasadniczej zmianie.

[57] Por. E. W. Weisstein, *Lotka–Volterra Equations. From MathWorld–A Wolfram Web Resource*, 30.11.2004, <`http://mathworld.wolfram.com/Lotka-VolterraEquations.html`>; Y. Bar–Yam, *Dynamics of complex systems*, Addison–Wesley, Massachusetts 1997, ss. 586–587; A. Sharov, *Lotka-Volterra Model*, 30.11.2004, <`www.ento.vt.edu/~sharov/PopEcol/lec10/predat.html`> oraz P. Sloot, *Lectures of Prof. dr Peter Sloot*, 30.11.2004, <`http://artemis.wszib.edu.pl/~sloot/`>.

Po raz kolejny okazało się, że można wykorzystać analogię pomiędzy rozwojem nauki a zachowaniem organizmów żywych. Stwierdzono bowiem, że zachowanie dwóch teorii z oddziaływaniem informacyjnym przypomina w pewnym sensie rozwój populacji gatunków drapieżników i ofiar znany z ekologii.

Model Lotki–Volterry jest pierwszą próbą opisu rozwoju dwu współzależnych „fragmentów" nauki. Mogą nimi być zarówno poszczególne teorie, jak i całe specjalności, dyscypliny, itd. Podjęto wiele niezależnych prób zastosowania tego układu w naukometrii przy wyborze różnych kryteriów i wskaźników.

Interesującą próbę zastosowania opisywanego modelu podjął niemiecki uczony F. Müller[58]. Badacz ten zajął się problemem ilościowego wzrostu informacji naukowej. Postawił on hipotezę, że dynamikę wzrostu wiedzy można uzasadnić występowaniem mechanizmu „pytanie — odpowiedź". Hipoteza opiera się spostrzeżeniu, że naukowcy w swej pracy stawiają pewne pytania, na które następnie szukają odpowiedzi[59].

W celu zbudowania modelu dynamiki rozwoju wiedzy naukowej Müller podał definicje podstawowych pojęć. Wyróżnił on[60]:

a) *wiadomości aktualne* — wiadomości warte opublikowania lub właśnie publikowane;

b) *wiadomości archiwalne* — wszystkie wiadomości aktualne od momentu powstania danej gałęzi wiedzy;

Prace źródłowe: A. J. Lotka, *Elements of physical biology*, Williams & Wilkins Co., Baltimore, 1925; V. Volterra, *Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi*, Mem. R. Accad. Naz. dei Lincei, Ser. VI, 2 (1926).

[58] F. Müller, „Fortschritt der Wissenschaft — mathematisch modelliert", *Wissenschaft und Fortschritt*, 22 (1972), 162–165; F. Müller, „O pewnej hipotezie postępu naukowego", *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 14 (1978), 158–161.

[59] W piątym rozdziale niniejszej pracy będę starał się wykazać, że w rzeczywistym rozwoju nauki mechanizm ten jest bardziej złożony. Fakt ten poddaje w wątpliwość adekwatność modelu Müllera.

[60] Por. F. Müller, „O pewnej hipotezie...", ss. 158–159.

c) *problemy aktualne* — problemy formułowane jako temat pracy badawczej lub problemy dostarczane z różnych dziedzin życia;

d) *problemy archiwalne* — wszystkie problemy, które kiedyś były aktualne.

Dla danej grupy badaczy przyjęto, że x oznacza ilość informacji o aktualnych wiadomościach, natomiast y — ilość informacji o aktualnych problemach. Zaproponowany przez Müllera model przedstawia się następująco[61]:

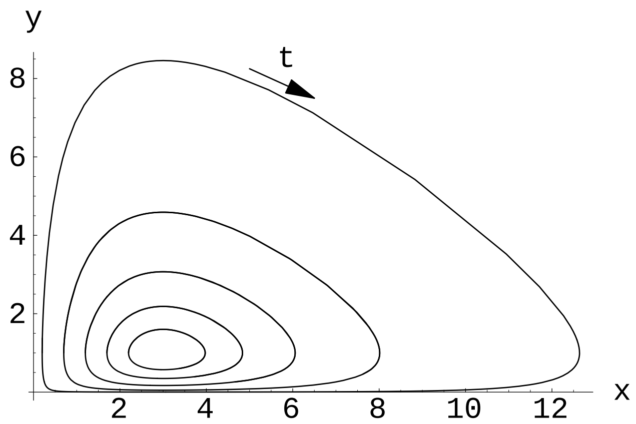
$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -a_1 x + b_1 xy, \\ \frac{dy}{dt} &= a_2 y - b_2 xy, \end{aligned} \tag{19}$$

gdzie stałe spełniają warunki: $a_1 > 0$, $a_2 > 0$, $b_1 > 0$, $b_2 > 0$.

Równania te można zinterpretować w następujący sposób, zaproponowany przez autora. Jeżeli rozpatrywana grupa nie prowadzi badań (tj. $b_1 = 0$, $b_2 = 0$), to z biegiem czasu ilość informacji o wiadomościach aktualnych x powinna maleć, zaś ilość informacji o aktualnych problemach y powinna rosnąć. Zjawisko to modelują pierwsze człony po prawej stronie równań. Według tego modelu brak badań prowadzi do wykładniczego zmniejszania się x oraz do wykładniczego wzrostu y. Wpływ badań modelują człony z iloczynami xy. Przyjęto, że tempo wzrostu liczby aktualnych wiadomości i spadek liczby aktualnych problemów są proporcjonalne do iloczynu tych wielkości[62].

[61] Analizę struktury matematycznej tego modelu można znaleźć np. w pracy: M. Szydłowski, A. Krawiec, „Układy dynamiczne w modelowaniu…”, s. 101.

[62] Zauważmy, że Müller dopuścił się dużej nieścisłości. Poprzez x oraz y oznaczył najpierw *ilość informacji* o aktualnych wiadomościach i problemach, a następnie interpretuje te wielkości jako *liczbę aktualnych wiadomości i problemów*. Problem ten można rozwiązać przyjmując drugą propozycję. W innym przypadku trudno będzie nadać interpretacje członom odpowiadającym wpływowi badań. Od tego momentu przyjmuję w dalszych rozważaniach wspomnianą poprawkę do modelu Müllera.



Rys. 2. Portret fazowy modelu Lotki–Volterry ($a_1 = -1$, $b_1 = 1$, $a_2 = 3$, $b_2 = -1$). Na rysunku zamieszczono trajektorie dla następujących warunków początkowych $x(0) \in \{0.2; 0.7; 1.2; 1.7; 2.2\}$ oraz $y(0) = 1$. Pierwsza od lewej trajektoria odpowiada najmniejszej wartości $x(0)$

W zaproponowanym modelu podstawową trudność przedstawia empiryczne określenie wielkości x i y. Nie wiadomo jak określić jednoznacznie liczbę wiadomości lub problemów. Zwróćmy uwagę, że przyjęta przez Müllera hipoteza rozwoju nauki implikuje mocno uproszczoną i zniekształconą koncepcję nauki. Według niej działalność naukowa polega na zwiększaniu zbioru wiadomości kosztem wyczerpywania zbioru problemów. Implikuje to sytuację, w której badania naukowe powinny systematycznie powiększać obszar wiedzy a zmniejszać obszar niewiedzy. Nawet pobieżny rzut oka na historię rozwoju nauki pokazuje, że jest to koncepcja mocno zniekształcona — podczas badań powstaje więcej pytań, niż odpowiedzi. Poza tym sam proces zdobywania odpowiedzi na postawione pytanie prowadzi najczęściej do modyfikacji pierwotnego pytania. Problemy te zostaną szerzej przedstawione w rozdziale piątym niniejszej pracy. Oba wymienione tu problemy powodują, że rozwiązanie Müllera nie odegrało większej roli w badaniach naukometrycznych. Autor próbował wskazywać, że otrzymywane wyniki są podobne do krzywych produktywności uczonych lub do danych o rozwoju publikacji w USA i ZSRS. Nie została jednak przedstawiona żadna analiza, ani oszacowanie parametrów modelu, w związku z czym trudno ocenić wartość tych porównań.

Niestety sam model Lotki–Volterry posiada również wady, wynikające z jego bardzo prostej struktury matematycznej. Przede wszystkim może opisywać tyko dwa wybrane „fragmenty” nauki, z reguły zachodzą zaś znacznie szersze interakcje[63]. Poważna wada modelu Lotki–Volterry wynika z tego, że nie posiada on asymptotycznej stabilności[64]. Zatem za pomocą tego modelu można uzyskiwać tylko przebiegi okresowe, które nie odpowiadają zjawiskom zachodzącym w rzeczywistym rozwoju nauki. W przykładzie z rywalizującymi teoriami jest to równoznaczne sytuacji, że współzawodnictwo będzie trwać wiecznie, a każda z teorii naprzemiennie będzie uznawana za adekwatną. Sytuacja taka jest całkowicie sprzeczna z przypadkami rywalizacji teorii, jakie podaje historia nauki[65].

1.9. Model Müllera (1972)

F. Müller zaproponował również model, oparty na zaprezentowanym powyżej układzie Lotki–Volterry[66]. Istotą propozycji Müllera było dodanie trzeciego równania, analogicznego do dwóch pozostałych. W ten sposób stworzony został następujący model:

---

[63] Naturalnym krokiem jest rozbudowa modelu Lotki–Volterry poprzez zwiększenie liczby równań, co nie jest zabiegiem zbyt trudnym.

[64] Por. np. A. Sharov, *Lotka–Volterra Model*, 30.11.2004, `<http://www.ento.vt.edu/~sharov/PopEcol/lec10/predat.html>`.

[65] W historii nauki odnajdujemy jedynie takie przykłady współzawodnictwa teorii, które posiadają swe definitywne rozstrzygnięcie. Przypadek teorii konkurujących bez ograniczeń jest więc nierzeczywisty.

Wydaje się natomiast, że pewne koncepcje metafizyczne mogą podlegać współzawodnictu, zbliżonemu do tego, które opisuje model Lotki–Volterry. Temat ten wykracza jednak poza ramy niniejszego opracowania i wymaga gruntownych badań.

[66] F. Müller, „Fortschritt der Wissenschaft. . . ”, ss. 163–165.

$$
\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} &= a_1x_1 + b_1x_1x_2 + c_1x_1x_3, \\
\frac{dx_2}{dt} &= a_2x_2 + b_2x_1x_2 + c_2x_2x_3, \\
\frac{dx_3}{dt} &= a_3x_3 + b_3x_1x_3 + c_1x_2x_3,
\end{aligned}
\tag{20}
$$

gdzie x_1, x_2, x_3 są pewnymi wielkościami charakteryzującymi rozwój pewnego obszaru nauki.

Müller zaproponował dwa sposoby wykorzystania omawianego modelu. Pierwszy polega na tym, że dwie zmienne (x_1, x_2) opisują rozwój współzawodniczących grup badawczych, a trzecia (x_3) — rozwój badanej problematyki. W tym przypadku paramtery a_1, a_2, b_3 i c_3 przyjmują wartości ujemne, a pozostałe parametry — wartości nieujemne.

Drugi sposób wykorzystania prezentowanego modelu polega na tym, że używany jest do opisu rozwoju jednej grupy badawczej (x_1) pracującej nad dwoma zagadnieniami (x_2, x_3). Wówczas przyjmuje się, że paramtery a_1, b_2, b_3 są ujemne, $c_2 = c_3 = 0$, a pozostałe parametry są nieujemne.

Müller przedstawił jedynie numeryczne symulacje rozwiązań powyższego układu równań różniczkowych. Uzyskał on przebiegi okresowe o interesującej charakterystyce: zbocza narastające funkcji są bardziej strome od opadających. Niestety nie została podjęta próba skonfrontowania opisywanego modelu z danymi o rozwoju nauki. Wydaje się jednak, że model ten napotykać może na podobne problemy, jak w przypadku modelu Lotki–Volterry.

1.10. Rozszerzony model Lotki–Volterry (1985)

Rozszerzony model Lotki–Volterry, który uwzględnia efekty związane z ograniczoną pojemnością środowiska, jest drugim z najpopularniejszych modeli stosowanych w ekologii. W modelu tym uwzględniono dwa mechanizmy konkurencji: wewnątrzgatunkowe (rywalizacja o dostęp do zasobów środowiska, analogicznie jak w modelu logistycznym) oraz międzygatunkowe (rywalizacja międzygatunkowa, oddziaływanie drapieżca–ofiara). Bardzo często rozszerzony model Lotki–Volterry myli się z wersją podstawową. Można znaleźć wiele prac, przedstawiających analizę matematyczną tego modelu[67].

Prezentowany model znalazł również liczne znastosowania na gruncie naukometrii. Został on wykorzystany przez M. D. Puzikova i A. E. Kasjanova. Zastosowali oni w 1985 roku wspomniany model do opisu rozwoju nakładów na naukę dla dużych centrów naukowych oraz dla uniwersytetów i innych szkół wyższych w USA[68]. Danymi dla modelu były nakłady finansowe wyrażone w USD. Autorzy wyznaczyli parametry modelu na podstawie danych zbieranych w okresach pięcioletnich w latach 1965–1983. Opisywany model wykazał satysfakcjonującą zbieżność z danymi empirycznymi. Na jego podstawie dokonano predykcji rozwoju nakładów na naukę do roku 1990.

Kolejny z interesujących przykładów wykorzystania rozszerzonego modelu Lotki–Volterry można znaleźć w pracy M. Szydłowskiego i A. Krawca[69]. Wspomniani autorzy podali i przeanalizowali model Lotki–Volterry opisujący rozwój dwóch teorii z oddziaływaniem informacyjnym. Dynamika zmian strumieni informacji pomiędzy dwoma teoriami opisywana jest przez układ dynamiczny postaci:

---

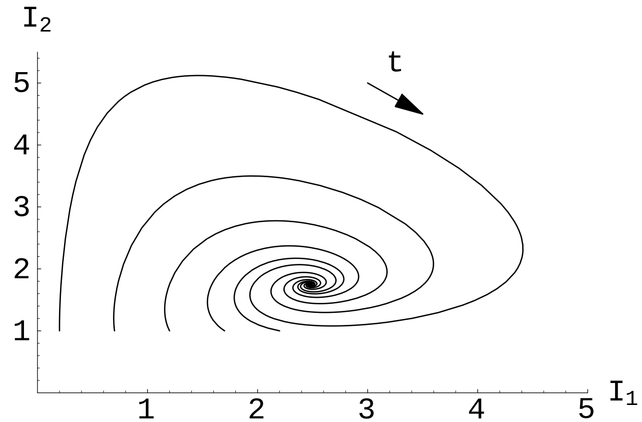
[67] Zob. np. R. Irwin, *The Lotka–Volterra Model of Interspecific Competition*, 30.11.2004, <`http://www.utm.edu/~rirwin/LVComp.htm`>; P. Nardin, *The Lotka–Volterra Equation*, 30.11.2004, <`www.gris.uni-tuebingen.de/projects/dynsys/latex/dissp/node16.html`>. Analizę stabilności omawianego modelu można znaleźć w: S. P. Otto, *Biomathematics Lectures*, 30.11.2004, <`http://www.zoology.ubc.ca/~bio301/Bio301/Lectures.html`>. Przystępną analizę numeryczną można natomiast znaleźć w książce: H. E. Nusse, J. A. Yorke, *Dynamika. Badania numeryczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998, ss. 85–88.

[68] M. D. Puzikov, A. E. Kasjanov, „Quantitative estimation of «Big» and «Little» Science interrelation", *Scientometrics*, 11 (1987), 99–104.

[69] M. Szydłowski, A. Krawiec, „Złożone zachowanie prostych układów nieliniowych", *Filozofia Nauki*, 6 (1998), 80.

$$\begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= a_1 I_1 - b_1 I_1^2 - c_1 I_1 I_2, \\ \frac{dI_2}{dt} &= a_2 I_2 - b_2 I_2^2 - c_2 I_1 I_2, \end{aligned} \tag{21}$$

gdzie I_n oznacza strumień infromacji w n–tej dyscyplinie. W omawianym przypadku model Lotki–Volterry opisuje rozwój dwóch konkurujących ze sobą teorii, opisujących ten sam fragment rzeczywistości. Jak pokazuje matematyczna analiza tego modelu, przyjęcie takiej struktury oddziaływań pozwala układowi ewoluować na kilka charakterystycznych sposobów, np. teorie mogą ze sobą konkurować, uzyskując po kolei przewagę nad sobą. Wydaje się, że niektóre zachowania modelu odpowiadają obserwacjom rozwoju nauki (np. rozwój i upadek pewnych koncepcji kosmologicznych).



Rys. 3. Portret fazowy rozszerzonego modelu Lotki–Volterry ($a_1 = -1$, $b_1 = 1$, $c_1 = -0.3$, $a_2 = 3$, $b_2 = -1$, $c_2 = -0.3$). Na rysunku zamieszczono trajektorie dla następujących warunków początkowych $x(0) \in \{0.2; 0.7; 1.2; 1.7; 2.2\}$ oraz $y(0) = 1$. Pierwsza od lewej trajektoria odpowiada najmniejszej wartości $x(0)$

Zauważmy jeszcze, że rozszerzony model Lotki–Volterry przy odpowiednich wartościach parametrów przechodzi w model logistyczny.

Jeżeli będziemy rozpatrywać tylko jedną teorię (czyli strumień informacji $I_2 = 0$), to z powyższego układu równań otrzymamy równanie:

$$\frac{dI_1}{dt} = a_1 I_1 - b_1 I_1^2, \tag{22}$$

które jest identyczne z drugą postacią modelu logistycznego. Omawiany układ można zatem traktować jako opisujący rozwój dwóch procesów logistycznych, które oddziałują na siebie.

Podsumowując, trzeba stwierdzić, że modele Lotki–Volterry znalazły zastosowania w modelowaniu różnych aspektów rozwoju nauki. Niestety, poza mechanizmem współoddziaływania nie wniosły one jednak nic zasadniczo nowego do poznania mechanizmów rozwoju nauki. Dodatkowo prosta struktura tych układów dynamicznych nie pozwala na realistyczne modelowanie rzeczywistych sytuacji.

Przedstawione w powyższym rozdziale modele rozwoju nauki okazały się zbyt proste, aby opisać rzeczywisty jej rozwój. Dlatego też, począwszy od połowy lat sześćdziesiątych XX wieku, podjęto kolejne próby tworzenia modeli — tym razem o bardziej złożonej dynamice. Przedstawimy je w kolejnym rozdziale.

2. Modele dynamiczne o złożonym zachowaniu

Ewolucja dynamicznych modeli rozwoju nauki postępowała głównie w kierunku modeli o coraz bardziej złożonej dynamice. W niniejszym rozdziale przyjrzymy się im bliżej. Tworzą one trzy klasy: modele epidemiczne, modele ewolucyjne i modele z opóźnionym parametrem.

Istnieją jednak poważne ograniczenia w stosowaniu modeli dynamicznych o złożonym zachowaniu. Podstawowym problemem jest nadmierny wzrost liczby parametrów. Inną kłopotliwą cechą jest brak rozwiązań analitycznych dla tych układów. Największe nadzieje wiąże się obecnie z grupą modeli z opóźnionym parametrem. Posiadają one bowiem bogatą dynamikę, a w kilku ważnych przypadkach istnieją dla nich rozwiązania analityczne. Dodatkowo modele te doczekały się interesujących interpretacji na gruncie ekonomii, które z łatwością można przenieść do naukometrii.

2.1. Modele epidemiczne

Nauka jako epidemia (1964)

Gdy obserwuje się spektakularny rozwój nauki w XX wieku, w sposób naturalny nasuwają się porównania nauki do epidemii, a naukowców do ludzi zarażonych pewnymi ideami.

W. Goffman i V. Newill w artykule[70] z 1964 r., opublikowanym na łamach *Nature*, podjęli tę ideę i wskazali, jak można praktycznie wykorzystać tę analogię w naukometrii. Podali oni zasady, według których należy interpretować rozwój nauki w kategoriach procesu rozprzestrzeniania się epidemii. Zabieg taki był znaczący, ponieważ po wykonaniu jego można było już zastosować istniejące w epidemiologii matematyczne modele rozwoju epidemii do opisu rozwoju nauki. Podejście

[70] W. Goffman, V. A. Newill, „Generalization of epidemic theory. An application to the transmission of ideas”, *Nature*, 204 (1964), 225–228.

było obiecujące, ponieważ omawiane modele zostały wcześniej poddane analizie ze względu na swe pierwotne zastosowanie, tak więc ich struktura matematyczna była już dosyć dobrze znana.

Wspomniani powyżej autorzy zainteresowali się problemem rozprzestrzeniania się idei naukowych jako reprezentatywnego mechanizmu rozwoju nauki. Przyjęli oni, że idee te rozprzestrzeniają się w świecie nauki jedynie poprzez artykuły w czasopismach. Na bazie takiego założenia stworzyli tabelę zawierającą 14 analogii pomiędzy epidemią choroby a nauką oraz podali sposób przełożenia ich na język modeli rozwoju epidemii[71].

Elementy procesu epidemicznego	**Elementy interpretowane w kategoriach:**	
	epidemii choroby zakaźnej	„epidemii” intelektualnej
Żywiciel (*Host*)		
Czynnik (*Agent*)	materiał zarażający	idea
Zarażający (*Infective*)	przypadek chorobowy	autor artykułu
Podatny na zarażenie (*Susceptible*)	osoba, która zarazi się przy efektywnym kontakcie	czytelnik, który zostanie „zarażony” ideą przy efektywnym kontakcie
Usunięty (*Removal*)	śmierć lub nabycie odporności	śmierć badacza lub utrata zainteresowania
Przenosiciel (*Vector*)		
Czynnik (*Agent*)	materiał zarażający (jak dla żywiciela)	idea (jak dla żywiciela)
Zarażający (*Infective*)	przenosiciel zawierający czynnik chorobotwórczy	artykuł zawierający użyteczne idee
Podatny na zarażenie (*Susceptible*)	przenosiciel nie zawierający czynnika chorobotwórczego	wszystkie artykuły zawierające potencjalnie użyteczne idee
Usunięty (*Removal*)	śmierć	zniszczenie lub zagubienie

Tabela 1. Analogie pomiędzy procesem epidemicznym a rozwojem nauki

Jak widać z powyższego zestawienia, przeczytanie wartościowego artykułu (tj. zawierającego inspirujące idee) traktowane jest jako „zachorowanie”, natomiast autor tegoż artykułu jest „zarażającym”. Nośnikami „czynnika epidemicznego” (czyli w naszym wypadku idei) uczyniono artykuły naukowe. Goffman i Newill zauważyli, że biorąc pod uwagę strukturę, epidemie biologiczna i intelektualna mogą być rozważane

[71] W. Goffman, V. A. Newill, „Generalization of Epidemic Theory…”, s. 225.

jako przypadki szczególne ogólnego procesu[72], przyznali jednak, iż istnieją poważne różnice między tymi dwoma przypadkami. Najważniejsza różnica z tego punktu widzenia polega na odmiennej naturze materiału zarażającego. W przypadku epidemii choroby zakażona jednostka wytwarza bowiem materiał zakaźny bardzo zbliżony do tego, który ją zakaził. Mogą tam występować jedynie niewielkie mutacje. Natomiast w przypadku epidemii intelektualnej sprawa wygląda całkiem inaczej: idea, która zainspirowała (tj. „zakaziła") danego badacza może być znacząco różna od tej, która jest wynikiem tej inspiracji. Autorzy uznali jednak, że nie przeszkadza to w traktowaniu rozwoju nauki jako procesu epidemicznego. Można domyślać się, że oba procesy różni jedynie sama ewolucja materiału zarażającego. W przypadku ewolucji idei na każdym jej etapie dochodzi do bardziej radykalnych zmian niż w ewolucji biologicznej.

W analizie epidemii uwzględnia się jeszcze jeden czynnik, zwany okresem inkubacji (*latency period*). Oznacza on, że skutki kontaktu z materiałem zarażającym ujawniają się po upływie pewnego czasu. W nauce zachodzi analogiczne zjawisko: naukowcy potrzebują pewnego czasu na przeczytanie nowego artykułu, przemyślenie go, stworzenie własnych idei i systematyczne opracowanie ich. Następnie należy doliczyć czas potrzebny na napisanie artykułu i opublikowanie go. W sumie jest to okres nie mniejszy niż pół roku, tyle bowiem wynosi średnio okres publikacji w czasopiśmie naukowym. Niestety, w modelach epidemicznych zastosowanych w naukometrii czyniono założenie, że czas ten jest równy zeru (zapewne ze względu na znaczące uproszczenie obliczeń). W ten sposób z zakresu badań na pewnien czas została wyłączona klasa układów mogących dawać potencjalnie bardzo złożone zachowanie konieczne do realistycznego modelowania. Modele takie są bardzo ważne, zajmiemy się więc nimi w dalszej części pracy jako odrębną grupą.

Wracając do pracy Goffmana i Newilla trzeba zaznaczyć, że bazując na podanych regułach „tłumaczenia" ułożyli oni układ równań mode-

[72] Por. tamże, s. 226.

lujący rozwój nauki. Przyjęli za podstawę analizy dziedzinę nauki F (*Field*), w której można wydzielić specjalności rozwijające się epidemicznie D (*Disciplines*). Następnie oznaczyli przez N grupę autorów, którzy w chwili t opublikowali przynajmniej jedną pracę z dziedziny F, natomiast przez I (*Infectives*) zbiór autorów, którzy w chwili t opublikowali artykuł dotyczący specjalności D. Przez S (*Susceptibles*) oznaczony został zbiór „podejrzanych" — autorów, którzy opublikowali pracę z dziedziny F ale z dyscypliny różnej od D). Natomiast R oznaczało usuniętych (*Removals*), czyli badaczy, którzy z jakiegokolwiek powodu zrezygnowali z zajmowania się dziedziną F. Zachodzi zatem następująca relacja pomiędzy liczbami autorów:

$$N = S + I + R. \tag{23}$$

Analogicznie przyjęto oznaczenia dla „nośników epidemii": N' na oznaczenie w chwili t liczby wszystkich artykułów opublikowanych w dziedzinie F, I' — liczby artykułów napisanych przez autorów z grupy I oraz S' — liczby artykułów napisanych przez autorów z grupy S. Zachodzi wówczas następująca zależność między liczbami artykułów[73]:

$$N' = S' + I' + R'. \tag{24}$$

[73] Dla uproszczenia zapisu przyjęto te same oznaczenia dla grup i liczby ich elementów. Nie wpływa to na strukturę matematyczną, a dodane komentarze powinny usunąć wszystkie potencjalne niejednoznaczności.

Goffmann i Newill zaproponowali następujący epidemiczny model rozprzestrzeniania się idei naukowych:

$$
\begin{aligned}
\frac{dS}{dt} &= -\beta S\, I' - \delta S + \mu, \\
\frac{dI}{dt} &= \beta S\, I' - \gamma I + \nu, \\
\frac{dR}{dt} &= \gamma I + \delta S, \\
\frac{dS'}{dt} &= -\beta' S' I - \delta S' + \mu', \\
\frac{dI'}{dt} &= \beta' S' I - \gamma' I' + \nu', \\
\frac{dR'}{dt} &= \gamma' I' + \delta' S'.
\end{aligned}
\tag{25}
$$

Współczynniki tego modelu posiadają następującą interpretację: β oznacza prędkość zarażania podatnej populacji S nową ideą (migracja z S do I), γ — prędkość odchodzenia naukowców od danego tematu (przejścia z grupy I do R), natomiast δ — prędkość odchodzenia naukowców z grupy potencjalnie zainteresowanych do „obojętnych" na nową ideę (migracja z S do R). Dwa kolejne współczynniki opisują prędkość przybywania nowych autorów: μ w całej dziedzinie F, natomiast ν tylko do danej specjalności D. Współczynniki z indeksami prim oznaczają analogiczne wielkości w odniesieniu do artykułów.

Analiza modelu epidemicznego pokazuje, jaki jest warunek konieczny wystąpienia epidemii (tutaj: rozwoju nauki). Jeśli przyjąć oznaczenia: $\varrho = \frac{\gamma - \nu}{\beta}$ oraz $\varrho' = \frac{\gamma' - \nu'}{\beta'}$, a za S_0 liczbę autorów w grupie S w chwili początkowej t_0, to warunek ten przybiera postać: $S_0 S_0' > \varrho\varrho'$. Analiza pokazuje również, że przy rozwoju epidemii liczba zainfekowanych będzie rosnąć wraz z czasem do nieskończoności, co jest sprzeczne z rzeczywistymi możliwościami rozwojowymi procesu.

Jak widać, przedstawiony model opisuje dosyć złożone interakcje towarzyszące procesowi rozwoju idei naukowych. Przypatrując się jednak postaci podanych równań można dostrzec, że są one budowane na podobnej zasadzie, jak równania modelu Lotki–Volterry — występują tam zależności proporcjonalne do danej wielkości lub do iloczynu dwóch wielkości — można więc model epidemiczny traktować od strony struktury jako kolejny krok w kierunku rozbudowy układu Lotki–Volterry.

Wadą przedstawionego tu modelu jest jego stosunkowo duże skomplikowanie, ponieważ występuje w nim aż 10 stałych. Rozwiązanie analityczne takiego układu jest niemożliwe, a w związku z tym estymacja parametrów jest niesłychanie kłopotliwa. Ponadto, tak bogaty układ opisuje tylko rozwój jednej specjalności, w dodatku z pewnymi nierealistycznymi cechami, nie jest to więc propozycja nazbyt interesująca i nie doczekała się próby konfrontacji z doświadczeniem.

Model Goffmana (1966)

Dwa lata później W. Goffman podał propozycję kolejnego modelu epidemicznego[74]. Może być on traktowany jako uproszczenie modelu podanego uprzednio. Tym razem poddany został konfrontacji z doświadczeniem. Okazało się, że taki model, choć prostszy, nadaje się o wiele lepiej do praktycznego zastosowania — występują mniejsze problemy z estymacją parametrów, a predykcje wykazują zgodność z danymi obserwowanymi w rzeczywistym rozwoju. Oto model podany przez Goffmana w 1966 roku:

[74] W. Goffman, „Mathematical Approach to the Spread of Scientific Ideas — The History of Mast Cell Research”, *Nature*, 212 (1966), 449–452 oraz W. Goffman, „A mathematical method for analyzing the growth of a scientific discipline”, *Journal of the Association for Computing Machinery*, 18 (1971), 173–185. Zob. również: T. M. Pietrowa, „Modele matematyczne dziedziny badania naukowego”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 11 (1975), 129–142.

$$
\begin{aligned}
\frac{dS}{dt} &= -\beta S\ I - \delta S\ + \mu, \\
\frac{dI}{dt} &= \beta S\ I - \gamma I\ + \nu, \\
\frac{dR}{dt} &= \delta S\ + \gamma I\ .
\end{aligned}
\tag{26}
$$

Użyte tu oznaczenia są takie same, jak w poprzednim modelu. Analogicznie do poprzedniego przypadku, analiza matematyczna wskazuje, że epidemia intelektualna może się rozwijać, gdy liczba potencjalnych zainteresowanych przekracza w chwili początkowej t_0 liczbę $S_0 > \varrho$, gdzie $\varrho = \frac{\gamma - \nu/I_0}{\beta}$. Natomiast zmienna I_0 oznacza liczbę „zainfekowanych" w chwili t_0.

Model ten został zastosowany do opisu rozwoju literatury dotyczącej badań nad mastocytami (komórkami tucznymi) w okresie 1878–1963. Ogólna liczba publikacji na ten temat obejmowała 2282 pozycji. Goffman wybrał dane z lat 1953, 1958, 1963 i wyznaczył wartości stałych modelu. Otrzymany w ten sposób model pozwalał uzyskać pewne predykcje oraz przewidzieć wystąpienie maksimum rozwoju tej „epidemii" (co miało przypaść na rok 1978). Analizę stabilności tego modelu przeprowadził M. Kochen[75].

W. Goffman podjął również próbę zastosowania modelu epidemicznego do analizy rozwoju logiki formalnej[76]. Autor ten pokazał, że możliwe jest przybliżone rozwiązanie równań epidemicznych i estymacja parametrów β, γ, δ. Goffman dokonał estymacji wspomnianych parametrów dla czterech wybranych dziedzin. Wskazał on również, bazując na przyjętym modelu, jakie są warunki konieczne, aby analizowane dziedziny znajdowały się w stanie rozwoju epidemicznego.

---

[75] M. Kochen, „Stability in the growth of knowledge", *American Documentation*, 20 (1969), 186–197.

[76] W. Goffman, „A mathematical method for analyzing…", ss. 175–183.

Model Goffmana odegrał znaczącą rolę w rozwoju naukometrii. Jest on szeroko cytowany w literaturze i zainspirował liczne badania (patrz np. modele M. Nowakowskiej).

Model Daleya (1967) i Nowakowskiej (1971)

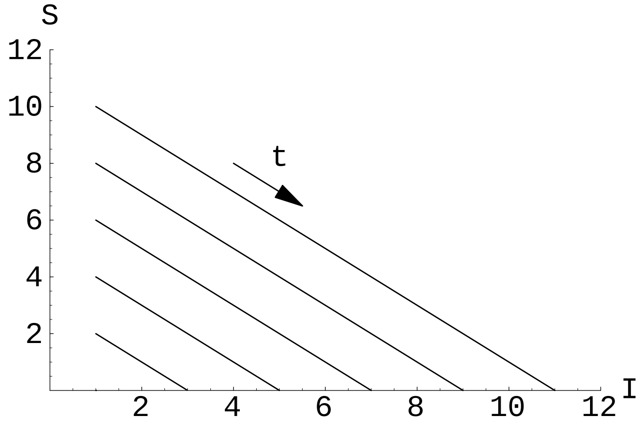
Opierając się na analogiach pomiędzy epidemią choroby a nauką, D. Daley próbował modelować epidemiczne rozprzestrzenianie się plotki w społeczeństwie[77]. Wziął on pod uwagę bardzo uproszczoną wersję modelu epidemicznego zakładając, że proces ten przebiega bez zapominania, tj. przyjmuje się, że osoba, która raz usłyszała plotkę, będzie ją ciągle pamiętać i traktowana jest już zawsze jako „zainfekowana". W języku modeli epidemicznych można powiedzieć, że założenie to oznacza, iż nie ma mechanizmu usuwania osobników z grupy zarażających bądź to z powodu wyleczenia (tutaj — zapominania), bądź śmierci (brak grupy *Removals*). Odpowiada to przyjęciu w modelu Goffmana zerowych wartości stałych δ, γ. Wartości stałych μ i ν są nieistotne z punktu widzenia naszych rozważań, można więc również przyjąć, że są równe zeru. Model Daleya daje się wówczas zapisać następująco:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\beta SI, \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI. \end{aligned} \tag{27}$$

Interpretacja wielkości jest następująca: S oznacza liczbę osobników, którzy jeszcze nie usłyszeli plotki, natomiast I oznacza tych, którzy już ją znają (i mogą ją przekazywać dalej). Stała β jest współczynnikiem

[77] D. J. Daley, „Concerning the spread of news in a population of individuals who never forget", *Bulletin on Mathematica Biophysics*, 29 (1967), 373–376. Prezentowany model, ze względu na prostotę (regularność) swoich rozwiązań, powinien znaleźć się we wcześniejszym rozdziale. Proweniencja modelu zadecydowała jednak o tym, że znalazł się on w grupie modeli epidemicznych, jako wyjątkowy przedstawiciel tej rodziny.

opisującym prędkość „zachorowań”, czyli odzwiercielda prędkość rozprzestrzeniania się plotki w społeczeństwie. W modelu przyjmuje się dodatkowo upraszczające założenie mówiące, że liczba członków społeczności jest stała, czyli $S + I = N = const$.



Rys. 4. Portret fazowy modelu Daleya i Nowakowskiej ($\beta = 2$, warunki początkowe: $I_0 = 1$, $S_0 \in \{2, 4, 6, 8, 10\}$). Zauważmy, że w miarę rozprzestrzeniania się plotki (liczba I rośnie) maleje liczba tych, którzy nie słyszeli plotki (liczba S). W końcu układ zawsze osiągnie stan ustalony $S = 0$ (wszyscy usłyszeli plotkę)

Model ten wykazuje nadzwyczaj proste zachowanie: w każdym przypadku liczba podatnych na „zarażenie” dąży do zera, ponieważ wszyscy stają się „zarażającymi”. Pomimo ogromnej prostoty tego modelu M. Nowakowska podjęła próbę zastosowania go na gruncie badań naukometrycznych. Zaproponowała ona sposób wykorzystania modelu do opisu rozwoju liczby publikacji z uwzględnieniem zjawiska wyczerpywania tematyki[78].

Model przedstawiony przez Nowakowską[79] opisywany jest poprzez równania różnicowe. Różnią się one tym od równań różniczkowych, że

[78] Jest to zjawisko analogiczne do zmniejszania liczby S podantych na ”plotkę” w modelu Daleya.

[79] M. Nowakowska, „Epidemiczne rozprzestrzenianie się wytworów naukowych (próba empirycznego ujęcia niektórych problemów socjologii nauki)”, *Zagadnienia*

zamiast różniczki $\frac{dx}{dt}$ brany jest iloraz $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ bardzo małych, ale skończonych wartości różnicowych[80]. Z równań różnicowych korzystamy w praktyce obliczeń numerycznych, ponieważ w arytmetyce komputerowej operujemy zawsze wielkościami skończonymi (tutaj: skończenie małymi). Równania różnicowe nadają się bardzo dobrze do opisu procesów, w których pomiary dokonywane są tylko w pewnych punktach czasu (dyskretyzacja czasu)[81].

W naukometrii układy różnicowe mają niezwykle szerokie zastosowanie praktyczne ze względu na charakter dostępnych danych: liczba publikacji, liczba pracowników naukowych i nakłady na badania są określane zwykle na okres jednego roku i w większości rzeczywistych przypadków jest to nieprzekraczalne ograniczenie. Ponadto analizowane modele nie posiadają rozwiązań analitycznych, więc pozostaje jedynie numeryczne badanie zachowań równań różnicowych, które je przybliżają. Równania różnicowe umożliwiają także prosty zapis pewnych operacji, które niekiedy są niezwykle trudne do opisania poprzez układy ciągłe. W interesującym nas przypadku chodzi tu przede wszystkim o modelowanie różnych sprzężeń zwrotnych.

Model Daleya, zaadaptowany przez Nowakowską, można zapisać w następujący sposób, przy użyciu formalizmu równań różnicowych:

$$x_{t+1} = bx_t(N - \sum_{i=1}^{t} x_t), \qquad b, N = const. \tag{28}$$

Naukoznawstwa, 7 (1971), 318–345 oraz M. Nowakowska, „Mikroparadygmaty, symulacje, prognozy. Dalsze rozwinięcie teorii epidemicznego rozprzestrzeniania się wytworów naukowych”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 9 (1973), 29–42.

80 Przyjmujemy oznaczenia: $\Delta x = x(t_2) - x(t_1)$ oraz $\Delta t = t_2 - t_1$, gdzie $t_2 > t_1$.

81 Trzeba przyznać, że każdy rzeczywisty proces, który mierzymy, staje się dla nas procesem dyskretnym. Wpływa na to sam proces pomiaru, w którym trzeba uwzględniać wpływ rozdzielczości przyrządów i ich budowy (np. przetworniki próbkujące) oraz konieczne zaokrąglenia. Trzeba sobie uświadomić, że w wyniku pomiaru otrzymujemy pewien przedział wartości (im jest on węższy, tym dokładniejszy pomiar), z którego w pewien arbitralny sposób wybieramy jedną wartość (np. znajdującą się w środku przedziału).

W zapisie tym x_t odpowiada wartości zmiennej x w chwili t. Parametr t, odpowiadający czasowi, jest zdyskretyzowany, czyli przyjmuje jedynie wartości całkowite ($t = 0, 1, 2, \ldots$). Zakłada się, że przyjęcie dyskretnego czasu odpowiada dokonywaniu pomiarów w kolejnych, równoodalonych od siebie chwilach. W przypadku naszego modelu odstępy te wynoszą 1 rok, a parametr t numeruje kolejne lata, dla których rozważamy stan modelowanego aspektu nauki. Wartość x_{t+1} jest następna w stosunku do x_t. Zauważmy, że powyższe równanie różnicowe opisuje, w jaki sposób kolejna wartość zmiennej x zależy od poprzednich wartości. W naszym przypadku można powiedzieć, że podane równanie opisuje, w jaki sposób przyszły stan nauki zależy od wszystkich poprzedzających go stanów.

W opisywanym modelu należy zinterpretować jeszcze znaczenie poszczególnych członów równania: x_t odpowiada liczbie prac dotąd opublikowanych, b oznacza wpływ tej liczby na przyszłą (kolejną) liczbę publikacji. Z kolei człon $N-\sum_{i=1}^{t} x_t$ został przez Nowakowską zinterpretowany jako „stopień wyczerpania problemu”, w języku teorii epidemii odpowiada to liczebności grupy „podatnych na zainfekowanie” (*Susceptibles*). Parametr N odpowiada wówczas liczbie prac, które muszą się ukazać, aby problem został wyczerpany.

Nowakowska wskazała, że zaproponowany model nadaje się w praktyce do modelowania rozwoju problemów naukowych. Do testów empirycznych wykorzystała ona dane bibliograficzne odnośnie publikacji o testach Wechslera (w latach 1939–1960), teorii gier (1928–1956) i teorii pomiaru (1920–1961). Udało się wykonać estymacje parametrów b oraz N i dopasować krzywe. Opisują one dobrze trend rozwojowy, ale pomijają występujące fluktuacje. Nowakowska przeprowadziła również próbę możliwości predykcyjnych tego modelu. W tym celu wybrała ona bibliografię testów Wechslera i przyjęła, że dane z lat 1939–1951 stanowić będą bazę do wykonania estymacji parametrów modelu. Następnie estymowane wartości wstawiono do modelu i zbadano jego przebieg dla odcinka 1952–1959 i porównano z danymi zmierzonymi. Dla przykładu oszacowana liczba N zawierała się w granicach od 1400 do 2000 prac.

Model ten dobrze opisał występowanie maksimum i dał dosyć dobre predykcje w okresie do 8 lat. Niestety trzeba przyznać, że wyniki te nie są do końca miarodajne, ponieważ przyjęto dosyć specyficzny przedział czasu, który kończy się dokładnie w punkcie wystąpienia maksimum.

Warto zwrócić tutaj uwagę, iż parametr N (liczba prac wyczerpujących tematykę) jest niemierzalny *a priori*, tzn. przed ostatecznym wyczerpaniem tematyki, bowiem tylko wówczas jesteśmy w stanie odpowiedzieć na pytanie ile prac było potrzebnych, aby tego dokonać. Wydaje się, że nie istnieje inna możliwość rozwiązania tego problemu. Model ten jest więc problematyczny, bowiem daje się go stosować tylko wtedy, gdy badany proces już się zakończył (czyli *ex post*). Z drugiej strony taki proces jest w gruncie rzeczy mało interesujący, można badać jego historię, ale w praktyce najbardziej potrzebujemy dokonywać predykcji z obecnego stanu nauki i stan obecny ma dla nas największe znaczenie poznawcze. Po tej linii szła główna krytyka modelu Nowakowskiej. Istnieje jednak interesujące rozwiązanie: bazując na obecnym stanie rozwoju modelowanego aspektu nauki, możemy dokonać estymacji parametrów modelu. W skrócie można powiedzieć, że estymacja parametrów jest narzędziem matematycznym, pozwalającym na znalezienie *statystycznie najlepszego* dopasowania modelu do posiadanych danych.

Rozwiązanie to niesie za sobą interesujące implikacje filozoficzne: okazuje się, że możemy na podstawie dotychczasowej historii rozwoju określić, jakie będą statystycznie najlepsze wartości parametrów, aby model jak najlepiej (oczywiście również w sensie statystycznym) modelował rzeczywistość. Jeżeli dokonalibyśmy np. estymacji N na podstawie obecnego stanu rozwoju danej problematyki, to wartość ta będzie miała następującą interpretację: jest to oczekiwana liczba prac, które muszą się ukazać, aby wyczerpać tematykę przy założeniu, że rozwój będzie postępował dokładnie tak samo, jak do tej pory. Jak widzimy, dzięki teorii estymacji jest możliwe wyznaczenie wartości paramteru N, który jest niemierzalny (czyli nieempiryczny) w chwili, gdy tematyka wciąż się rozwija. Zmusza to jednak do przyjęcia dwu mocnych założeń. Po pierwsze, przyjmujemy statystyczną zgodność wyników, a po drugie zakładamy, że wszystkie istotne zjawiska w rozwoju nauki wydarzyły się do tej pory. Pierwsze z założeń było przedmiotem burzliwej dyskusji filozoficznej od momentu powstania termodynamiki gazów w XIX w. Przyjrzyjmy się zatem drugiemu — mówi ono, że przyjmujemy, iż badamy naukę *ex post* począwszy od chwili obecnej. Następnie przyjmujemy, że wyciągnięte stąd wnioski można rozciągnąć w przyszłość. Jest to równoznaczne z założeniem, że w przyszłości nie wystąpi już żaden istotnie nowy mechanizm, czyli dotychczasowy rozwój nauki pozwala na identyfikację wszystkich(!) istotnych mechanizmów jej rozwoju. Jednocześnie istotne mechanizmy rozwoju nauki są tymi, które decydują o rozwoju i jego kształcie[82], zatem stanowią istotę tego rozwoju! Reasumując, przyjęte założenie każe traktować arbitralnie wybrany fragment historii rozwoju procesu, jako zawierający informacje o całej istocie tego rozwoju. Można bardzo prosto pokazać, że założenie to nie zawsze jest spełnione[83].

Model Nowakowskiej (1971)

Maria Nowakowska podała również oryginalny model naukometryczny, oparty na modelach epidemicznych[84]. Opisuje on zależności pomiędzy następującymi rodzajami zmiennych: liczbą publikacji x na dany temat, liczbą naukowców u zajmujących się tą tematyką, liczbą nowych nazwisk w publikacjach n oraz liczbą publikacji nowych autorów z. Dodatkowo przyjęto oznaczenie u^0 dla liczby naukowców

[82] Mam tu na myśli jedynie takie mechanizmy, które daje się opisywać ilościowo, bo tylko one mogą być użyte w modelach dynamicznych. Pokazuje to od razu ograniczenie wniosków czerpanych z modeli dynamicznych dla dyskusji filozoficznej.

[83] Dla przykładu weźmy proces, w którym kolejna wartość zależy od wartości aktualnej i wartości poprzedzającej ją o 100 przedziałów czasowych. Przykładowy model takiego procesu można zapisać następująco: $x_{t+1} = \alpha x_t + \beta x_{t-100}$. Dla każdej historii rozwoju krótszej niż 100 punktów nie możemy rozstrzygnąć, czy wskazany model pasuje do posiadanych danych.

[84] Por. M. Nowakowska, „Epidemiczne rozprzestrzenianie się wytworów naukowych…”, ss. 333–340.

pracujących nad danym zagadnieniem, którzy nie opublikowali do danej chwili żadnej pracy na ten temat. Odpowiednie równania różnicowe przedstawiają się następująco:

$$
\begin{aligned}
u_{t+1} &= (1-a)u_t + cx_t, \\
x_{t+1} &= [1-(1-b)^{u_t}](N - \sum_{i=1}^{t} x_t), \\
u^0_{t+1} &= (1-a)(u^0_t - n_{t+1}) + cx_t, \\
z_{t+1} &= x_{t+1}\frac{u^0_t}{u_t}, \\
n_{t+1} &= [1-(1-\frac{1}{u^0_t})^{z_{t+1}}]u^0_t, \qquad (u^0_t > 0).
\end{aligned} \tag{29}
$$

Parametry modelu można zinterpretować następująco: a jest prędkością ubywania naukowców pracujących w danej dziedzinie, b — prawdopodobieństwem rozwiązania danego podproblemu przez naukowca w jednostce czasu, c — współczynnikiem atrakcyjności problematyki, natomiast N — łączną liczbą podproblemów. Bardzo dokładną interpretację modelu i wytłumaczenie jego elementów składowych można znaleźć w pierwszej pracy Nowakowskiej[85].

Nowakowska pokazała również, w jaki sposób można prezentowany model poddać testom na materiale dotyczącym rozwoju teorii gier. Niestety, procedura estymacyjna była zbyt skomplikowana i nie dokonano wyznaczenia parametrów modelu. Przeprowadzono natomiast symulacje dla wybranych arbitralnie wartości parametrów i wskazano, że otrzymywane trajektorie są w pewnym sensie podobne do zgromadzonych danych o rozwoju teorii gier. Przy pomocy symulacji numerycznych przeprowadzonych na tym modelu pokazano również możliwości sterowania procesem rozwoju tematyki poprzez sztuczną (arbitralną) zmianę liczby naukowców zajmujących się danym zagadnieniem. Pokazano, że można sterować procesem wyczerpywania się tematyki. Nowakowska

[85] M. Nowakowska, „Epidemiczne rozprzestrzenianie się. . . ”, ss. 333–338.

stwierdziła, że opisany proces może modelować rzeczywistą sytuację ustalania planu badań na dany okres w instytucji badawczej. Model ten, prawdopodobnie ze względu na zbyt skomplikowaną strukturę przy nieproporcjonalnie małej mocy predykcyjnej, nie znalazł dalszych zastosowań. Problematyczne są również niektóre parametry modelu, mające bardzo trudno formalizowalne interpretacje, jak np. współczynnik atrakcyjności problematyki. Znajdujemy również parametry budzące wątpliwości, jak np. liczba podproblemów, co do której wydaje się, że jest ona mocno zależna od przyjętego kryterium podziału i jako silnie konwencjonalna nie może być wprost przekładana na absolutne wartości (liczba podproblemów może się bowiem znacznie zmieniać, gdy przyjmiemy różne kryteria podziału).

Model Nowakowskiej (1977)

Maria Nowakowska opracowała jeszcze jeden model naukometryczny, bazujący w pewnym stopniu na dwu poprzednich. Został on przestawiony w książce *Teoria badań. Ujęcie modelowe*[86]. Poszerzona analiza tego modelu została zaprezentowana w artykule[87], opublikowanym w 1981 r. w czasopiśmie *Science of Science*. Trudno tu mówić o bezpośrednich inspiracjach modelami epidemicznymi, niemniej model ten ze względu na swą strukturę ma wiele wspólnego z tą klasą modeli.

W modelu Nowakowskiej występują trzy wielkości zmienne: $u(t)$ oznacza liczbę naukowców pracujących w chwili t nad pewną problematyką, $N(t)$ — liczbę problemów postawionych i nierozwiązanych w chwili t, natomiast $X(t)$ jest liczbą publikacji, które ukazały się do chwili t. Zaproponowany model ma postać:

---

[86] M. Nowakowska, *Teoria badań. Ujęcie modelowe*, PWN, Warszawa 1977.

[87] M. Nowakowska, „Epidemical models of the development of science”, *Science of Science*, 2 (1981), 321–338.

$$\begin{aligned} \frac{du(t)}{dt} &= \alpha N(t) - \beta u(t) + \varphi, \\ \frac{dN(t)}{dt} &= \left(\gamma e^{-\delta X(t)} - 1\right) \frac{dX(t)}{dt}, \\ \frac{dX(t)}{dt} &= N(t)\left(1 - e^{-\varepsilon \frac{u(t)}{N(t)+X(t)}}\right), \end{aligned} \tag{30}$$

gdzie stałe mają następującą interpretację:

α — przeciętna liczba nowych uczonych, pojawiających się w jednostce czasu,

β — stopa ubytku uczonych,

γ — średnia liczba problemów stawianych przez jedną publikację w początkowym okresie rozwoju w danej dyscyplinie,

δ — stopień wzrostu trudności znajdowania coraz to nowych problemów w trakcie rozwoju dziedziny,

ε — ogólna trudność problematyki.

Model ten jest jeszcze bardziej skomplikowany niż poprzednie, wymaga estymacji aż pięciu parametrów i niestety operuje jeszcze większą liczbą wielkości, których interpretacje budzą silne wątpliwości (zwłaszcza jeśli chodzi o możliwość praktycznego określenia ich wartości). Model ten nie znalazł zastosowań w naukometrii, sama autorka wyraziła nawet wątpliwość co do możliwości predykcyjnych opisywanego modelu. We wspomnianym artykule Nowakowska próbowała pokazać, że model zgadza się jakościowo z obserwowanym rozwojem nauki, trudno jednak ocenić adekwatność takiego opisu.

Rolę tego modelu autorka widzi natomiast „raczej jako źródło intuicji dla formułowania praw rządzących rozwojem dziedzin naukowych”[88]. Jednak nawet i ta funkcja wydaje się wątpliwa, ponieważ jeżeli nie wiemy, czy model odpowiada rzeczywistemu rozwojowi nauki, to nie wiemy również, czy tworzone intuicje mają jakąkolwiek wartość.

[88] M. Nowakowska, *Teoria badań...*, s. 60.

Dwa ostatnie modele Nowakowskiej nie zyskały zastosowań praktycznych, zostały natomiast poddane krytyce, m.in. przez S. M. Kota[89].

Rozszerzenie modelu Nowakowskiej (1981)

Maria Nowakowska zaproponowała również rozszerzoną wersję opisywanego poprzednio modelu[90]. Rozszerzenie ma na celu opis rozwoju kilku dyscyplin. Nowakowska podała jedynie postać równań dla przypadku dwóch dziedzin. Prezentują się one następująco[91]:

$$
\begin{aligned}
\frac{du_1(t)}{dt} &= \alpha_1 N_1(t) - \beta_1 u_1(t) + (\eta_{21} + \nu_{21} N_1) u_2(t) + \varphi_1, \\
\frac{du_2(t)}{dt} &= \alpha_2 N_2(t) - \beta_2 u_2(t) + (\eta_{12} + \nu_{12} N_2) u_1(t) + \varphi_2, \\
\frac{dN_1(t)}{dt} &= \left(\gamma_1 e^{-\delta_1 X_1(t)} + \varrho_2 X_2(t) - 1\right) \frac{dX_1(t)}{dt}, \\
\frac{dN_2(t)}{dt} &= \left(\gamma_2 e^{-\delta_2 X_2(t)} + \varrho_1 X_1(t) - 1\right) \frac{dX_2(t)}{dt}, \\
\frac{dX_1(t)}{dt} &= N_1(t) \left(1 - e^{-\varepsilon_1 \frac{1}{1+X_1(t)/N_1(t) - \xi_2 X_2(t)} \cdot \frac{u_1(t)}{N_1(t)}}\right), \\
\frac{dX_2(t)}{dt} &= N_2(t) \left(1 - e^{-\varepsilon_2 \frac{1}{1+X_2(t)/N_2(t) - \xi_1 X_1(t)} \cdot \frac{u_1(t)}{N_1(t)}}\right).
\end{aligned}
\tag{31}
$$

[89] Por. S. M. Kot, *Modelowanie procesów informacyjnych w nauce*, Secesja, Kraków 1992, s. 39.

[90] M. Nowakowska, „Epidemical models of the development of science”, *Science of Science*, 2 (1981), 332–335.

[91] We wzorach dotyczących omawianego modelu w cytowanej pracy M. Nowakowskiej znajdują się błędy typograficzne. Niniejszy model prezentujemy po poprawieniu oczywistych pomyłek. Trudno jest jednak ostatecznie rozstrzygnąć, czy jest to postać równań zgodna z tą, którą chciała podać autorka.

W powyższym modelu wprowadzonych zostało osiem nowych parametrów η_{12}, η_{21}, ν_{12}, ν_{21}, ϱ_1, ϱ_2, ξ_1, ξ_2. W ten sposób liczba parametrów, które trzeba określić, wzrosła do dwudziestu(!). Nowakowska podała zbiór pomysłów, w jaki sposób można próbować estymować te parametry.

Autorka odnosiła się sceptycznie do możliwości praktycznego wykorzystania modelu w celach predykcyjnych. Rolę tego modelu widziała jako „źródło intuicji przy formułowaniu praw rządzących rozwojem nauki[92].

Model rozwoju dyscypliny matematycznej (1981)

M. Kochen i A. Blaivas z University of Michigan przedstawili w znanym artykule „A model for the growth of mathematical specialties", opublikowanym w 1981 roku na łamach czasopisma *Scientometrics*, uogólniony model nauki[93]. Autorzy pokazali, że przedstawione uprzednio epidemiczne modele rozwoju nauki są w tym podejściu jedynie szczególną podklasą możliwych do sformułowania modeli dynamicznych.

Podstawowa koncepcja modelu nauki oparta została na hipotezie, że zbiór naukowców i zbiór twierdzeń mogą być reprezentowane poprzez przestrzenie metryczne o odpowiedniej liczbie wymiarów. Hipoteza ta jest wynikiem badań bibliometrycznych Price'a, Griffitha i Small'a, które wykazały, że do reprezentacji sieci cytowań literatury wystarczy dwuwymiarowa przestrzeń metryczna, w której punkty odpowiadają poszczególnej pozycji literaturowej, a odległości między dwoma punktami — liczbie prac cytujących obie pozycje odpowiadające tym punktom.

Kochen i Blaivas założyli, że wspomniane przestrzenie tworzą ciągłe, różniczkowalne rozmaitości, oznaczone kolejno: K (ang. *Knowledge* — wiedza), P (ang. *Persons* — osoby) oraz D (ang. *Documents* —

[92] Tamże s. 335 (tłumaczenie własne).

[93] M. Kochen, A. Blaivas, „A model for the growth of mathematical specialties", *Scientometrics*, 3 (1981), 265–273.

prace) oraz znane z modeli epidemicznych I (*Infectives* — aktywni badacze „zarażający” innych swymi ideami), S (*Susceptibles* — podatni na „zarażenie”, czyli potencjalni autorzy). Punkt $k \in K$ opisuje element wiedzy, natomiast oznaczenia z kreską u góry (np. $\bar{K}$) przedstwaiają krzywe całkowe będące odpowiednimi rozwiązaniami układu równań różniczkowych.

Wspomniani autorzy zaproponowali, żeby ilość wiedzy w matematyce mierzyć liczbą „aktywnych” twierdzeń, tj. ogólnych twierdzeń[94] będących aktualnie w użyciu. Okazuje się bowiem, że w trakcie rozwoju matematyki obserwujemy podwójny proces: tworzenia nowych twierdzeń i usuwania starych, które okazują się przypadkiem szczególnym nowych, mocniejszych twierdzeń[95].

W modelu tym równania epidemiczne (26) analizowane przez Goffmanna[96] przyjmują następującą postać[97]:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{I}}{dt} &= a\bar{I}\bar{S} + b\bar{I} + c, \\ \frac{d\bar{S}}{dt} &= -a\bar{I}\bar{S} + d\bar{S} + e, \end{aligned} \tag{32}$$

gdzie a, b, c, d, e są odpowiednimi parametrami modelu.

[94] Tzn. takich, które nie zawierają się w innych dostępnych twierdzeniach jako przypadki szczególne.

[95] Chodzi tu o podejście od strony logicznej a nie praktycznej. Niekiedy bowiem używa się w praktyce „zdezaktualizowanych” twierdzeń z powodu prostoty lub ze względów historycznych. Można jednak na danym etapie rozwoju matematyki zrekonstruować logicznie sieć twierdzeń i wskazać te bardziej ogólne. Właśnie o takie podejście chodzi w omawianej pracy.

[96] W. Goffman, „Mathematical approach to the spread of scientific ideas — the history of mast cell research”, *Nature*, 212 (1966), 449–452.

[97] Kochen i Blaivas nie wspominają o trzecim równaniu istniejącym w modelu Goffmana. Opisuje ono zmiany liczby naukowców, którzy odchodzą od zajmowania się daną problematyką. Można jednak prosto dokonać tego uzupełnienia w następujący sposób. Jeżeli przez R oznaczymy osoby, które porzuciły (z jakiegokolwiek powodu) prace nad daną tematyką, to wspomniane równanie przyjmuje postać: $\frac{d\bar{R}}{dt} = -b\bar{I} - d\bar{S}$.

Kochen i Blaivas stworzyli na bazie zaproponowanego formalizmu dwa własne modele, które zostały przedstawione w omawianym artykule: ogólny model rozwoju pojedynczej dyscypliny matematycznej oraz model rozwoju dwóch specjalności matematycznych.

Pierwszy z nich ma strukturę podobną do przedstawionego powyżej równania epidemicznego, ale został rozszerzony o dodatkowy człon na końcu każdego z równań składowych, oznaczający liniową zależność przyrostu liczby prac od liczby naukowców aktywnie działających w danej chwili (*Infectives*).

Można podać za autorami zbiór założeń, jakie poczyniono odnośnie modelowanej dyscypliny[98]:

Założenie 1: Prędkość zmian liczby twierdzeń K jest wprost proporcjonalna do liczby twierdzeń K, liczby hipotez U oraz liczby działających badaczy I (Infectives).

Założenie 2: Twierdzenie–w–użyciu umożliwia przekształcenie hipotezy–w–użyciu w nowe twierdzenie z prawdopodobieństwem e na jednostkę czasu.

Założenie 3: Każde twierdzenie–w–użyciu jest używane w dowodzie f nowych twierdzeń.

Założenie 4: Liczba nowych hipotez U (*conjectures*), tworzonych w jednostce czasu, jest proporcjonalna do liczby badaczy I.

Założenia te, po przełożeniu na język zaproponowanego formalizmu, dają następujący model:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{K}}{dt} &= a\bar{K}\bar{U} + b\bar{K} + c + f\bar{I}, \\ \frac{d\bar{U}}{dt} &= -a\bar{K}\bar{U} + d\bar{U} + e + g\bar{I}. \end{aligned} \tag{33}$$

[98] Łatwo zauważyć, że podany zbiór założeń opisuje o wiele prostszy model (bez członów nieliniowych). Trzeba więc powiedzieć, że jest to jedynie zbiór podstawowych założeń. Oczywiście model ten zawiera jeszcze dużą ilość innych, ukrytych założeń, które trzeba poczynić aby takie modelowanie w ogóle było możliwe. Ten problem omówimy jednak osobno w rozdziale 4.

Opisywany model pozostaje do dziś niestety wyłącznie czysto teoretycznym przypadkiem, nie doczekał się bowiem żadnej próby zastosowania. Dodatkowy problem wynika stąd, że autorzy nie podali w jaki sposób zmienia się liczba działających badaczy I.

Ze względu na specyfikę użytego formalizmu, nadaje się on raczej tylko do opisu nauk dedukcyjnych. W przypadku nauk empirycznych trudno bowiem wskazać zbiór twierdzeń analogicznych do twierdzeń matematycznych. Nasuwa się natomiast przypuszczenie, że zamiast zbioru twierdzeń można by na gruncie tych nauk rozważać teorie. W artykule z 1983 r. Kochen próbował rozwiązać ten problem wskazując, że można przyjąć jako wskaźnik liczbę przetestowanych hipotez, które są w (praktycznym? – P. P.) użyciu. Występują jednak trudności z ujęciem ilościowym rozwoju teorii. Wynika to z faktu, iż między teoriami nauk empirycznych zachodzą bardziej złożone związki, niż między twierdzeniami nauk dedukcyjnych. Dodatkowo występuje czynnik empiryczny, który odgrywa istotną rolę w rozwoju tych nauk. Wydaje się więc, że nie można pominąć jego wpływu[99].

---

[99] Jeżeli przyjąć Popperowską wizję nauki, gdzie teorie są śmiałymi hipotezami tworzonymi przez naukowców, a testy empiryczne są jedynie próbami obalenia teorii, to można podjąć próbę kwantyfikacji wiedzy naukowej przyjmując, że sam zbiór teorii naukowych jest wystarczający do opisu stanu wiedzy na gruncie danej dziedziny.

Przyjmując taką koncepcję, składnik empiryczny nie wchodzi w obręb wiedzy naukowej wprost, jako zbiór pewnych danych. Służy on jedynie do odrzucania hipotez nieadekwatnych. Jednakże badania na gruncie filozofii nauki pokazały, że proces rozwoju nauki jest bardziej złożony, niż ten, którego rekonstrukcją jest koncepcja Poppera. Przyjęcie innej koncepcji logiki rozwoju nauki pozostawia natomiast otwarty problem, jak reprezentować w modelu naszą wiedzę o świecie, która w naukach ścisłych ma zarówno składnik empiryczny, jak i dedukcyjny. Poruszone zagadnienie możliwości kwantyfikacji naszej wiedzy jest interesującym problemem filozoficznym, którego rozwiązanie, jak widać, w dużej mierze zależy od przyjętej koncepcji rozwoju nauki.

Model rozwoju dwóch specjalności matematycznych (1981)

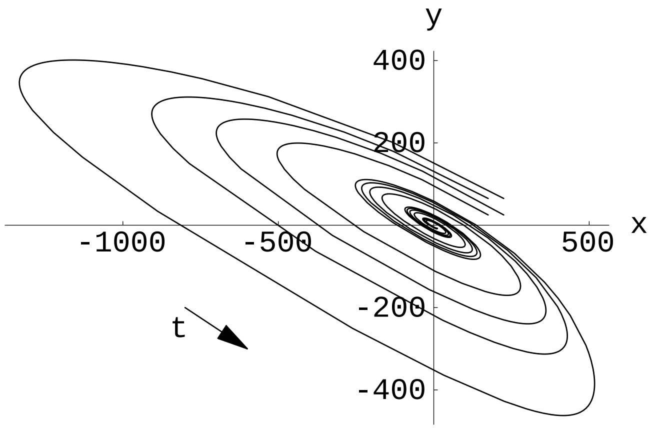
Kochen i Blaivas zaproponowali również inny model, który tym razem został skonfrontowany z rzeczywistymi danymi. Model jest bardzo interesujący, ponieważ jest drugą próbą (obok modeli Lotki–Volterry) opisania oddziaływań między dwiema dyscyplinami lub specjalnościami. W tym konkretnym przypadku autorzy zajęli się zagadnieniem rozwoju dwóch specjalności matematycznych: topologii i geometrii różniczkowej. Zaproponowali oni zbiór podstawowych założeń, jakie mają spełniać modelowane dziedziny. Po pierwsze przyjęli, że istnieje oddziaływanie pomiędzy specjalnościami. Intuicja taka jest dobrze potwierdzona przez historię nauki. Po drugie założyli, że twierdzenia używane do dowodu nowego twierdzenia w danej specjalności pochodzą nie tylko z niej samej, ale również w pewnej liczbie są czerpane z sąsiedniej specjalności. Założyli oni ponadto, że twierdzenia z sąsiedniej specjalności mają mniejszy wpływ na prędkość tworzenia nowych twierdzeń niż aktualna liczba udowodnionych twierdzeń w danej specjalności. Założenia takie można zrealizować układem równań, który podali Kochen i Blaivas:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= a_1 x - b_1 x^2 + c_1 \frac{dy}{dt}, \\ \frac{dy}{dt} &= a_2 y - b_2 y^2 + c_2 \frac{dx}{dt}, \end{aligned} \tag{34}$$

gdzie x, y oznaczają ilość „aktywnej” wiedzy, która jest reprezentowana przez liczbę twierdzeń i metod będących w użyciu w tych działach (a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2 są parametrami modelu).

Zauważmy, że człon kwadratowy opisuje mechanizm „starzenia się” wyników, tj. usuwania twierdzeń szczegółowych. Podobny mechanizm starzenia jest stosowany w wielu innych modelach, np. w obiecującej klasie modeli z opóźnionym parametrem.

Model Kochena i Blaivasa poddany został porównaniu z danymi opisującymi rzeczywisty rozwój geometrii różniczkowej i niskowymiarowej topologii różniczkowej w latach 1975–1978. Specjalnie wybrane zostały dwie gałęzie matematyki, które wydawały się mieć na siebie duży wpływ, będąc jednocześnie pod słabym wpływem innych specjalności matematycznych. Taki dobór miał umożliwić procedurę idealizacyjną, polegającą na zaniedbaniu oddziaływań z innymi częściami matematyki. Autorzy dokonali estymacji parametrów modelu na podstawie trzech punktów danych. Poniżej zaprezentowano rekonstrukcję portretu fazowego omawianego układu, w której wykorzystano wartości parametrów uzyskane przez badaczy. Najbardziej zewnętrzna trajektoria na wykresie



Rys. 5. Portret fazowy modelu Kochena i Blaivasa

uzyskana została dla danych początkowych $x = 225$ i $y = 67$. Odpowiadają one liczbie aktualnych teorii w geometrii różniczkowej oraz w topologii w 1975 roku[100].

Niestety okazało się, że model dobrany do tych danych nie daje poprawnych predykcji. Krzywe całkowe zostały wyliczone numerycznie przez Kochena i Blaivasa za pomocą procedury Rungego–Kutty. Okazało się, że punkty opisujące kolejne stany nauki znajdują się na różnych krzywych, a interpretacja niektórych wskaźników wypadła sprzecznie z oczekiwaniami (według modelu rozwój topologii ma hamujący wpływ na rozwój geometrii różniczkowej, występują również ujemne

[100] M. Kochen, A. Blaivas, „A model for the growth…”, s. 270.

liczby twierdzeń). Autorzy podali prawdopodobną przyczynę takiego stanu rzeczy (odpływ badaczy zajmujących się jedną dziedziną na rzecz drugiej), ale nie zmienia to faktu, że model został sfalsyfikowany. Wydaje się, że wskazane źródło problemów nie jest jedynym możliwym: problematyczne są np. niektóre punkty procedury estymacji parametrów modelu.

Dalsze próby analizy zaprezentowanego modelu przedstawił M. Kochen w 1983 roku[101]. Skupił się on na analizie jakościowej modelu[102]. M. Kochen przeprowadził również próbę zastosowania opisywanego modelu do opisu rozwoju badań nad słabymi oddziaływaniami jądrowymi w aspekcie teoretycznym i doświadczalnym[103]. Nie udało się jednak uzyskać istotnie lepszych wyników.

Pomimo, iż model Kochena i Blaivasa nie przeszedł w pełni testu empirycznego, jest on ciekawym przykładem próby modelowania wzajemnego oddziaływania na siebie dwóch specjalności w obrębie jednej dyscypliny naukowej. Autorom udało się jednak wykazać istnienie punktu siodłowego w przestrzeni fazowej takiego układu, co jest jednym z pierwszych kroków w kierunku badania układów o skomplikowanej dynamice.

Wartość opisywanej pracy polega na otwarciu pewnych dróg, jakimi można poprowadzić w przyszłości kolejne próby modelowania rozwoju nauki. Przypadek ten wskazuje również dobitnie, że testowanie empiryczne nawet stosunkowo prostych, nieliniowych modeli rozwoju nauki jest bardzo trudne.

---

[101] M. Kochen, „Mathematical model for the growth of two specialties", *Science of Science*, 3 (1983), 199–217.

[102] Chodzi tu o matematyczną analizę jakościową stosowaną w teorii układów dynamicznych. Jest to matematyczna metoda określania charakteru rozwiązań układów równań różniczkowych. Nie należy jej mylić z potocznie używanym pojęciem analizy jakościowej, jako przeciwieństwa analizy ilościowej.

[103] M. Kochen, „Mathematical model for the growth...", ss. 215–216.

2.2. Zastosowanie równania Fishera–Eigena–Schustera (1990)

Grupa naukowców z Berlina: E. Bruckner, W. Ebeling i A. Scharnhorst, zaproponowała w 1990 roku wykorzystanie równania Fishera–Eigena–Schustera (FES), stosowanego wcześniej do opisywania procesów ewolucyjnych, jako modelu rozwoju dyscyplin naukowych[104]. Równanie to ma następującą postać ogólną:

$$\frac{dx_i}{dt} = (A_i - D_i)x_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} (A_{ij}x_j - A_{ji}x_i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} (B_{ij}x_i x_j) - k_0 \tag{35}$$

dla $i, j = 1, \ldots, n$.

Zaprezentowany powyżej układ równań (dla $i > 1$) został zinterpretowany przez wspomnianych autorów w kategoriach rozwoju dyscyplin naukowych. Dokonali tego poprzez nadanie odpowiednich znaczeń stałym występującym w kolejnych członach równania. Przyjęli, że A_i oznacza stopień wzrostu liczby nowych pracowników zajmujących się daną dziedziną, którzy tę dziedzinę studiowali (*selfreproduction*), innymi słowy, jest to stopień wzrostu liczby nowych naukowców, wykształconych w danym kierunku. Natomiast D_i (D*ecline*) oznacza stopień ubytku liczby naukowców w danej dziedzinie na skutek porzucenia działalności naukowej z powodu wieku (lub innych powodów). Współczynniki A_{ij} oraz A_{ji} oznaczają stopień migracji naukowców pomiędzy różnymi dyscyplinami (*field mobility*)[105], odpowiednio A_{ij} oznacza stopień mi-

[104] E. Bruckner, W. Ebeling, A. Scharnhorst, „The application of evolution models in scientometrics", *Scientometrics*, 18 (1990), 21–41.

[105] Zjawisko to było przedmiotem wielu analiz i jest szeroko opisane w literaturze poświęconej naukometrii. Por. np. J. Vlachý, „Mobility in science: A bibliography of scientific career migration, field mobility, international academic circulation and brain drain", *Scientometrics*, 1 (1979), 201–228.

gracji z dyscypliny j–tej do i–tej. Na potrzeby swojego modelu przyjęli oni pozostałe współczynniki równe 0.

Można pokazać, że zaproponowane równanie FES, przy założeniu $A_{ij} = 0$, daje się sprowadzić do postaci równań używanych w modelu epidemicznym. Można więc uważać podany model za ogólniejszy od modelu epidemicznego.

2.3. Model Brucknera–Ebelinga–Scharnhorsta (1990)

Wspomniana powyżej grupa niemieckich naukowców, w tym samym artykule z 1990 roku, przyjęła dla praktycznych celów badawczych uproszczoną formę równania FES (bez członu nieliniowego, związanego z iloczynem $x_i x_j$). Postanowili oni jednak rozszerzyć ten model, aby dawał bardziej realistyczne predykcje. Uczynili to przez zastąpienie parametrów $A_i = const, D_i = const$ i $A_{ij} = const$ kombinacją, złożoną ze stałych oraz funkcji x_i. Dokonali następującego podstawienia:

$$A_i = A_i^0 + A_i^1 x_i,$$

$$D_i = D_i^0 + D_i^1 x_i,$$

$$A_{ij} = A_{ij}^0 + A_{ij}^1 x_i,$$

gdzie: $A_i^0, A_i^1, D_i^0, D_i^1, A_{ij}^0, A_{ij}^1 = \ const.$

W wyniku tego zabiegu ostatecznie otrzymany układ ma postać:

$$\frac{dx_i}{dt} = (A_i^0 - D_i^0)x_i + (A_i^1 - D_i^1)x_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} (A_{ij}^0 x_j - A_{ji}^0 x_i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} (A_{ij}^1 x_i x_j - A_{ji}^1 x_i^2). \tag{36}$$

Należy zauważyć, że struktura matematyczna tego układu jest różna od struktury opisywanej równaniem Fishera–Eigena–Schustera. Wprowadzone zostały bowiem dodatkowe człony nieliniowe (kwadratowe).

Jak łatwo stwierdzić, wadą takiego rozwiązania jest przyjęcie dużej liczby parametrów — już dla układu trzech równań (który jest bardzo małym układem) potrzebujemy estymować 24 parametry (!), co jest zadaniem niezwykle trudnym.

Konieczne stało się więc przyjęcie dodatkowych założeń, ale w praktyce okazało się, że możliwe jest przeprowadzenie tylko niektórych symulacji na określonych z góry wartościach parametrów, zadanie estymacji okazało się bowiem zbyt trudne. Przeprowadzone symulacje potwierdziły możliwość modelowania, za pomocą omawianego układu, występujących rzeczywiście trendów w rozwoju dyscyplin naukowych, np. wpływu faktu stworzenia nowego pola badań na zbliżone tematycznie dyscypliny. Wskazuje to na potencjalną przydatność opracowanego układu. Niestety praktycznie, ze względu na zbyt dużą liczbę parametrów, model jest niezbyt przydatny. Dodatkowy problem wynika z tego, iż nie wskazano powodów, dla których konieczne jest przyjęcie tak dużej liczby niezależnych parametrów[106].

2.4. Modele z przesuniętym parametrem

Bardzo interesującą alternatywą dla modeli przedstawionych w poprzednich działach jest grupa modeli z przesuniętym parametrem (*ang. DDE — Delayed Differatial Equation*). Są to modele, które już przy bardzo prostej strukturze pozwalają na modelowanie złożonych zachowań. W układach tych może występować całe bogactwo zachowań typowych dla dynamiki nieliniowej.

Cechą charakterystyczną tej klasy modeli jest występowanie sprzężenia zwrotnego (*feedback*) pomiędzy stanem obecnym a stanami przeszłymi, oddalonymi o przedział czasu T. Jeżeli $x(t)$ jest funkcją, opisującą zmiany danej wielkości, to opisywane sprzężenie modeluje się poprzez wprowadzenie funkcji $g(x(t-T))$. Ogólna postać układów z prze-

[106] Reguły metodologiczne nakazują ograniczanie liczby niezależnych parametrów w równaniach teorii. Jednym z celów takiego zabiegu jest zwiększenie podatności teorii na falsyfikację.

suniętym parametrem przedstawia się wówczas następująco:

$$\frac{dx(t)}{dt} = F\left(t, x(t), g(x(t-T))\right), \tag{37}$$

gdzie F jest funkcją trzech zmiennych ($F : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}$), natomiast $T > 0$.

Modele te były z powodzeniem stosowane do opisu wielu procesów w ekonometrii. M. Szydłowski i A. Krawiec[107] podali pomysł wykorzystania analogii pomiędzy zjawiskami ekonomicznymi a rozwojem nauki i wskazali sposób zastosowania tych modeli w naukometrii. Zinterpretowali oni m.in. cykliczny rozwój nauki (okresowe spadki prędkości przyrostu nowych wyników) jako odpowiadający znanemu z ekonomii efektowi Kondratiewa.

Wspomniani autorzy zaproponowali cztery różne modele rozwoju nauki, przy czym dwa pierwsze są rozwinięciem (uogólnieniem) istniejących już wcześniej popularnych modeli naukometrycznych.

Rozszerzony model eksponencjalny (2001)

Pierwszy z modeli z przesuniętym parametrem jest rozszerzeniem propozycji Dereka de Solla Price'a[108]. Przyjęto kumulacyjny rozwój liczby prac oraz założono, że musi upłynąć pewien czas od chwili opublikowania pracy do momentu, w którym zawarte w niej idee zaczną wpływać na działalność innych naukowców. Ten drugi mechanizm modeluje się poprzez wprowadzenie parametru opóźnienia T. Model wygląda następująco:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \alpha x(t-T), \tag{38}$$

gdzie $T > 0$.

[107] M. Szydłowski, A. Krawiec, „Scientific cycle model with delay", *Scientometrics*, 52 (2001), 83–95. Zobacz również: M. Heller, A. Krawiec, M. Szydłowski, „Time–to–build of science and its cyclic time evolution", *preprint*, Uniwersytet Jagielloński, Kraków 2002.

[108] M. Szydłowski, A. Krawiec, „Scientific cycle model with delay", *Scientometrics*, 52 (2001), 83–95.

Jak widać, aktualne tempo rozwoju zależy od stanu, który występował w chwili poprzedzającej stan obecny o czas T. Innymi słowy, aktualne tempo wzrostu zależy od uprzedniej wartości funkcji w chwili wcześniejszej o czas T. Łatwo zauważyć, że przyjęcie $T = 0$ przekształca omawiany model w eksponencjalny.

Model ten jest szczególnie interesujący, ponieważ istnieją dla niego rozwiązania analityczne[109]. Problem warunków brzegowych dla równań z przesuniętym parametrem sprowadza się do znalezienia funkcji $y(t)$, spełniającej następujące warunki:

$$\begin{aligned} &\frac{dy(t)}{dt} = \alpha y(t-T), \qquad T > 0, \quad t \in [0, b], \quad b > 0; \\ &y(t) = \varphi(t), \qquad\qquad\qquad t \in [-T, 0]. \end{aligned} \tag{39}$$

Funkcję $\varphi(t) = 0$ nazywamy „prefunkcją”. Zdefiniowana jest ona na przedziale $[-T, 0]$, a opisuje początkowe wartości funkcji, konieczne do jednoznacznego wyznaczenia funkcji $y(t)$. Jest to odpowiednik warunków początkowych znanych ze zwykłych równań różniczkowych. Podane równanie różniczkowe ma rozwiązania typu eksponencjalnego (rosnące lub malejące). Interesującą cechą jest to, że posiada ono również rozwiązania okresowe (rosnące lub tłumione eksponencjalnie). Typ rozwiązań zależy od relacji pomiędzy parametrami α, T oraz od kształtu prefunkcji $\varphi(t)$.

Można udowodnić twierdzenie, że jeżeli prefunkcja $\varphi(t) = 0$ dla $t \in [-\delta; 0]$, to jedynym rozwiązaniem równania jest funkcja $y(t) = 0$. W naszym przypadku oznacza to, że model nie opisuje „samorzutnej kreacji” dyscypliny. Jeżeli przyjmiemy, że przed chwilą rozpoczęcia obserwacji w danej dyscyplinie nie było ani jednej pracy (tak możemy modelować nieistnienie dyscypliny), to według modelu w dowolnie

[109] Analizę matematyczną rozwiązań równań tego typu można znaleźć w bardzo dobrym opracowaniu: C. E. Falbo, *Analytic and Numerical Solutions to the Delay Differential Equation* $y'(t) = \alpha y(t-\delta)$, 30.11.2004, <`http://www.sonoma.edu/math/faculty/falbo/pag1dde.html`>. Na tym artykule oparta została przedstawiona tu analiza.

długim czasie nie pojawi się żadna praca. Z tego twierdzenia można wysnuć również inny wniosek — model opisuje ewolucję liczby prac, to znaczy pozwala przewidzieć, ile prac pojawi się w pewnym okresie czasu przyjmując, że istnieje już wcześniej pewna liczba prac. Model ten (zresztą jak wszystkie poprzednie) nie wyjaśnia pojawienia się dyscypliny, lecz wyjaśnia tylko jej rozwój.

Rozwiązania podanego równania mają następującą postać ogólną:

$$y(t) = C_0 e^{-\frac{t}{T}} + C_1 e^{r_0 t} + C_2 e^{r_1 t} + C_3 e^{rt} + \sum_{k=1}^{\infty} e^{p_k t}(C_{1k}\cos(q_k t) + C_{2k}\sin(q_k t)), \tag{40}$$

gdzie:

a) $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = 0$, gdy $\alpha < -\frac{1}{Te}$;

b) $C_1 = C_2 = C_3 = 0$ i $C_0 = const$, gdy $\alpha = -\frac{1}{Te}$;

c) $C_0 = C_3 = 0$ oraz $C_1 = const$ i $C_2 = const$, gdy $-\frac{1}{Te} < \alpha < 0$. Równanie charakterystyczne podanego równania różniczkowego posiada wówczas dwa pierwiastki rzeczywiste r_0, r_1.

d) $C_0 = C_1 = C_2 = 0$ i $C_3 = const$, gdy $\alpha > 0$. Równanie charakterystyczne posiada wówczas jeden pierwiastek rzeczywisty r.

Współczynniki p_k oraz q_k są odpowiednio częściami rzeczywistymi i urojonymi zespolonych pierwiastków równania charakterystycznego $(p_k \pm iq_k)$.

Zauważmy, że w funkcji $y(t)$ pojawia się nieskończona suma iloczynów funkcji eksponencjalnych oraz sinusów i cosinusów[110]. Opisują one drgania gasnące ($p_k < 0$) lub narastające ($p_k > 0$). Z tego wynika, że rozwiązanie tak prostego równania różniczkowego może być złożeniem funkcji eksponencjalnych i nieskończenie wielu oscylacji gasnących i/lub rosnących. Prowadzi to do sytuacji, w której podane równanie różniczkowe posiada całą gamę różnorodnych rozwiązań. Problem warunków początkowych prowadzi do nieskończenie wymiarowego układu równań.

[110] Chodzi o człon: $\sum_{k=1}^{\infty} e^{p_k t}(C_{1k}\cos(q_k t) + C_{2k}\sin(q_k t))$.

Dla celów praktycznych często przybliża się rozwiązanie poprzez ograniczenie liczby sumowanych elementów. Otrzymujemy wówczas funkcję ($n \in \mathbb{N}$):

$$y_n(t) = C_0 e^{-\frac{t}{T}} + C_1 e^{r_0 t} + C_2 e^{r_1 t} + C_3 e^{rt} + \sum_{k=1}^{n} e^{p_k t}(C_{1k}\cos(q_k t) + C_{2k}\sin(q_k t)). \tag{41}$$

W tym wypadku problem warunków początkowych prowadzi do układu $2n - 1 + h$ równań, z których wyznaczamy wartości parametrów funkcji (liczba $h \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ zależy od tego, który z przypadków a)–d) jest spełniony).

Rozszerzenie modelu logistycznego (2001)

Odmiennie niż w poprzednim przypadku ma się sprawa z rozszerzonym modelem logistycznym[111]. Jeżeli przyjmiemy, że prędkość rozwoju danego aspektu nauki jest proporcjonalna do jego wielkości w chwili poprzedzającej, oddalonej o T, a ponadto jeżeli założymy, że mechanizm „starzenia" (odrzucania) wyników jest proporcjonalny do kwadratu aktualnego stanu (identycznie jak w oryginalnym modelu logistycznym), to otrzymamy następujący model:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \alpha x(t - T) - \beta x^2(t). \tag{42}$$

Przyjęte oznaczenia są takie same, jak w poprzednim modelu oraz w modelu logistycznym.

Zaprezentowany tu układ posiada interesujące własności, które można scharakteryzować następująco: dla odpowiednich kombinacji parametrów α, β i T otrzymywane trajektorie są zbliżone do funkcji logistycznej, lecz obserwujemy również występujące okresowo fluktuacje. W przybliżeniu można powiedzieć, że wynik jest złożeniem funkcji logistycznej i okresowych fluktuacji. Co więcej, układ ten, dla pewnych

[111] M. Szydłowski, A. Krawiec, „Scientific cycle model…", ss. 86–91.

wartości parametrów, może być również niestabilny i mogą dominować rosnące do nieskończoności fluktuacje. Oczywiście występują również rozwiązania bardzo zbliżone do funkcji logistycznej.

Te charakterystyczne zachowania tak prostego układu dynamicznego mają jedną, zaskakującą własność — zgadzają się z przytoczoną przez Solla Price'a typologią możliwych scenariuszy rozwoju wzrostu logistycznego w przypadku napotkania ograniczeń środowiska. W książce *Mała Nauka — Wielka Nauka* Price podał cztery sposoby reagowania wzrostu wykładniczego, opracowane na podstawie analizy różnych historii rozwoju[112]:

a) efekt schodowy (Holton nazywał go efektem eskalacji),

b) utrata definicji (nie można mówić o dalszym ciągu historii rozwoju),

c) oscylacje rozbieżne,

d) oscylacje zbieżne (do górnej granicy).

Zauważmy, że był to wynik analizy zjawiska rozwoju od strony fenomenalnej. Pomijając drugi przypadek, jako należący do innej klasy problemów, okazuje się, że omawiany model może generować wykresy należące do pozostałych typów. Wskazuje to na fakt, że uchwycone trzy istotne mechanizmy rozwoju (opóźniony wpływ, kumulacja i „obumieranie" wyników) pozwalają odtworzyć na tyle wiernie strukturę rozwoju nauki, że zgadza się ona jakościowo z tym, co obserwujemy w rzeczywistości. Trzeba jednak przyznać, że klasyfikacja Price'a nie jest w pełni ścisła, a podane typy przebiegów tylko orientacyjne, to samo więc musi się tyczyć podanych tu wniosków. Interesujące wyniki mogą dać natomiast próby testowania empirycznego omawianego modelu.

Głębszą analizę przedstawionego tu modelu, wraz z wykazaniem możliwości powstawania zachowań okresowych poprzez mechanizm bifurkacji Hopfa, można znaleźć w cytowanych pracach M. Szydłowskiego i A. Krawca.

[112] D. J. de Solla Price, *Mała Nauka...*, ss. 30–32.

Model rozwoju dyscypliny nauk empirycznych (2004)

M. Szydłowski wraz z zespołem opracowali model uwzględniający interakcje pomiędzy badaniami teoretycznymi i empirycznymi w rozwoju dyscypliny naukowej[113]. Bazuje on na rozszerzonym modelu eksponencjalnym (38). Podstawą przyjętego modelu było spostrzeżenie, że do powstawania prac istotnych przyczyniają się nie tylko prace teoretyczne (czyli inne prace istotne), ale również wyniki badań empirycznych. Opierając się na badaniach Szalaya przyjęto, iż liczba wyników eksperymentalnych (np. danych z obserwacji astronomicznych gromadzonych w wirtualnych obserwatoriach) rośnie eksponencjalnie (proporcjonalnie do e^{gt}).

M. Szydłowski zaproponował następujący model:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= \alpha y(t-T) + \beta \frac{dy(t)}{dt}, \\ \frac{dy(t)}{dt} &= gy(t), \end{aligned} \tag{43}$$

gdzie α opisuje szybkość rozwoju dyscypliny, g – tempo przyrostu danych empirycznych, β – wpływ wyników doświadczalnych na prace teoretyczne, natomiast $T > 0$ jest czasem opóźnienia.

Rozwiązaniem drugiego równania jest funkcja $y(t) = \exp(gt) + C$. Wstawiając jej pochodną do pierwszego równania uzyskujemy następujące równanie:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \alpha y(t-T) + \beta e^{gt}. \tag{44}$$

M. Szydłowski pokazał, jak sprowadzić powyższe równanie do postaci rozszerzonego modelu eksponencjalnego (38):

$$\frac{du(t)}{dt} = \bar{\alpha} u(t-T). \tag{45}$$

[113] M. Szydłowski, A. Krawiec, W. Czaja, „Growth cycles in the Church bibliography of symbolic logic”, *preprint*, Uniwersytet Jagielloński, Kraków 2004.

Można dokonać tego przez następujące podstawienia:

$$\begin{aligned} u(t) &= e^{-2gt}x(t) - \frac{\beta e^{-gt}}{g - \alpha e^{-gT}}, \\ \bar{\alpha} &= \alpha e^{-gT}. \end{aligned} \tag{46}$$

Po zastosowaniu powyższych przekształceń wyjściowa funkcja opisująca rozwój dyscypliny naukowej ma postać:

$$x(t) = e^{2gt}u(t) + \frac{\beta e^{gt}}{g - \alpha e^{-gT}}, \tag{47}$$

gdzie funkcja $u(t)$ ma następującą postać (por. równanie (40)):

$$u(t) = C_0 e^{-\frac{t}{T}} + C_1 e^{r_0 t} + C_2 e^{r_1 t} + C_3 e^{rt} + \sum_{k=1}^{\infty} e^{p_k t}(C_{1k}\cos(q_k t) + C_{2k}\sin(q_k t)). \tag{48}$$

Przedstawiony model prezentuje obiecujące podejście do modelowania rozwoju nauk empirycznych. Pozwala on usunąć niektóre problemy natury technicznej pojawiające się w poprzednich modelach. Interesujące będzie podjęcie próby testowania go na danych opisujących np. rozwój astronomii (w tym przypadku stosunkowo łatwo oszacować liczbę dokonywanych obserwacji). Zauważmy na zakończenie, że w modelu tym przyjęto dwa ważne założenia:

1) można jednoznacznie wydzielić badania empiryczne, które wpływają na prace w danej dyscyplinie;

2) liczba wyników badań empirycznych dla danej dyscypliny rośnie eksponencjalnie.

Przy próbie modelownania rozwoju konkretnej dyscypliny należy przede wszystkim zbadać, czy spełnione jest drugie założenie. Należy zastanowić się, na ile rzeczywiste odchylenia od wzrostu eksponencjalnego mogą wpłynąć na adekwatność modelu.

Model zmiany liczby prac przypadających na naukowca (2002)

Szydłowski, Krawiec i Heller podali jeszcze dwa oryginalne modele naukometryczne. Pierwszy z nich opisuje zmiany liczby opublikowanych prac na jednego naukowca $u(t)$[114]. Proponowany model ma następującą formę:

$$\frac{du(t)}{dt} = \alpha e^{-nT} u(t-T) - nu(t), \tag{49}$$

gdzie $\alpha, n, T = const$ oraz $T > 0$.

Dla modelu tego badacze udowodnili twierdzenie o istnieniu bifurkacji Hopfa, prowadzącej do powstawania okresowych orbit w przestrzeni fazowej. Następnym krokiem badania tego prostego, a zarazem interesującego modelu, powinna być próba przeprowadzenia testu empirycznego.

Model rozwoju prac znaczących i normalnych (2002)

Ostatnim modelem z grupy modeli z przesuniętym parametrem jest model opisujący rozwój wyników naukowych, uwzględniający istnienie dwóch kategorii wyników (artykułów): znaczących (przełomowych) i normalnych. Został zaproponowany następujący układ dynamiczny[115]:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= \alpha_1 x_1(t-T) + \alpha_2 x_2(t) - \beta_1 x_1^2(t) - \beta_2 x_2^2(t) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= \alpha_3 x_1(t-T_2) + \alpha_4 x_2(t) - \beta_3 x_2^2(t), \end{aligned} \tag{50}$$

gdzie:

x_1 — prace znaczące (przełomowe),

x_2 — prace normalne,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3 = const.$

---

[114] M. Heller, A. Krawiec, M. Szydłowski, „Time–to–build…”, s. 7.

[115] Tamże, s. 10.

Przyjęto założenie, że $T > T_2$. Dodatkowo założono, że pomija się opóźnienie przy procesie przyjmowania wyników zawartych w pracach normalnych (innymi słowy, wyniki każdej takiej pracy są znane i przyswajane natychmiast po jej opublikowaniu, wpływają one od razu na bieżącą działalność naukową). Takie ograniczenia pozwoliły na uproszczenie układu równań, który mimo to wymaga estymacji dziewięciu parametrów. Wskazuje to na duży stopień skomplikowania modelu, z drugiej jednak strony bogactwo dynamiki takiego układu otwiera szerokie pole badań. Jak na razie jest to jedyny model próbujący opisać oddziaływanie prac normalnych i „znaczących” w rozwoju nauki. Być może model ten pozwoliłby na posunięcie naprzód dyskusji wokół hipotezy Ortegi[116], które toczyły się w środowisku uczonych zajmujących się naukometrią.

2.5. Modele dynamiki innych aspektów rozwoju nauki

Model rozwoju kadry naukowej (1975)

R. Kulikowski, H. Mierzejewski i W. Rokicki zaproponowali w 1975 r. model rozwoju kadry naukowej, który miał służyć prognozowaniu liczby pracowników naukowych w siedmiu wyróżnionych grupach awansowych[117]. Autorzy posłużyli się układem równań różniczkowych opisujących intensywność awansów do danej grupy. Wyróżnione zostały następujące poziomy awansu naukowego: asystent, adiunkt, docent, profesor nadzwyczajny, profesor zwyczajny, członek PAN (korespondent), członek PAN. Przyjęto poniższe oznaczenia i opatrzono je następującymi interpretacjami[118]:

[116] Hipoteza Ortegi mówi, że w rozwoju nauki większą rolę odgrywa „mrówcza” praca zastępów przeciętnych naukowców, niż genialne odkrycia jednostek. Hipoteza ta wywołała żywą dyskusję w środowisku naukometrycznym. Dyskusji tej poświęcony został m.in. cały zeszyt czasopisma *Scientometrics* 12, 5–6 (1987).

[117] R. Kulikowski, H. Mierzejewski, W. Rokicki, „Model rozwoju kadry naukowej”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 11 (1975), 60–69.

[118] Tamże, s. 60.

$x_0(t)$ — intensywność dopływu absolwentów szkół wyższych do sektora nauki w roku t (liczba osób/rok);

$x_i(t)$ — intensywność awansów z grupy i–tej w roku t, $i = 1, .., 6$;

$x_{ij}(t) = c_{ij}x_j(t)$ — intensywność awansów z grupy j–tej do grupy i–tej w roku t, natomiast c_{ij} jest stałą opisującą intensywność przyspieszonych awansów.

Zaproponowano, aby zmiany w intensywności awansów z grupy i–tej opisywać następującym równaniem:

$$\frac{dx_i}{dt} = K_i \sum_{j=i-1}^{0} c_{ij}x_j(t-T_i) - \frac{1}{\tau_i}x_i(t) - K_i \sum_{j=i-1}^{0} c_{ij}x_j(t-T_{im})exp[-\frac{1}{\tau_i}(T_{im}-T_i)], \tag{51}$$

gdzie:

T_i — minimalny czas przebywania w i–tej grupie,

T_{im} — maksymalny czas przebywania w i–tej grupie,

τ_i — „stała czasowa" awansowania z grupy i–tej,

$K_i = const$,

$i = 1, \ldots, 6$.

Zdefiniowany został w ten sposób układ sześciu równań różniczkowych opisujących dynamikę zmian w instytucjonalnej strukturze nauki. Pozwala on na określenie intensywności awansów, a po niewielkim rozszerzeniu — na wyznaczanie liczebności każdej z grup.

Autorzy zaproponowali, aby parametry T_i, T_{im}, τ_i (dla $i = 1, .., 6$) wyznaczać na podstawie danych statystycznych, życiorysów pracowników nauki, itp[119]. Dla przykładu dla pierwszej grupy (doktorantów) przyjęto, że minimalny czas wynosi $T_1 = 3$ lata, a czas maksymalny (liczony między wiekiem emerytalnym a minimalnym wiekiem ukończenia studiów wyższych) wynosi $T_{1m} = 70 - 22 = 48$ lat. W podobny sposób określono pozostałe wartości tych parametrów. Następnie podano metodę wyznaczania parametru τ_i na podstawie średniego czasu zdobywania stopni i tytułów naukowych. W tym celu wzięto dane statystyczne

[119] Tamże, s. 63.

za 1973 r. dotyczące Polskiej Akademii Nauk. Z racji tego, że pozostałe parametry K_i zależą od wielu czynników, zaproponowano, aby dobrać je na podstawie danych statystycznych, używając metody najmniejszych kwadratów. W tym celu użyto danych statystycznych GUS z lat 1967–1973. Następnie na podstawie zidentyfikowanego modelu można było dokonywać już predykcji. Autorzy wykonali prognozę na lata 1974–1985. W ich interpretacji prognozy te „wyrażają największy możliwy wzrost kadry naukowej w poszczególnych grupach awansowych”[120].

Mimo, iż dokonane predykcje nie zostały skonfrontowane z danymi o rzeczywistym rozwoju nauki, model ten wydaje się bardzo interesujący. Jest on próbą badania dynamiki rozwoju instytucjonalnej struktury nauki. Podany przykład pokazuje, że można ją z powodzeniem modelować. Zaprezentowany model zajmuje się opisem nauki z innej perspektywy niż poprzedzające go modele — abstrahujemy od podziałów dyscyplinarnych, a zajmujemy się jedynie samą ogólną strukturą organizacji badań naukowych. Wskazuje to na fakt, że dynamika rozwoju nauki jest wieloaspektowa. Rozwój dokonuje się nie tylko na płaszczyźnie rozwoju wiedzy. Analizy pokazują, że istnieje obustronny wpływ pomiędzy rozwojem wiedzy a rozwojem struktur instytucjonalnych — modyfikują one nawzajem swoje dynamiki[121]. W związku z tym zrozumienie dynamiki wzrostu wiedzy staje się niemożliwe bez zrozumienia dynamiki innych aspektów rozwoju nauki i ich wzajemnego wpływu. Logika rozwoju wiedzy okazuje się zatem bardziej złożona niż mogliby to przewidywać zwolennicy rekonstrukcji logicznej.

W związku z powyższymi uwagami widać, że interesujące byłoby powiązanie modelu rozwoju struktury instytucjonalnej z modelami innych aspektów, na przykład dynamiki badań. Otrzymany model dawałby wieloaspektowy obraz dynamiki rozwoju nauki.

[120] Tamże, s. 67.

[121] Na ten fakt zwracają uwagę m.in. W. Herfel i C. Hooker. Więcej informacji na ten temat można znaleźć na stronie 170 niniejszego opracowania.

Trójpoziomowy model rozwoju struktury społeczności naukowej (1981)

Próbę stworzenia modelu łączącego dynamikę rozwoju kadry naukowej z dynamiką rozwoju badań naukowych podjęła Maria Nowakowska[122]. Wykorzystała ona w tym celu zbudowany przez siebie model rozwoju badań naukowych (zob. s. 54). Strukturę społeczności naukowej określiła ona poprzez podział jej na trzy grupy: osób przed doktoratem, doktorów przed habilitacją i naukowców po habilitacji. Liczby osób w tych grupach oznaczone zostały poprzez u_M, u_D oraz u_P. Zachodzi oczywiście następująca zależność pomiędzy całkowitą liczbą uczonych a liczbami osób w poszczególnych grupach: $u(t) = u_M(t) + u_D(t) + u_P(t)$.

Równania opisujące zmiany liczby problemów nierozwiązanych $N(t)$ oraz zmiany liczby publikacji $X(t)$ pozostają takie same jak w układzie równań (30) zamieszczonym na stronie 54 niniejszej książki. Natomiast ewolucja liczebności trzech grup naukowców (u_M, u_D, u_P) opisana została następującymi równaniami:

$$\begin{aligned}
\frac{du_M(t)}{dt} &= \alpha_M N(t) - \frac{u_M(t)}{u_M(t)+u_D(t)+u_P(t)} \cdot \frac{1}{k}\frac{dX(t)}{dt} - \\
&\quad -\beta_M u_M(t) + \varphi_M, \\
\frac{du_D(t)}{dt} &= \alpha_D N(t) + \frac{u_M(t)}{u_M(t)+u_D(t)+u_P(t)} \cdot \frac{1}{k}\frac{dX(t)}{dt} - \\
&\quad - \frac{u_D(t)}{u_M(t)+u_D(t)+u_P(t)} \cdot \frac{1}{r}\frac{dX(t)}{dt} - \beta_D u_D(t) + \varphi_D, \\
\frac{du_P(t)}{dt} &= \alpha_P N(t) - \frac{u_P(t)}{u_M(t)+u_D(t)+u_P(t)} \cdot \frac{1}{r}\frac{dX(t)}{dt} - \\
&\quad -\beta_P u_P(t) + \varphi_P.
\end{aligned} \tag{52}$$

[122] M. Nowakowska, „Epidemical models of the development of science", *Science of Science*, 2 (1981), 335–337.

gdzie parametry: α_M, α_D, α_P opisują „atrakcyjność" danej grupy; β_M, β_D, β_P — spadek liczby członków danej grupy. Stałe φ_M, φ_D, φ_P są parametrami pomocniczymi, natomiast k i r są parametrami opisującymi wpływ procesu publikacji prac na awanse do wyższej grupy.

Prezentowany model przedstawia wiele trudności, uniemożliwiających praktyczne jego zastosowanie (część z nich została omówiona przy okazji prezentacji modelu bazowego). Przykład ten natomiast doskonale ukazuje, jak skomplikowane jest zagadnienie tworzenia modeli opisujących rozwój nauki z uwzględnieniem oddziaływań na różnych płaszczyznach.

Matematyczny model aktu twórczego (1987)

Rumuński naukowiec I. Purica, w artykule zatytułowanym „Kreatywność i nisza społeczno–kulturalna"[123], opublikowanym na łamach czasopisma *Scientometrics*, przedstawił model aktywności twórczej. Wykorzystał w tym celu teorię układów dynamicznych oraz teorię katastrof. Choć w modelu tym należy skrytykować pewne fundamentalne założenia, rzutujące na znaczenie otrzymywanych wyników, to pozostaje on interesującą próbą ujęcia dynamiki rozwoju systemu wiedzy.

Purica wyszedł od stwierdzenia, że w celu zrozumienia efektów aktywności twórczej musimy rozpatrywać jednostki jako członków grupy społecznej. Grupa ta, w przyjętym rozumieniu, cechuje się „jednością intelektualną" będącą wynikiem przekazywania specyficznych idei pomiędzy jej członkami. W koncepcji tej przyjęto, że idee są obiektami popperowskiego świata 3, a przenoszą się między członkami grupy poprzez komunikację wzrokową i dźwiękową. Wspomniany zbiór idei istniejących w świecie 3 stanowi, w terminologii Puricy, *niszę społeczno–kulturalną* dla działalności twórczej człowieka. Idee służą zatem przenoszeniu informacji, a zarazem są „tworzywem", na bazie którego mogą być tworzone nowe idee.

[123] I. I. Purica, „Creativity and the socio–cultural niche", *Scientometrics*, 15 (1989), 181–187.

Następnie Purica przyjął szereg założeń, których status jest już mocno wątpliwy. Dokonał podziału idei na oczywistości (*evidences*) i memy (*mime*). Pierwsze są to „idee, które mogą być zweryfikowane eksperymentalnie”[124]. Pojęcie „mem” zostało natomiast zaczerpnięte od Dawkinsa[125] i oznacza płodne idee, które mogą być przekazywane pomiędzy ludźmi w procesie, zwanym imitacją. W koncepcji ewolucji kulturalnej pojęcie memu spełnia analogiczne zadanie do pojęcia genu w ewolucji biologicznej. Idąc dalej autor stwierdza, że: „ewolucja nauki jest walką pomiędzy «oczywistościami» i «memami»”[126].

Autor założył, że kreatywność jest przyjmowaniem oczywistości i przekształcaniem ich w nowe memy. Według niego kreatywność jest również „aktem rewolucyjnym, aktem buntu przeciw tradycyjnym memom, przyjmowanym w wyniku edukacji”[127]. Memy podlegają procesowi zmian i mutacji. Autor zauważył, że można opisywać mutacje memów jako wynik wysiłków teoretycznych i empirycznych. Tworzenie nowych memów, jak już wspomniano, powoduje również zmiany w istniejącym systemie memów.

Purica zaproponował, aby proces rozwoju systemu memów opisać przy pomocy układu dynamicznego i badać go przy pomocy metod teorii katastrof. Zauważył on bowiem, że zmiana w zespole memów, wynikająca z pojawienia się nowego memu, ma charakter katastrofy w znaczeniu teorii R. Thoma[128]. Purica wykorzystał katastrofę typu zagięcie (*fold catastrophe*) do opisu nagłych zmian wrażliwości układu na nowe memy w wyniku zmieniania parametrów kontrolnych.

Powstawanie i rozwój memów został opisany przez autora następującym modelem:

---

[124] Tamże, s. 182.

[125] Por. rozdział „Memy: nowe replikatory” w: R. Dawkins, *Samolubny gen*, Prószyński i S–ka, Warszawa 1996, ss. 262–278.

[126] I. Purica, „Creativity…”, s. 182.

[127] Tamże, s. 183.

[128] Por. R. Thom, *Stabilité structurelle et morphogénese. Essai d’une théorie générale des modeles*, W. A. Benjamin Inc., Massachusetts 1972.

$$\frac{dN}{dt} = I(E) + (kM - \Theta C)N - \lambda N^2, \tag{53}$$

gdzie:

N — liczba nowych memów,

M — liczba starych memów,

C — liczba starych memów konkurujących z nowymi memami,

$I(E)$ — funkcja opisująca intensywność generacji nowych memów na podstawie istniejących oczywistości E.

Stałe k, Θ, λ opisują odpowiednio intensywność procesu generacji nowych memów na podstawie istniejących memów M, intensywność procesu asymilacji nowych memów (sprowadzania ich do starych memów) oraz intensywność usuwania nowych memów (uznawania ich za tradycyjne, tj. stare).

Zaprezentowane równanie opisuje, jak powstają i rozprzestrzeniają się memy w niszy społeczno–kulturowej. Jeżeli przyjąć oznaczenia: $T = k\ M$ oraz $T_c = \Theta C$, to można w prosty sposób przeprowadzić analizę przedstawionego modelu. Współczynnik T określa zdolności akceptacji nowych memów w systemie, a T_c odpowiada tendencjom zachowawczym w systemie memów. Wykorzystując terminologię Wallsa autor podaje, że można zinterpretować T jako *temperaturę niszy kulturowej*, natomiast T_c jako *temperaturę krytyczną*. Interpretacje takie pozwalają intuicyjnie uchwycić jakościowe różnice pomiędzy różnymi systemami memów. Analiza matematyczna modelu prowadzi m.in. do wniosku, że dla temperatury T, mniejszej niż temperatura krytyczna T_c, w danej grupie akt twórczy pozostaje bez odzewu — przyrost nowych memów nie zależy od niego. Innymi słowy, w takim stanie grupy społecznej żadna nowa idea nie jest w stanie zapłodnić umysłów jej członków tak, aby stworzyli nowe, płodne idee. Z drugiej strony, przekroczenie temperatury krytycznej przez grupę powoduje szybkie rozprzestrzenianie się wyników aktu twórczego. Od strony jakościowej taki model wydaje się bardzo dobrze opisywać oddziaływanie nowych, twórczych idei na zachowanie pewnych grup społecznych — jeżeli idea pada na nieurodzajny grunt, to nie daje żadnych owoców. Jeśli zaś padnie na podatny grunt, to wywołuje „twórcze wrzenie”, owocuje ożywieniem badań, a w ostateczności — pewną liczbą nowych, płodnych idei. Podany model pozwala zrozumieć, jak może funkcjonować zjawisko przekraczania „masy krytycznej wiedzy” w rozwoju nauki. Historia rozwoju nauki pokazuje, że wiele odkryć było wręcz nieuniknionych z powodu nagromadzenia inspirujących idei[129].

Model zaprezentowany przez Puricę opisuje interesujący aspekt rozwoju nauki — wrażliwość społeczności uczonych na nowe idee. Podejście takie jest zbliżone do zaproponowanego przy okazji omawiania modeli epidemicznych. Istotna różnica wynika jednak z tego, że Purica koncentruje się na zagadnieniu kreatywności.

Zaprezentowane podejście budzi różne wątpliwości. Model opiera się na dosyć dowolnych, niekiedy wręcz ideologicznych założeniach. Rzutują one w sposób istotny na otrzymywane wnioski. Poważnym mankamentem jest również brak wskazówek, w jaki sposób można testować empirycznie model. Purica wykorzystuje także pewne analogie do teorii katastrof, nie dając jednak żadnego dowodu na to, że analogie takie występują w rzeczywistości. Niemniej model ten jest interesującą próbą zmierzenia się z problemem ujęcia dynamiki twórczości. Próba ta oraz podobne[130] pokazują, że zagadnienia takie, jak tworzenie nowości w systemie wiedzy, dają się w pewien sposób analizować poprzez zastosowanie układów dynamicznych. Otwarte pozostaje pytanie, w jaki sposób uniknąć przyjmowania wątpliwych założeń Puricy.

---

[129] Jako przykład przytoczmy tu prace nad opracowaniem szczególnej teorii względności (STW). Równolegle i niezależnie od siebie były prowadzone prace przez wielu badaczy. Wiemy, że jeśli Einstein nie podałby swojego rozwiązania, mógłby to uczynić w niedługim czasie np. Poincaré.

[130] Zob. np. I. Purica, „Creativity, intelligence and synergetic processes in the development of sience”, *Scientometrics*, 13 (1988), 11–24.

2.6. Podsumowanie

Zaprezentowane modele rozwoju nauki o złożonej dynamice pokazują, że ich rozwój napotyka na istotne ograniczenia. Pierwsze wynika z natury tych modeli — w większości nie posiadają one rozwiązań algebraicznych. Rozwój metod symulacyjnych i nowoczesnych matematycznych metod badania układów dynamicznych pozwoliły na postęp w badaniach tych układów. Drugą barierę w rozwoju struktur tych modeli stanowią problemy wiążące się z estymacją parametrów. Ograniczenie skutkuje tym, że modele posiadające zbyt dużo parametrów trudno poddać testom empirycznym. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie nieliniowych modeli dynamicznych, które posiadają prostą strukturę (czyli zawierają niewielką liczbę parametrów) i wykazują jednocześnie złożone zachowanie. Jak wskazują zgromadzone informacje, obecnie najbardziej obiecującymi modelami są modele z przesuniętym parametrem. W związku z tym w następnym rozdziale przyjrzymy się dokładniej próbie praktycznego wykorzystania jednego z takich modeli.

3. Przykład analizy naukometrycznej

Po przedstawieniu różnych dynamicznych modeli rozwoju nauki przyjrzyjmy się bliżej pewnemu przykładowi zastosowania metod naukometrycznych do analizy rozwoju nauki. Przedstawiona zostanie analiza rozwoju logiki formalnej na podstawie bibliografii Churcha. Jako uzupełnienie zaprezentowane zostaną wyniki dotyczące rozwoju matematyki, uzyskane na podstawie danych z komputerowej bazy danych *Zentralblatt MATH*. Takie studium konkretnego przypadku pozwoli lepiej przybliżyć opisywaną uprzednio ideę modelowania rozwoju nauki. Z racji charakteru niniejszego opracowania zaprezentowana analiza statystyczna zredukowana została do niezbędnego minimum[131]. Będzie ono również punktem odniesienia podczas dyskusji nad przydatnością modeli naukometrycznych dla filozofii nauki.

3.1. Źródło danych — bibliografia Churcha

Ogólne informacje o bibliografii Churcha

Jako źródło danych empirycznych przyjmujemy dane o liczbie publikacji zawartych w bibliografii Churcha. Jest to wykaz prac z logiki symbolicznej, zestawiony przez amerykańskiego matematyka i logika Alonzo Churcha[132]. Bibliografia ta została opublikowana w dwóch czę-

[131] Celem niniejszych przykładów jest wprowadzenie w tematykę modelowania rozwoju nauki i ukazanie pewnych ogólnych prawidłowości, które można zaobserwować przy pomocy podstawowej analizy danych. Oczywiście uzupełnienie zaprezentowanych badań o rozbudowaną analizę statystyczną jest konieczne do potwierdzenia postawionych hipotez. Zadanie to, ze względu na swój zakres, będzie tematem innej pracy.

[132] A. Church, „A bibliography of symbolic logic”, *The Journal of Symbolic Logic*, 1 (1936), 121–218 oraz uzupełnienia i korekty: A. Church, „Additions and corrections to *A bibliography of symbolic logic*”, *The Journal of Symbolic Logic*, 3 (1938), 178–192 (wyłączając indeks rzeczowy).

ściach: pierwsza zawiera główny zbiór danych bibliograficznych, natomiast druga zawiera korekty i uzupełnienia. Bibliografia Churcha obejmuje okres od roku 1666 (rok opublikowania pierwszej pracy Leibniza) do roku 1935, czyli obejmuje 270 lat.

We wstępie Church zaznacza, że jego praca powstała na bazie istniejących wcześniej bibliografii z logiki symbolicznej: *Symbolic logic* Venna, *Vorlesungen über die Algebra der Logik* Schrödera, *A survey of symbolic logic* Lewisa, *Royal Society index*, *International catalogue of scientific literature*. Church wykorzystał również czasopisma *Jahrbuch über die Fortschritte der Mathematik*, *Zentralblatt für Mathematik und ihre Grenzgebiete*, a także wiele bibliografii poszczególnych autorów lub poszczególnych zagadnień. Wykorzystał również metodę przeszukiwania spisów treści wolumenów, poszukiwania prac cytowanych w odnośnikach oraz informacje uzyskane od samych autorów. Jeśli to było możliwe, każda z prac (lub jej kopia) były sprawdzane przed włączeniem ich do bibliografii(!). W pozostałych przypadkach, gdy uzyskanie pracy lub jej kopii było niemożliwe, sprawdzano różne źródła informacji, aby uniknąć błędów[133]. Przy opracowaniu dodatków i korekt Church korzystał z pomocy trzech naukowców: A. Korcika (opracowanie 60 prac w języku polskim i rosyjskim), A. Fraenkla (ok. 25 prac) i H. Scholza (10 prac). Przy różnych pracach nad bibliografią brali udział również: R. Carnap, L. Chwistek, C. A. Kleene, E. Nagel, W. V. O. Quine i inni[134]. Powyższe informacje dają wyobrażenie o skali przedsięwzięcia, jakim było opracowanie omawianego zestawienia. Pozwalają one również twierdzić, że jest to najpełniejsza bibliografia prac z logiki symbolicznej za okres 1666–1935.

Wyjątkowość tego zestawienia polega również na tym, że Church, będąc ekspertem w tej dyscyplinie, dokonał trzystopniowej klasyfikacji prac ze względu na ich znaczenie. Podzielił prace na zwykłe (bez żadnych oznaczeń) oraz specjalnie interesujące lub o specjalnym znaczeniu (oznaczył je jedną gwiazdką). Pośród tych ostatnich wydzielił dodatko-

[133] Por. A. Church, „A bibliography...”, s. 121.
[134] Por. A. Church, „Additions and corrections ...”, s. 178.

wo niewielką liczbę prac, zawierających nowe idee o znaczeniu fundamentalnym, które oznaczył dwiema gwiazdkami. Jak zauważył Church, często zamiast jednej pracy zawierającej odkrywczą ideę, w bibliografii pojawia się zespół kilku prac oznaczonych jedną gwiazdką. Oznacza to sytuację, że ewolucja problemu była bardziej złożona i nie można było jednoznacznie wyodrębnić tylko jednej pracy zasługującej na miano przełomowej[135]. Idąc za tą wskazówką Churcha, w dalszej części przyjmiemy jedynie podział dwustopniowy na prace zwykłe i istotne. Te ostatnie zawierać będą prace oznaczone jedną lub dwiema gwiazdkami. Wydaje się, że taki podział jest bardziej adekwatny i pozwala na ominięcie wspomnianej trudności. Dodajmy, że Church zastrzegł, iż przyjęty przez niego podział „reprezentuje nic więcej, jak tylko własną opinię zestawiającego bibliografię”[136]. Jeżeli jednak weźmiemy pod uwagę fakt, że Church był wybitnym specjalistą w dziedzinie logiki, to można stwierdzić, że przeprowadzona klasyfikacja jest znakomitym przykładem oceny eksperckiej. Zalety i wady tej metody oraz innych metod określania prac istotnych omówimy w dalszej części pracy.

Warto jeszcze wspomnieć, że Church starał się ograniczyć bibliografię jedynie do prac z logiki symbolicznej. Zdefiniował ją jako „formalną strukturę twierdzeń i rozumowań dedukcyjnych badanych za pomocą metody symbolicznej”[137]. Jak jednak celnie zauważył, nie da się w sposób jednoznaczny wytyczyć granicy między logiką symboliczną a czystą matematyką z jednej strony oraz czystą filozofią z drugiej strony. O ile wykluczone zostały prace z logiki „tradycyjnej” (arystotelesowskiej), to uwzględniono prace dotyczące podstaw matematyki (paradoksy Burali–Fortiego i Russella, intuicjonizm, itp.)[138] oraz aksjomatycznej teorii zbiorów Zermelo, jak również *Tractatus logico–philosophicus* Wittgensteina (281.2)[139] i *Logic der Forschung* Poppera ($537\frac{1}{2}$.1).

[135] Por. A. Church, „A bibliography…”, s. 122.
[136] Por. tamże, s. 122.
[137] Tamże, s. 121.
[138] Por. tamże, s. 121.
[139] Church stosował następującą notację: „[numer autora].[numer pracy]”. Pozwa-

Zawartość bibliografii Churcha

Bibliografia Churcha zawiera informacje o 2196 pracach z logiki symbolicznej napisanych przez 617 autorów[140] oraz o 63 tłumaczeniach prac z tej dziedziny. Razem daje to 2259 wpisów bibliograficznych[141].

Bibliografia zestawiona jest według autorów w kolejności chronologicznej — brano pod uwagę datę pierwszej publikacji pracy. Każdy z wpisów zawiera pełne dane bibliograficzne, tj. tytuł pracy (dla czasopism dodatkowo tytuł czasopisma i wolumen), dane o wydawcy (w przypadku książek), miejsce i rok wydania, numery stron lub liczba stron pracy. Zamieszczone zostały również informacje o kolejnych wydaniach opisywanej pracy. W wielu przypadkach dodatkowo zostały zamieszczone cytaty z oryginału (z zachowaniem języka orygniału) dotyczące głównego problemu, poruszanego w pracy. Zestawienie obejmuje prace napisane w 16 językach, w tym również w języku łacińskim, polskim, czeskim, węgierskim, duńskim, szwedzkim, greckim, japońskim. Tytuły napisane w mniej znanych językach przetłumaczone zostały na język angielski i podane w nawiasach obok tytułów oryginalnych. O wysokiej jakości opracowania Churcha świadczy fakt, że odnotować można bardzo małą liczbę pomyłek językowych i typograficznych w oryginalnych tytułach i cytatach oraz bardzo trafne przekłady tytułów na język angielski.

---

la ona na szybką i jednoznaczną identyfikację każdej pracy. Pojawiają się niekiedy numery złożone, np. 137.8.1 (tłumaczenie *Science et méthode* (1908) Poincarégo). Oznaczają one prace dodane w „Additions and corrections. . . ”. Analogicznie ułamkowe numery autorów (np. $537\frac{1}{2}$.1 — Popper) oznaczają autorów dodanych w tej części bibliografii.

[140] W tej liczbie 12 osób występuje tylko jako współautorzy, tzn. tacy autorzy, którzy nie opublikowali samodzielnie żadnej pracy z logiki symbolicznej.

[141] Średnia liczba prac na jednego autora dla danych zawartych w bibliografii Churcha wynosi zatem 3.56 (bez tłumaczeń). Zgadza się ona bardzo dobrze z wartością obliczoną przez Price'a na podstawie prawa Lotki, która wynosi 3.55 (por. D. J. de Solla Price, *Mała Nauka – Wielka Nauka*, PWN, Warszawa 1967, ss. 48–49. Uwaga! W powyższym wydaniu książki Price'a podano błędne zaokrąglenie tej wartości).

Opracowanie Churcha ma jednak pewne wady. W kilku przypadkach nie udało się zidentyfikować autorów: 16 prac opublikowanych w latach 1851–1934 zostało zebranych i zgrupowanych przy anonimowym autorze 548. (ANONYMOUS). W innych przypadkach dostępna była tylko jedna litera inicjału (autorzy numer: 142, 224, 283, 312) lub cały inicjał (208, 541, 139, 488). Rodzi to podejrzenie, że liczba autorów może być nieco zawyżona, bowiem w najgorszym przypadku osoby z inicjałami lub nierozpoznane mogły zostać ujęte dwa razy w spisie. Można również odnaleźć przykład wskazujący, że Church popełnił błąd rozdzielając autorów nr. 251 (Zaremba Stanisław) i nr. 404 (Zaremba S. K.)[142]. Przeprowadzona analiza zawartości bibliografii wskazuje, że są to jedyne błędy tego typu. Ponadto pojawiają się niekiedy braki w danych bibliograficznych. Dla przykładu można podać brak daty publikacji przy wpisie 137.16 (jest to angielskie tłumaczenie *Science at méthode* (1908) Poincarégo).

Dane zebrane w bibliografii Churcha pozwalają zwykle na jednoznaczną identyfikację roku publikacji pracy. Jako datę pojawienia się pracy (udostępnienia jej dla świata nauki) przyjmowano datę pierwszej publikacji[143]. Niestety, w przypadku prac publikowanych w czasopi-

[142] Przy liczeniu autorów traktuję oba wpisy jako dotyczące tej samej osoby, co zmniejszyło ogólną liczbę autorów do 617 osób.

[143] W przypadku odczytów dysponujemy często dokładną datą ich wygłoszenia, która może być uważana za moment udostępnienia idei zawartych w pracy dla innych naukowców. W związku z niekompletnością informacji o datach odczytów zdecydowałem się na pominięcie tej informacji i ujednolicenie kryteriów ustalania daty ukazania się pracy. Można więc powiedzieć, że rozważamy *datę publikacji*.

Problem określenia momentu, od którego rozpoczyna się oddziaływanie pracy na innych badaczy, jest bardzo skomplikowany. Wiąże się on z nieformalnym obiegiem informacji w świecie nauki. Ze względu na duże opóźnienia przesyłania informacji kanałami formalnymi (czasopisma, książki, konferencje) powstają samorzutnie struktury zwane *niewidzialnymi zespołami* (*invisible colleges*). Opierają się one na osobistych znajomościach uczonych i bezpośrednich wymianach informacji między nimi. Współczesna technika, a zwłaszcza poczta elektroniczna, pozwala na to, aby członkowie takich zespołów mogli współpracować, przebywając nawet w bardzo odległych częściach świata. Na marginesie warto zauważyć, że poczta elektroniczna została wysmach, których tomy obejmują więcej niż jeden rok, nie posiadamy pełnej informacji o roku wydania, a jedynie informację o okresie, który obejmuje dany tom czasopisma. Opisany problem dotyczy 238 prac, co stanowi 10,5% ogólnej ich liczby. W tym przypadku postanowiłem przyjąć, że ostatni rok obejmowany przez tom jest rokiem publikacji danej pracy. Podstawą przyjęcia takiego założenia było stwierdzenie, że w tej sytuacji mamy pewność, iż w roku przyjętym jako rok publikacji praca była już na pewno udostępniona światu naukowemu. Założenie to pozwala również na zminimalizowanie błędu wynikającego z nieznajomości dokładnej daty publikacji pracy.

W celu obróbki tak dużej liczby danych zostały one przepisane do komputerowej bazy danych. Umieszczone zostały w niej informacje o autorze, roku wydania i statusie pracy. Dodatkowo zamieszczone zostały informacje o tym, czy praca jest tłumaczeniem i czy można jednoznacznie ustalić rok publikacji. Baza danych została zweryfikowana przy użyciu kilku metod. Dzięki wykorzystaniu komputerowej bazy danych możliwe jest łatwe uzyskiwanie różnych zestawień danych (kwerend), pozwalające zaprezentować zgromadzone dane pod kątem różnych aspektów ilościowych.

---

myślona właśnie przez naukowców i dla naukowców, a dokładnie — dla komunikacji naukowej. Jest więc ona ubocznym skutkiem rozwoju niewidzialnych zespołów.

Problem niewidzialnych zespołów był przedmiotem wielu studiów naukoznawczych (zob. np. W. W. Nalimow, Z. M. Mulczenko, *Naukometria*, WNT, Warszawa 1971). Wydaje się, że śledzenie wymiany informacji w takich strukturach jest niemożliwe na większą skalę ze względu na nieformalny jej charakter. Niemniej historykom nauki udaje się niekiedy zrekonstruować na podstawie zachowanej korespondencji, zapisków i relacji pewne fragmenty takiej współpracy. Nasuwającym się przykładem jest doskonale znana historia sformułowania ogólnej teorii względności. Pomimo licznych trudności, prowadzone są intensywne badania naukoznawcze nad tym zagadnieniem. Rola niewidzialnych kolegiów wydaje się być coraz bardziej znacząca. Tezę tę w wersji radykalnej głosił np. D. J. de Solla Price. Pisał on: „Obecnie staramy się komunikować osobiście, a nie przez publikowanie prac. [...] Prestiżu i uznania ze strony innych badaczy szuka się w ekskluzywnych grupach uznanych i godnych współpracowników. Publikujemy dla małej grupy [...]. Tylko wtórnie i z tradycyjnego bezwładu publikujemy na użytek nauki światowej” (D. J. de Solla Price, *Mała Nauka...*, ss. 66–87).

Na podstawie informacji zawartych w bazie można określić liczbę prac opublikowanych w danym roku. Można też pośrednio określić ilu autorów opublikowało pracę w danym roku. Otrzymujemy w ten sposób zależności liczby prac lub liczby autorów od roku (lata z przedziału 1666–1935). Są to dane dyskretne (nieciągłe), przy czym zastosowana jest w nich podwójna dyskretyzacja: czasu i wartości. Dyskretyzacja czasu wynika z tego, że w danych o publikacji prac podawany jest tylko numer roku. Czas publikacji znamy więc tylko z dokładnością do 1 roku. W związku z tym okres 1 roku jest naturalnym okresem dyskretyzacji czasu, który przyjmujemy dla rozważanych danych. Dyskretyzacja wartości wynika natomiast z tego, że zliczamy liczby prac, które wyrażają się zawsze liczbami naturalnymi. Jest to więc zmienna nieciągła.

Do badań naukometrycznych najczęściej przyjmuje się skumulowaną liczbę prac[144] (całkowitą liczbę prac). Jest to liczba wszystkich prac w interesującej nas dziedzinie, które ukazały się do danej chwili. Wartości skumulowanej liczby prac obliczano według następującego algorytmu:

1. Wartość początkowa jest równa liczbie publikacji w pierwszym z kolei roku.

2. Dla każdego następnego roku skumulowana liczba prac jest zwiększana o liczbę prac opublikowanych w danym roku. Jeżeli nie opublikowano w danym roku żadnej pracy, to skumulowana liczba prac nie ulega zmianie.

W wyniku zastosowania przedstawionego algorytmu, skumulowana liczba prac jest również zmienną dyskretną z analogiczną podwójną dyskretyzacją czasu i wartości. Zastosowany algorytm sprawia, że okres dyskretyzacji czasu wynosi również 1 rok.

[144] Podejście takie propagował m.in. Derek de Solla Price. Zob. np. *Mała Nauka...*, ss. 14–20 oraz *Węzłowe problemy nauki*, PWN, Warszawa 1965, ss. 97–98.

W ten sposób na podstawie bazy danych z bibliografią Churcha opracowano skumulowaną liczbę wszystkich prac. Wykorzystując dodatkowe informacje zawarte w bibliografii Churcha możliwe stało się również wyznaczenie skumulowanej liczby prac istotnych[145].

Analiza tłumaczeń zawartych w bibliografii Churcha

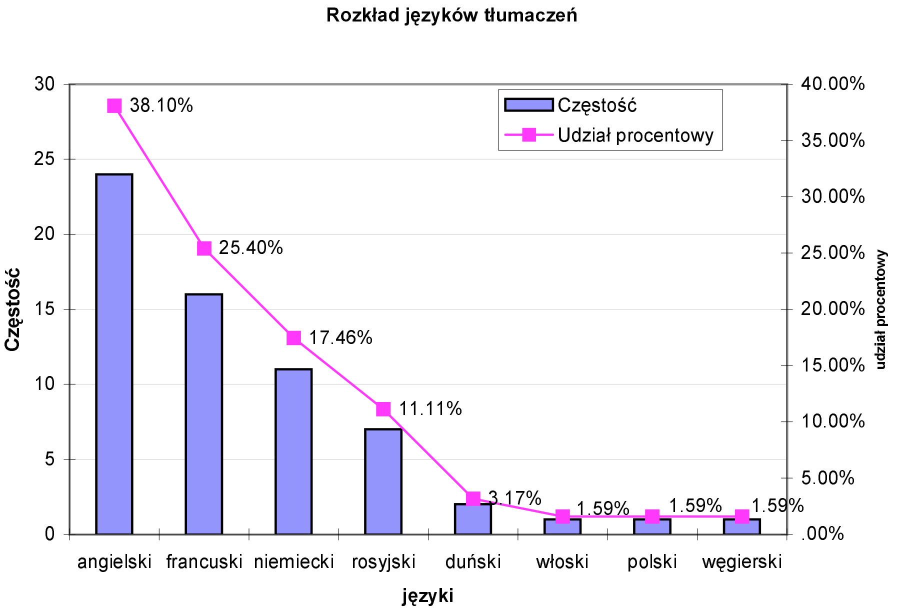
Istotnym problemem przy analizie danych z bibliografii Churcha było rozstrzygnięcie statusu tłumaczeń. Jak już zostało powiedziane, w spisie oprócz oryginalnych prac zostały uwzględnione 63 tłumaczenia. W tym celu konieczne było wykonanie analizy tłumaczeń, która dostarczyła wielu interesujących informacji o charakterze prac w logice symbolicznej, zachowaniach naukowców i o samej bibliografii.

Analiza pokazała, że dokonywanie tłumaczeń było procesem skomplikowanym. Często dokonywano tłumaczenia jednej pracy na kilka języków, ale niekiedy tłumaczono jedynie części danej pracy i tworzono z nich kilka odrębnych prac. Na przykład na podstawie *Grundgesetze der Arithmetik* (1903) Gottloba Fregego powstały trzy artykuły z tłumaczeniami angielskimi, traktowane w bibliografii Churcha jako osobne prace: *The fundamental laws of arithmetic* (1915), *The fundamental laws of arithmetic: Psychological logic* (1916), *Class, function, concept, relation* (1917). Najbardziej skomplikowany przypadek stanowią tłumaczenia słynnego dzieła Poincarégo *Science et méthode* (1908). Na jego podstawie powstało tłumaczenie na język rosyjski (numer w bibliografii Churcha: 133.7), następnie na polski (137.8.1). Później na bazie tłumaczeń fragmentów powstały trzy artykuły w języku angielskim (prace 137.10, 137.11, 137.12). Następnie dokonano przekładu książki na język niemiecki (137.15), by w końcu dokonać tłumaczenia całej pracy na język angielski (137.16).

Warto zauważyć, że jedynie trzy prace, oznaczone *ex post* przez Churcha jako istotne, zostały przetłumaczone, z czego dwie na język

[145] Przypomnijmy, że została przyjęta konwencja mówiąca, iż są to prace oznaczone gwiazdką lub dwiema gwiazdkami w bibliografii Churcha.

angielski, a jedna na francuski[146]. Jeżeli przyjmiemy, że tłumaczone są głównie ważne prace (lub wyglądające na ważne), to powyższe spostrzeżenia sugerują, że ocena wartości pracy w chwili jej pojawienia się może różnić się znacznie od oceny dokonanej z pewnej perspektywy.



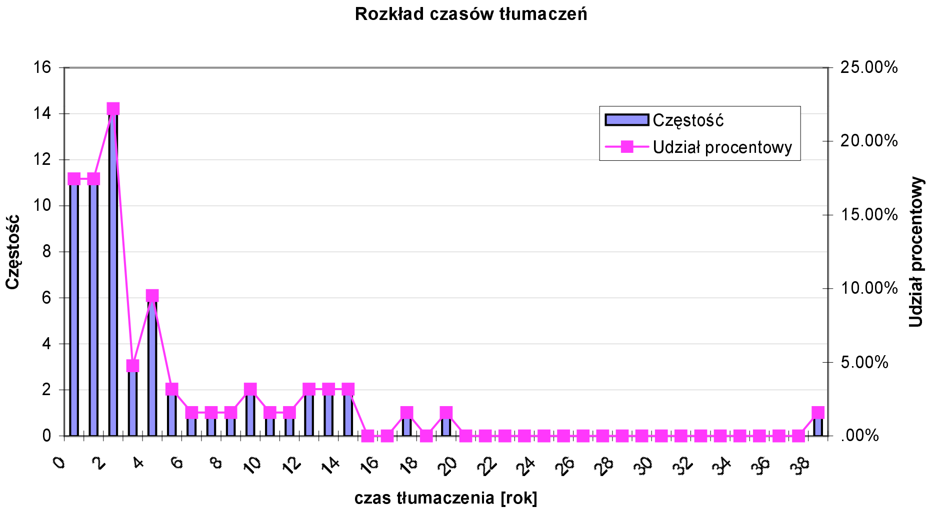
Rys. 6. Rozkład częstości występowania i udział procentowy danych języków w tłumaczeniach prac z logiki symbolicznej objętych bibliografią Churcha

Analiza rozkładu występowania języków tłumaczeń[147] pokazuje (rys. 6), że najwięcej tłumaczeń dokonywanych było na języki kongresowe: angielski, francuski, niemiecki i rosyjski (w sumie 92%). W tym tłumaczenia na język angielski i francuski stanowią prawie 2/3 wszyst-

[146] Są to dwie prace Hilberta: *Über die Grundlagen der Logik und der Arithmetik* (1905) i *Über das Unendliche* (1926) oraz jedna praca Brouwera *Intuitionisme en formalisme* (1912).

[147] Przy określaniu języka, na który została przetłumaczona praca, wykorzystano uwagi Churcha zawarte w bibliografii.

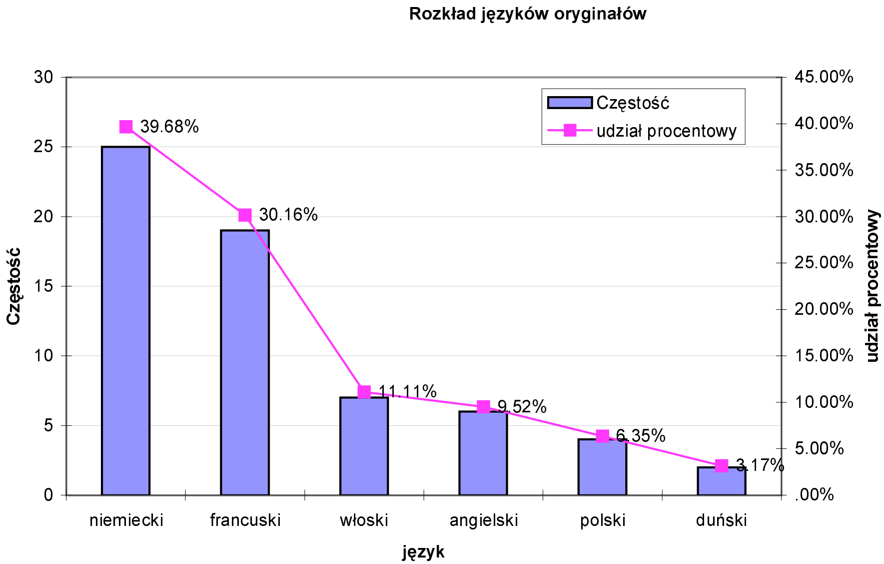
kich tłumaczeń (63.5%). Informacje te potwierdzają tezę, że tłumaczenia dokonywane były głównie w celu udostępnienia interesujących prac jak najszerszemu gronu naukowców pracujących aktualnie w danej problematyce.



Rys. 7. Rozkład czasów tłumaczeń dla publikacji z bibliografii Churcha

Tezę tę potwierdzają również inne charakterystyki tłumaczeń. Średni czas tłumaczenia[148] wynosi $\bar{T} = 5$ lat, a odchylenie standardowe średniej (błąd standardowy średniej) $\sigma = 6.37$ roku. Duża wartość σ oznacza, że rozrzut okresów tłumaczenia jest duży. Wykres rozkładu czasów tłumaczenia (rys. 7) pokazuje, że 2/3 tłumaczeń wykonano w czasie nie przekraczającym 3 lat, a dodatkowo 22.2% prac zostało przetłumaczonych już w roku pierwszej publikacji. Jak widać, dominowały tłumaczenia wykonywane szybko, co może odzwierciedlać duże zainteresowanie tłumaczonymi pracami.

[148] Jest on liczony jako różnica między rokiem opublikowania pracy oryginalnej a rokiem opublikowania jej tłumaczenia. W niektórych przypadkach różnica ta jest równa zeru, co znaczy, że praca i jej tłumaczenie zostały opublikowane w tym samym roku.



Rys. 8. Rozkład częstości występowania i udział procentowy danych języków w pracach z logiki symbolicznej, które zostały przetłumaczone na inne języki (na podstawie bibliografii Churcha)

Z kolei warto zadać pytanie, z jakich języków dokonywano przekładów (rys. 8). Okazuje się, że blisko 70% tłumaczeń zostało dokonanych z języka niemieckiego i francuskiego. Porównując tę informację z poprzednim wykresem (rys. 6) można zauważyć, że większość tłumaczeń dokonywała się między trzema językami: angielskim, francuskim i niemieckim. Interesująca jest obserwacja, że w omawianym okresie prowadzono dużo tłumaczeń na język angielski, przy bardzo niskiej liczbie tłumaczeń z tego języka.

Powyższe wnioski wskazują, że nie należy wykluczać tłumaczeń z liczby prac z logiki symbolicznej. Jednocześnie interesujące może być osobne zbadanie, jak rozwijała się skumulowana liczba tłumaczeń.

Warto również zwrócić uwagę na wkład polskich badań, mierzony stopniem przekładów. Ponad 6% przekładów dokonano z języka polskiego, co plasuje język polski na piątym miejscu (tuż za językami kongresowymi). Jest to zasługą prac takich naukowców jak: Leśniewski (2 prace tłumaczone) oraz Tarski i Zawirski (obaj po jednej pracy).

3.2. Ograniczenia empiryczne

Podstawowy problem przy zbieraniu danych o ilościowym rozwoju nauki wynika z eksponencjalnego charakteru wzrostu nauki[149]. Cechą charakterystyczną takiego wzrostu jest gwałtowne zwiększanie się badanej wielkości wraz ze wzrostem czasu. W rozpatrywanych przez nas przypadkach prowadzi to do sytuacji, w której przy zliczaniu prac w dłuższym okresie czasu ich liczba rośnie gwałtownie, co uniemożliwia ich „ręczne” zliczanie. Okazuje się, że w takich przypadkach nie można bazować już na tradycyjnych katalogach albo bibliografiach, ponieważ ich zakres jest zwykle zbyt wąski, a ich przeglądnięcie zabiera ogromnie dużo czasu.

Problem ten zilustrujmy następującym przykładem: baza bibliograficzna prac z matematyki *Zentralblatt MATH*[150] zawiera informacje o 2 279 434 pracach opublikowanych w latach 1868–2003. Jeżeli dane te zgromadzone byłyby w tradycyjnym katalogu kartkowym, to samo przekartkowanie katalogu w tempie 1 fiszka na sekundę zajęłoby około 633 godziny, czyli około 26 dni ciągłej pracy. Przykład ten pokazuje, że jednym z ważnych ograniczeń badań naukometrycznych jest problem gromadzenia i przetwarzania danych. Obecnie jedyną rozsądną perspektywą pozostaje praca z komputerowymi bazami bibliograficznymi.

Można zadać pytanie, dlaczego tak ważne jest zbieranie danych o rozwoju nauki w długich przedziałach czasowych. Po pierwsze, duża ilość danych uwiarygodnia wszelkie statystyczne metody badania (np. estymację parametrów modelu). Co za tym idzie, wnioski dotyczące opracowywanego modelu obarczone są mniejszą niepewnością. Te same powody nie pozwalają badać nauki jedynie w początkowych fazach wzrostu, ale wymagają, aby maksymalnie przedłużać obserwacje — można rozsądnie założyć, że przypadkowe błędy przy małej licz-

[149] Zgromadzone dane przekonująco świadczą, że wszystkie badane przykłady charakteryzują się (w pewnym przybliżeniu) eksponencjalnym tempem wzrostu z dodatnim wykładnikiem przy eksponencie.

[150] Opis tej bazy znajduje się na stronie 96 niniejszej pracy.

bie prac dają większy rozrzut statystyczny[151]. Po drugie, większa liczba danych pozwala na zaobserwowanie długookresowych zależności. Można podejrzewać, że w nauce powinny występować również długookresowe cykle wzrostu. Jedyna metoda sprawdzenia tej hipotezy polega na badaniu odpowiednio długiego szeregu czasowego reprezentującego rozwój nauki. Istnieją również pewne metody badania układów dynamicznych, jak na przykład metoda rekonstrukcji atraktora za pomocą współrzędnych opóźnionych Takensa[152]. Wymagają one dużego zestawu danych, aby wychwycić pewne charakterystyki procesu. Jest również rzeczą oczywistą, że poszukujemy modelu, który może opisywać zachowanie nauki w jak najdłuższej perspektywie (w przypadku idealnym poszukujemy modelu, który opisywałby rozwój nauki w nieskończonej perspektywie czasowej). Argumenty te wskazują wyraźnie na istotną rolę długich obserwacji rozwoju nauki.

Jak zostało powiedziane, zbieranie danych o rozwoju nauki w długich okresach czasowych jest koniecznością wynikającą z natury tych danych i z natury statystycznych metod analizy. Powstaje zatem bardzo ważny problem praktyczny: jak zebrać i przetworzyć ogromne ilości danych. Wydaje się, że jedynym sensownym rozwiązaniem jest zaproponowane powyżej wykorzystywanie komputerowych baz danych, opracowywanych przez wyspecjalizowane zespoły dokumentacji informacji naukowej. Istnieje wiele takich baz danych, dla przykładu podajmy najbardziej znane:

1. *SCI–Expanded*[153] prowadzona przez ISI (*Institute of Scientific Information*) obejmująca dane z około 5300 czasopism, gromadzone od 1996 roku;

---

[151] Nieuwzględnienie jednej pracy przy ogólnej liczbie 10 prac daje znacząco większy błąd niż nieuwzględnienie jednej pracy przy 1 milionie wszystkich prac.

[152] Por. np. G. L. Baker, J. P. Gollub, *Wstęp do dynamiki układów chaotycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998, ss. 142–155.

[153] *Science Citation Index – Expanded*, więcej informacji na temat tej bazy można znaleźć pod adresami: `<http://zatoka.icm.edu.pl/sci/index.html>` oraz `<http://www.isinet.com/>`.

2. *Inspec*[154] jest bazą bibliograficzno–abstraktową opracowywaną przez Institute of Electrical Engineering (IEEE), obejmująca dane z fizyki, elektroniki, elektrotechniki, informatyki i innych dziedzin. Zawiera ona ponad 7 milionów rekordów pochodzących z ponad 4200 czasopism, książek, raportów naukowych, materiałów konferencyjnych oraz dysertacji. Dane gromadzone są od 1966 roku;

3. *Zentralblatt MATH*[155] jest najbardziej kompletną i najdłużej działającą bazą danych abstraktów i przeglądów z czystej i stosowanej matematyki. Zawiera ona ponad 2 miliony wpisów opracowanych na podstawie 2300 czasopism i periodyków. Obejmuje okres od 1868 roku do chwili obecnej. Wpisy są sklasyfikowane tematycznie według schematu MSC 2000 (*Mathematics Subject Classification Scheme*).

Rozwiązanie takie posiada jednak istotne ograniczenie: okres gromadzenia informacji w bazach nie przekracza 50 lat[156], jest więc on stosunkowo krótki dla stosowania metod statystycznych. W obecnej chwili należy traktować wspomniane ograniczenie jako *istotne ograniczenie empiryczne* badań nad dynamiką nauki. Szczególną cechą tego ograniczenia jest to, że wraz z upływem czasu jego rola będzie maleć. W omawianej sytuacji nasuwa się co prawda jeszcze jedno rozwiązanie: uzupełnić istniejące bazy danych o wcześniejsze informacje. Jest to jednak zadanie niezwykle trudne do wykonania ze względu na konieczność utrzymania stałych kryteriów organizacji danych[157]. Należy

[154] Zob. *Inspec*, 30.11.2004, <`http://zatoka.icm.edu.pl/ovidweb`>.

[155] Zob. *Zentralblatt MATH*, 30.11.2004, <`http://www.emis.de/ZMATH/`>.

[156] Z wyjątkiem bazy ZMATH. Jak mi wiadomo, jest to jedyna komputerowa baza obejmująca tak długi okres czasowy i zawierająca dane z tak szerokiej dziedziny. Można co prawda spotkać bibliografie bardzo szczegółowych zagadnień, które obejmują dosyć długie okresy, lecz ze względu na szczegółowość zagadnienia zawierają one niewiele prac w porównaniu z bazą ZMATH.

[157] Podstawowym problemem jest decyzja, które prace włączyć do danej dyscypliny (specjalności, zagadnienia), a które wykluczyć.

zauważyć, że łączenie danych zbieranych pod różnymi kryteriami może prowadzić do błędnych wniosków odnośnie dynamiki ich rozwoju. W chwili obecnej to drugie ograniczenie ma więc *charakter techniczny*.

Podsumowując możemy stwierdzić, że obecnie badania modeli naukometrycznych są w pewien sposób ograniczane ze względu na problemy z pozyskiwaniem danych empirycznych. Można mieć nadzieję, że upływ czasu pozwoli pokonać ograniczenia techniczne i uzupełnić bazy danych o informacje z początkowych okresów rozwoju dyscyplin naukowych. Równocześnie można mieć pewność, że o ile nauka będzie nadal trwać, to upływ czasu będzie dawać coraz szerszy obraz jej historycznego rozwoju. Trzeba jednak podkreślić, że pomimo podanych ograniczeń badania naukometryczne możliwe są już obecnie. Wydaje się także, że mamy już wystarczająco dużo danych, aby próbować tworzyć modele, które stosunkowo dokładnie opisują rzeczywisty rozwój nauki.

Przytoczone trudności wskazują również na kolejny, wyjątkowy aspekt danych zebranych w bibliografii Churcha. Spis ten obejmuje bowiem okres aż 270 lat (dla wielu nowych dyscyplin, jak np. biologii molekularnej, czy kosmologii relatywistycznej, jest to okres obecnie nieosiągalny). Z drugiej strony wspomniana bibliografia zawiera niewielką liczbę prac w stosunku do okresu, w jakim były one zbierane. Wynika to ze szczególnej cechy badań na gruncie formalnym: okres powstawania i publikacji prac jest o wiele dłuższy niż w innych dziedzinach nauki, w związku z tym tempo wzrostu liczby prac z logiki symbolicznej jest stosunkowo niskie. Dla porównania: średni okres podwojenia[158] liczby prac z logiki symbolicznej, wyznaczony na podstawie danych z bibliografii Churcha, wynosi około 28 lat. Okres ten dla lite-

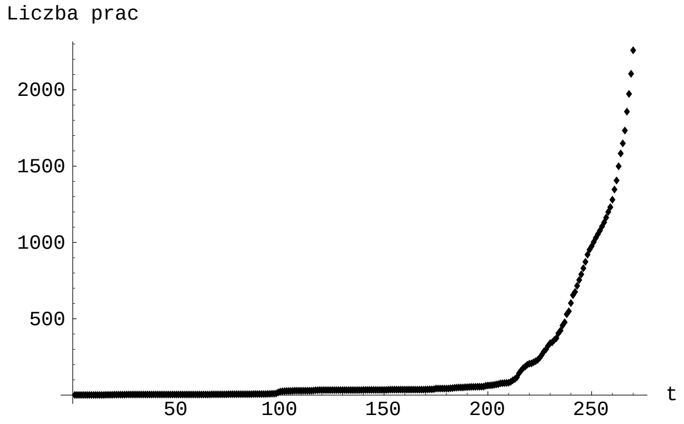
[158] *Okresem podwojenia* nazywamy okres czasu potrzebny do podwojenia się wartości danego parametru (tutaj: liczby publikacji). Jest to wygodna miara tempa wzrostu eksponencjalnego, często używana w naukometrii. Por. D. J. de Solla Price, *Mała Nauka...*, s. 15. Wartość tego wskaźnika można obliczyć ze wzoru $T = \frac{ln2}{\alpha}$, gdzie α jest wykładnikiem eksponenty opisującej wzrost określonej zmiennej (np. liczby publikacji).

ratury z teorii wyznaczników, literatury o promieniach rentgenowskich, literatury z psychologii eksperymentalnej wynosi tylko 10 lat[159], czyli jest on prawie trzy razy krótszy(!).

3.3. Analiza danych

Liczba wszystkich prac

W pierwszej kolejności przyjrzyjmy się wszystkim pracom z logiki symbolicznej, które zostały opublikowane w latach 1666–1935. Wykres ich skumulowanej liczby (rys. 9) na pierwszy rzut oka przypomina eksponentę. Zgadzałoby się to z modelem proponowanym przez D. de Solla Price'a. Bliższe spojrzenie na dane sugeruje, że przedstawiają one przebieg z trendem eksponencjalnym i okresowymi fluktuacjami (objawiają się one na wykresie jako charakterystyczne schodki).

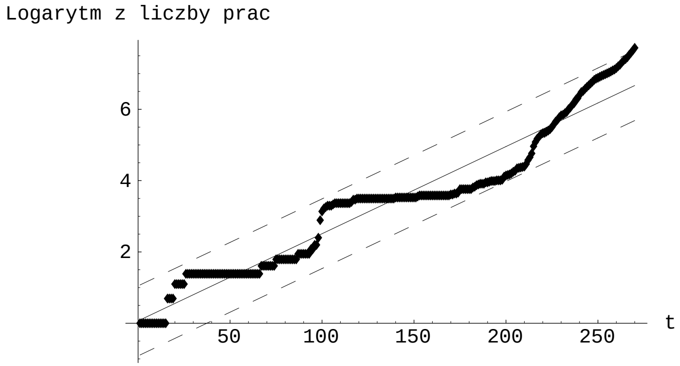


Rys. 9. Skumulowana liczba wszystkich prac z logiki symbolicznej w okresie 1666–1935 (źródło: bibliografia Churcha). Na wszystkich wykresach jednostką czasu *t* jest 1 rok

W celu ułatwienia analizy omawianych danych, zostały one przestawione w skali półlogarytmicznej (zlogarytmowane zostały wartości

[159] Dane zaczerpnięte z: D. J. de Solla Price, *Mała Nauka*..., s. 16.

skumulowanej liczby prac)[160]. Z wykresu (rys. 10) widać, że dane nie przedstawiają czystego wzrostu eksponencjalnego (eksponenta w skali półlogarytmicznej ma postać linii prostej). Kierując się przesłanką, że wzrost liczby publikacji powinien mieć charakter wykładniczy[161], została podjęta próba estymacji trendu eksponencjalnego. W przyjętym układzie półlogarytmicznym zadanie to sprowadza się do klasycznego problemu wyznaczenia regresji liniowej[162].



Rys. 10. Logarytm ze skumulowanej liczby wszystkich prac. Na wykresie została pokazana również prosta dobrana metodą regresji liniowej (linia ciągła). Liniami przerywanymi zaznaczony został przedział ufności dla estymowanych wartości parametrów prostej (na poziomie ufności równym 73%)

Metodą regresji liniowej została dobrana funkcja $y(t) = at + b$, gdzie parametry wynoszą:

$a = 0.0244425 \pm 0.00038654$ na poziomie istotności 1% ($p = 0$),

---

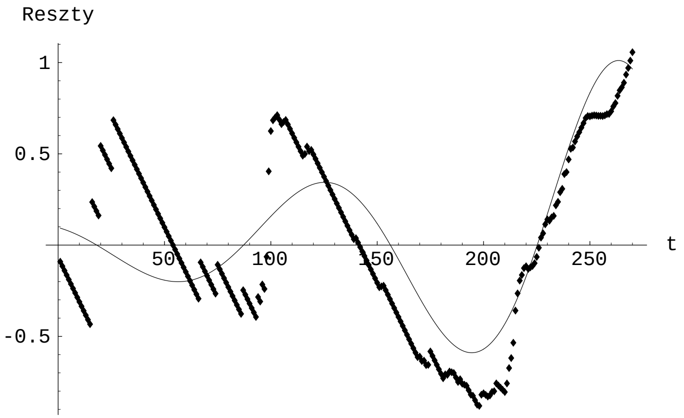
[160] Jeżeli inaczej nie zaznaczono, używane będą logarytmy naturalne.

[161] Por. np. cytowane prace Dereka de Solla Price'a.

[162] Polega on na wyznaczeniu prostej, która najlepiej (w sensie statystycznym) pasuje do zadanego zbioru danych (punktów pomiarowych). Jest to jedno z elementarnych narzędzi wykorzystywanych w statystycznej obróbce danych. Więcej na ten temat można znaleźć np. w przystępnym opracowaniu: J. R. Taylor, *Wstęp do analizy błędu pomiarowego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995, ss. 172–187.

$b = 0.0665086 \pm 0.0604229$ na poziomie istotności $> 5\%$ ($p = 0.272007$). Współczynnik determinacji[163] wynosi natomiast $R^2 = 0.937186$.

Po wyznaczeniu trendu[164], został on odjęty od zlogarytmowanych danych. W ten sposób otrzymany został ciąg opisujący fluktuacje liczby prac wokół trendu eksponencjalnego. Wykres tych fluktuacji (rys. 11) ukazuje nieregularny przebieg, w którym można odnaleźć elementy okresowości.



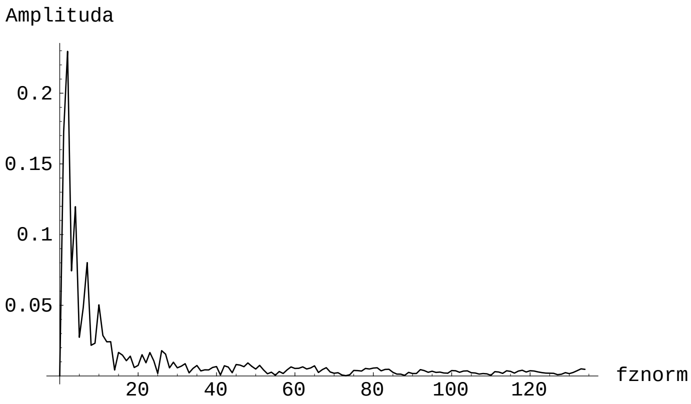
Rys. 11. Wykres reszt powstałych po odjęciu trendu liniowego od zlogarytmowanej liczby wszystkich prac (rys. 10). Linią ciągłą oznaczono funkcję aproksymującą dobraną metodą minimalizacji błędu średniokwadratowego: $y(t) = 0.0532256 \exp(0.007657t) * (1.906317 \cos(0.045715t) - 1.622534 \sin(0.045715t))$

Dalsze badanie fluktuacji polegało na wyznaczeniu widma częstotliwości. Widmo to zostało wyznaczone przy pomocy dyskretnej szybkiej

[163] Współczynnik ten jest miarą zgodności danych i dopasowanej prostej. Wartości bliskie zeru odpowiadają brakowi zgodności, a bliskie jedynce — ścisłej zgodności. Zob. J. R. Taylor, *Wstęp do analizy...*, ss. 201–205.

[164] Podkreślmy, że określając trend liniowy dla danych zlogarytmowanych, określiliśmy również parametry trendu eksponencjalnego dla danych wejściowych. Trend eksponencjalny przybiera w naszym przypadku postać: $y(t) = e^{at+b}$, która jest równoważna postaci: $y(t) = Ce^{at}$, $C = e^b$.

transformaty Fouriera (FFT — ang. *Fourier Fast Transformation*). Jak widać na wykresie (rys. 12), we fluktuacjach dominują niskie częstotliwości i tworzą one cztery wyraźne maksima, występujące przy częstotliwościach znormalizowanych: 2, 4, 7 i 10.



Rys. 12. Rozkład częstotliwości występujących we fluktuacjach liczby wszystkich prac. Wartości na osi odciętych odpowiadają częstotliwościom znormalizowanym (wartości pulsacji rzeczywistych wynoszą $\omega = \frac{2\pi}{270} f_{znorm}$)

Występowanie dużego maksimum przy niskich częstotliwościach skłoniło do poszukiwania funkcji sinusoidalnej, która mogłaby aproksymować fluktuacje. Z racji tego, że wartości ekstremalne fluktuacji rosną z czasem, dobrana została sinusoida pomnożona przez funkcję wykładniczą. W tym celu wykorzystałem metodę minimalizowania błędu średniokwadratowego. Przyjęta została funkcja aproksymująca postaci: $y(t) = C_0 \exp(pt) * (C_1 \cos(qt) + C_2 \sin(qt))$. W tym wzorze widzimy, że zamiast postulowanej funkcji sinusoidalnej występuje suma funkcji sinus i cosinus o tej samej pulsacji q. W ten sposób modelujemy efekt przesunięcia fazowego, konieczny do uwzględnienia w badanym przypadku[165]. Wynik dopasowania został zaznaczony na wykresie fluktuacji cienką linią ciągłą (rys. 11).

165 Zamiast sumy $C_1 \cos(qt) + C_2 \sin(qt)$ można zastosować po prostu funkcję

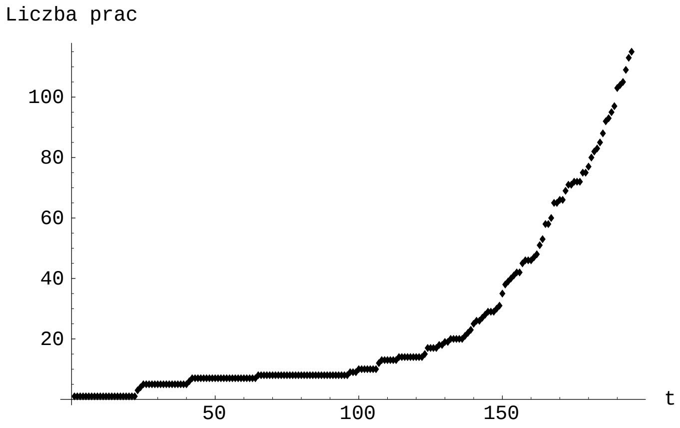
Przyglądając się postaci fluktuacji można stwierdzić, że mają one charakterystyczny kształt — narastają szybko, a opadają o wiele wolniej. Są to cechy charakterystyczne znanych z ekonomii cyklów wzrostu (*bussines cycles*)[166]. Zaobserwowana przybliżona okresowość i charakterystyczny kształt przebiegu pozwalają wysunąć przypuszczenie, że fluktuacje te mają charakter cyklów wzrostu. Aby potwierdzić tę tezę wymagana jest rozbudowana statystyczna analiza przedstawionych danych. Zadanie to, ze względu na swą złożoność, przekracza jednak ramy niniejszego opracowania. Stanowi ono interesujący temat przyszłych badań.

$C_1 \sin(qt + \varphi)$, gdzie *eksplicite* dobieramy wartość przesunięcia fazowego. Pierwsze rozwiązanie przyjęto ze względu na to, że identyczną postać mają rozwiązania jednego z modeli z przesuniętym parametrem (chodzi o rozszerzony model eksponencjalny, zob. ss. 66–69).

[166] Zagadnieniu temu poświęcono wiele opracowań z ekonomii. Zob. np. G. Evans, S. Honkapohja, P. Romer, „Growth cycles”, NBER Working Paper 5659, National Bureau of Economic Research, Cambridge 1996.

Liczba prac istotnych

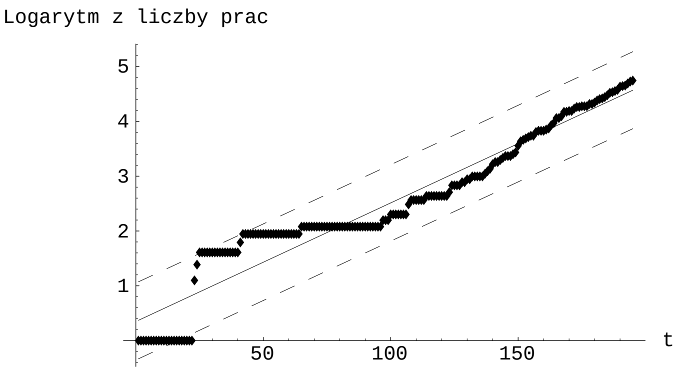
Podobna analiza została przeprowadzona dla skumulowanej liczby prac istotnych (prace oznaczone jedną lub dwiema gwiazdkami w bibliografii Churcha).



Rys. 13. Skumulowana liczba prac istotnych z logiki symbolicznej w okresie 1740–1935 (źródło: bibliografia Churcha)

Jak widać na wykresie (rys. 13), skumulowana liczba prac istotnych przypomina również krzywą wykładniczą z nałożonymi na nią schodkowymi fluktuacjami. Przedstawienie danych w skali półlogarytmicznej (rys. 14) ukazuje, że w pierwszej części występują stosunkowo duże skoki, które z czasem maleją i wykres zbliża się coraz bardziej do linii prostej.

Odjęcie trendu od zlogarytmowanych danych pozwoliło na uzyskanie przebiegu fluktuacji. Tym razem ma on nieco inny charakter: fluktuacje mają charakter okresowy, lecz maleją wraz z czasem. Występują w nich również charakterystyczne szybkie okresy wzrostu i długie, wolne okresy spadkowe. Analogicznie do poprzedniego przypadku, można więc powiedzieć, że omawiane fluktuacje mają jakościowy charakter cykli wzrostu.



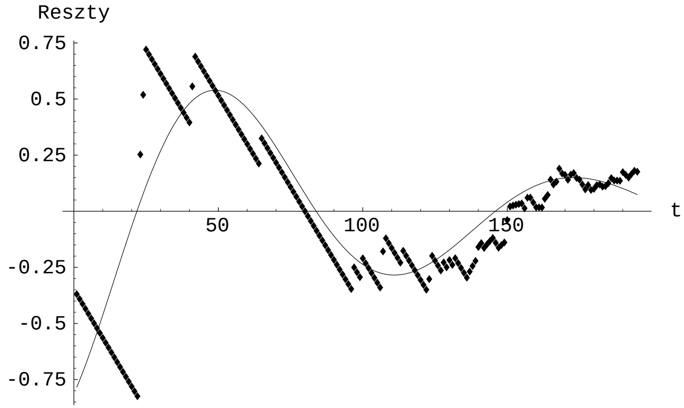
Rys. 14. Logarytm ze skumulowanej liczby prac istotnych. Linie przerywane oznaczają przedziały ufności dla estymowanej prostej regresji (na poziomie ufności równym 99%)

Dobrane zostały następujące parametry trendu $y(t) = at + b$, gdzie:
$a = 0.021646 \pm 0.000448664$ na poziomie istotności 1% ($p = 0$),
$b = 0.347881 \pm 0.0507063$ na poziomie istotności 1% ($p = 0$).
Współczynnik determinacji wynosi natomiast $R^2 = 0.923431$ i wskazuje na ścisły związek danych z modelem liniowym.

Otrzymane fluktuacje mają charakter okresowych, tłumionych oscylacji (rys. 15). Analiza widmowa (rys. 16) ujawnia bardzo silny udział niskich częstotliwości. Występuje bardzo duże maksimum dla częstotliwości znormalizowanej równej 2. Na podstawie tych obserwacji zaproponowane zostało dopasowanie[167] do ciągu fluktuacji funkcji sinusoidalnej przemnożonej przez eksponentę o ujemnym wykładniku. Zastosowana została taka sama funkcja aproksymująca, jak w poprzednim przypadku. Jak widać na wykresie (rys. 15), dopasowana krzywa wraz z upływem czasu coraz lepiej zgadza się z danymi.

Podsumowując uzyskane wyniki można powiedzieć, że rozwój prac istotnych da się również opisać jakościowo, jako proces z eksponencjalnym trendem i cyklami wzrostu. Ze względu na złożoność dynamiki

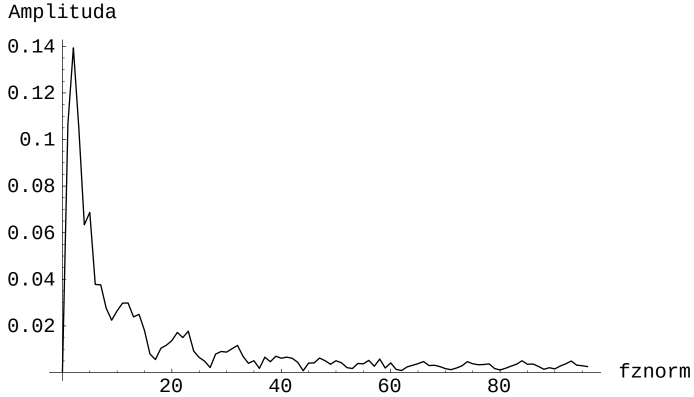
[167] W tym celu wykorzystano metodę minimalizacji błędu średniokwadratowego.



Rys. 15. Ciąg reszt powstałych po odjęciu trendu liniowego od zlogarytmowanej liczby prac istotnych (rys. 14). Linią ciągłą oznaczono funkcję aproksymującą dobraną metodą minimalizacji błędu średniokwadratowego: $y(t) = e^{-0.010318t}(-0.814163\cos(0.050635t) + 0.409618\sin(0.050635t))$

rozwoju nauki, otrzymywane cykle wzrostu nie mają czysto okresowego charakteru. Można powiedzieć, że stanowią one złożenie wielu przebiegów okresowych. Jednakże analiza fourierowska pokazuje, że dominują cykle o niskich częstotliwościach. Daje to możliwość dosyć dobrego przybliżenia przebiegu pojedynczą funkcją sinusoidalną.

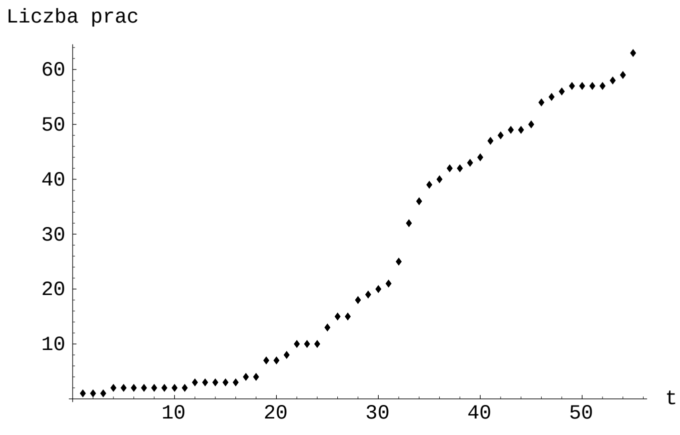
W tym momencie zakończymy rozważanie omawianego przykładu. Należy podkreślić, że konieczne są dalsze badania statystyczne w celu potwierdzenia postulowanej hipotezy występowania cyklów wzrostu.



Rys. 16. Rozkład częstotliwości występujących w procesie reszt liczby prac istotnych. Wartości na osi odciętych odpowiadają częstotliwościom znormalizowanym (wartości pulsacji rzeczywistych wynoszą $\omega = \frac{2\pi}{195} f_{znorm}$)

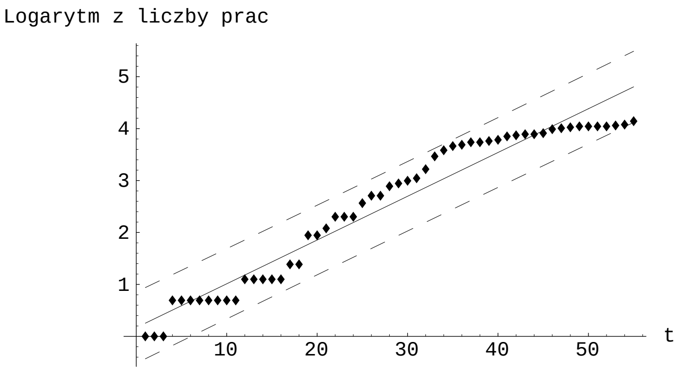
Liczba tłumaczeń

Interesującym zagadnieniem jest zbadanie, jaka była dynamika rozwoju liczby tłumaczeń prac zawartych w bibliografii Churcha. Stanowi ona bowiem inny aspekt dynamiki rozwoju nauki.



Rys. 17. Wzrost skumulowanej liczby tłumaczeń prac z logiki symbolicznej w latach 1881–1935 (dane według bibliografii Churcha)

Skumulowana liczba tłumaczeń (rys. 17) rozwija się nieco inaczej, niż poprzednio prezentowane liczby publikacji. Widzimy, że ma ona kształt przypominający literę S. Analiza wykresu w skali półlogarytmicznej (rys. 18) wskazuje, że nie można na podstawie posiadanych danych rozstrzygnąć, czy ma ona charakter krzywej logistycznej, czy eksponenty z cyklami wzrostu. Kierując się przesłanką, że skumulowana liczba tłumaczeń powinna rosnąć w późniejszych okresach czasu nie ujętych w bibliografii Churcha[168], należałoby przyjąć drugą możliwość[169].



Rys. 18. Logarytm ze skumulowanej liczby tłumaczeń. Linie przerywane oznaczają przedziały ufności dla estymowanej prostej regresji (na poziomie ufności równym 94%)

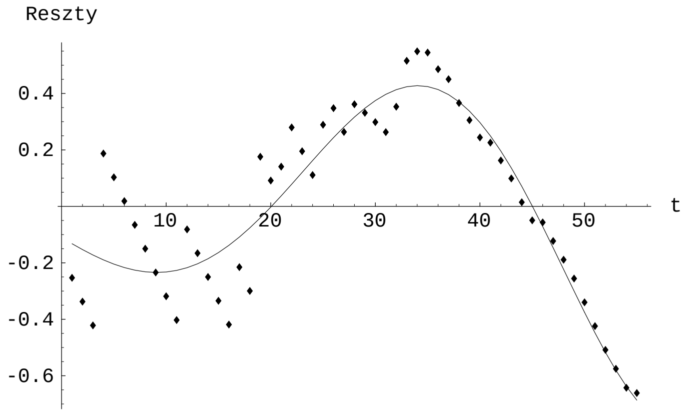
Dobrano następujące parametry trendu liniowego $y(t) = at+b$, gdzie:
$a = 0.0842827 \pm 0.00280665$ na poziomie istotności 1% ($p = 0$),
$b = 0.168798 \pm 0.0903375$ na poziomie > 5% ($p = 0.0672$).

[168] Łatwo przekonać się o prawdziwości tego założenia przeglądając dowolny katalog współczesnych prac z logiki formalnej, w którym z pewnością znajdziemy wiele nowych tłumaczeń.

[169] W przypadku przyjęcia rozwoju według modelu logistycznego skumulowana liczba tłumaczeń powinna ustalić się. Jest to równoważne sytuacji, że nie przybywa żadne nowe tłumaczenie, co jest sprzeczne z poprzednią uwagą.

Współczynnik determinacji wynosi natomiast $R^2 = 0.94449$ i wskazuje na ścisły związek danych z modelem liniowym.

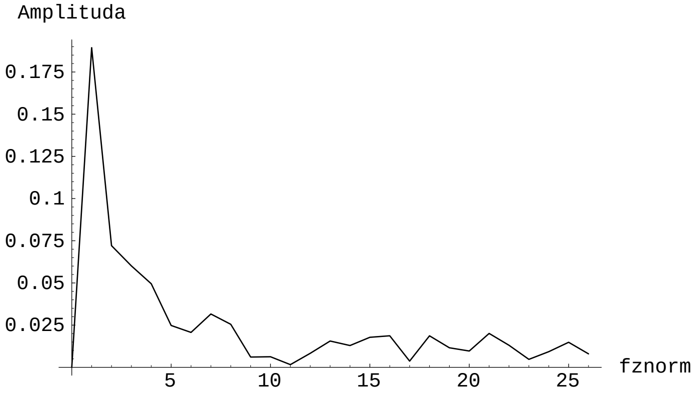
Po odjęciu trendu otrzymano następujący przebieg fluktuacji (rys. 19). Widzimy, że w początkowym fragmencie podlega on dużym wahaniom, a następnie jest coraz bardziej zbliżony do przebiegu sinusoidalnego o długim okresie drgań. Analiza widmowa uzyskanych fluktuacji (rys. 20) wskazuje, że również w tym przypadku dominują składowe o niskich częstotliwościach. Występuje wysokie maksimum dla częstotliwości znormalizowanej równej jedności.



Rys. 19. Ciąg reszt powstałych po odjęciu trendu liniowego od zlogarytmowanej liczby tłumaczeń (rys. 18). Linią ciągłą oznaczono funkcję aproksymującą dobraną metodą minimalizacji błędu średniokwadratowego: $y(t) = 0.161195e^{0.024145t}(-0.684878\cos(0.125899t) - 0.969497\sin(0.125899t))$

W związku z tymi obserwacjami dobrano do otrzymanych danych funkcję postaci $y(t) = C_0 \exp(pt) * (C_1 \cos(qt) + C_2 \sin(qt))$. Wykorzystana została w tym celu taka sama metoda jak w poprzednich przykładach. Uzyskana funkcja zaznaczona jest na wykresie (rys. 19) linią ciągłą.

Jak widać, również w przypadku rozwoju skumulowanej liczby tłumaczeń, można traktować go jakościowo jako proces z trendem wykładniczym i okresowymi fluktuacjami.



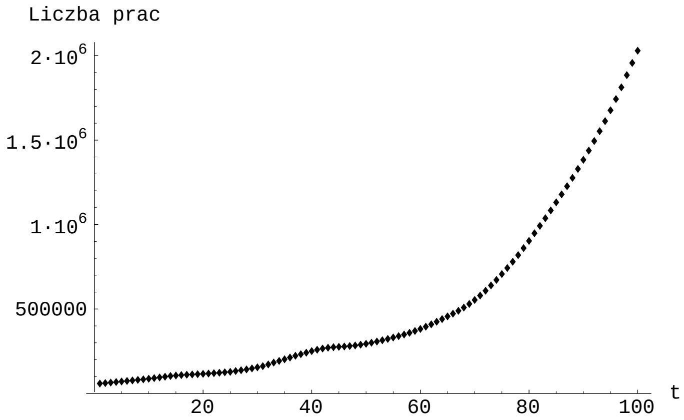
Rys. 20. Rozkład częstotliwości w ciągu reszt z liczby prac z matematyki. Wartości na osi odciętych odpowiadają częstotliwościom znormalizowanym (wartości pulsacji rzeczywistych wynoszą $\omega = \frac{2\pi}{55} f_{znorm}$)

Liczba prac z matematyki według bazy *Zentralblatt MATH*

Na zakończenie, w celu porównania, zaprezentowane zostaną jeszcze jedne dane opisujące rozwój nauki. Zostały one uzyskane z komputerowej bazy danych *Zentralblatt MATH*[170] i opisują liczbę prac z matematyki (artykuły, książki, przeglądy, recenzje, itp.). Baza ZMATH zawiera najbardziej kompletny zestaw informacji o pracach z matematyki (choć trzeba zaznaczyć, że można znaleźć w niej pewne braki) gromadzonych w okresie 1868–2004. Liczba prac została określona poprzez wyszukiwanie wszystkich prac publikowanych w określonym przedziale czasowym. Jednym z wyników wyszukiwania jest całkowita liczba znalezionych prac. Liczba ta traktowana jest jako liczba prac opublikowanych w tym okresie. Wybrano lata 1900–2000, aby zminimalizować błędy wynikające z niekompletności danych na początku i końcu okresu.

Skumulowana liczba prac została przestawiona na wykresie (rys. 21). Przedstawia on ewolucję liczby wszystkich prac z matema-

[170] Informacje o bazie danych można znaleźć na stronie 96 niniejszego opracowania. W dalszej części będzie używany skrót ZMATH.



Rys. 21. Wzrost skumulowanej liczby prac z matematyki opublikowanych w latach 1900–2000 (źródło: baza ZMATH)

tyki w przeciągu XX wieku. Jak widać na pierwszy rzut oka, krzywa ta jest bardzo zbliżona do eksponenty.

Wykres w skali półlogarytmicznej wskazuje na liniowy charakter przyrostu zlogarytmowanej liczby prac. Podobnie jak w poprzednich przypadkach, dobrana została prosta regresji.

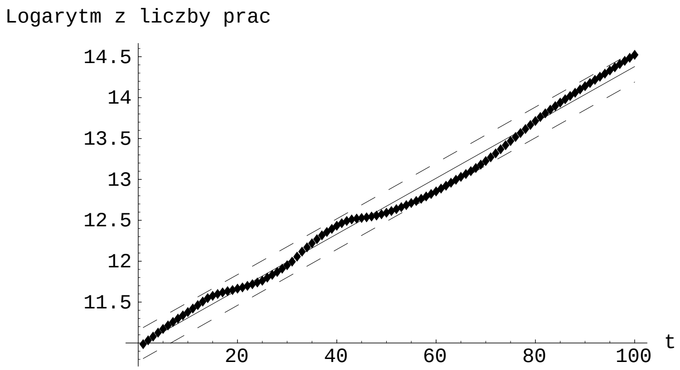
Wyznaczone zostały następujące wartości parametrów prostej regresji $y(t) = at + b$:

$a = 0.0341467 \pm 0.00032454$ na poziomie istotności 1% ($p = 0$),

$b = 10.9651 \pm 0.0188778$ na poziomie istotności 1% ($p = 0$).

Wartość współczynnika determinacji wynosi $R^2 = 0.991225$ i wskazuje na bardzo ścisły związek analizowanych danych z modelem liniowym. Można więc powiedzieć, że zgromadzone dane pasują dość dobrze do modelu eksponencjalnego. Interesujące będzie przeanalizowanie fluktuacji (rys. 23).

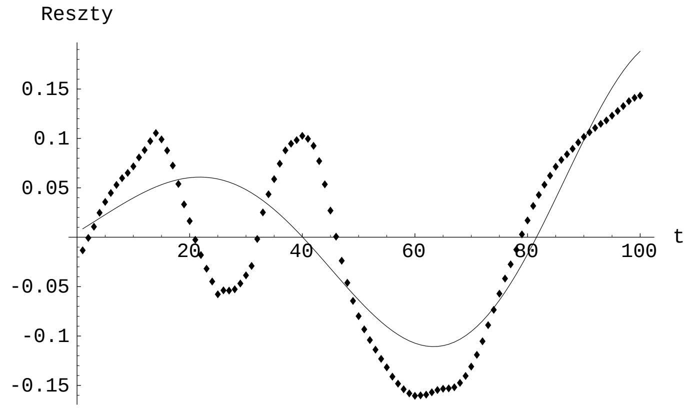
Fluktuacje powstałe po odjęciu trendu mają charakter sinusoidy o wydłużającym się okresie drgań. Analiza widmowa także i w tym przypadku wskazuje na przeważający udział niskich częstotliwości (rys. 24). Występuje w nich jedno dominujące maksimum dla częstotliwości znormalizowanej równej jedności.



Rys. 22. Logarytm ze skumulowanej liczby prac z matematyki. Linie przerywane oznaczają przedziały ufności dla estymowanej prostej regresji (na poziomie ufności równym 99%)

Interesujące jest zwrócenie uwagi na punkty charakterystyczne fluktuacji. Pierwsze maksimum fluktuacji przypada na rok 1913. Następnie aż do roku 1924 (11 lat) obserwujemy spadek tempa wzrostu liczby prac (zmniejszają się reszty). Kolejne maksimum przypada na rok 1939, a spadek trwa aż do roku 1960 (co daje 21 lat). Kolejny cykl wzrostu trwa aż do chwili obecnej.

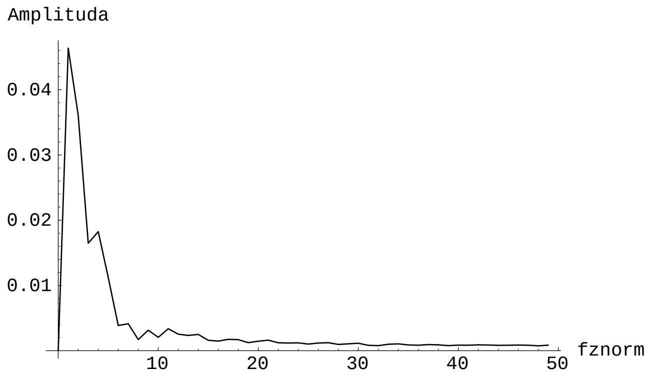
W przeciwieństwie do danych zgromadzonych w bibliografii Churcha, można wskazać zależności między fluktuacjami a wydarzeniami historycznymi. Narzucającą się interpretacją jest powiązanie spadków tempa wzrostu liczby publikacji z dwiema wojnami światowymi. Jeżeli ta interpretacja jest prawdziwa (a jest to wysoce prawdopodobne), to otrzymujemy potwierdzenie empiryczne wpływu czynników eksternalistycznych na rozwój nauki. Wpływ tych czynników wydaje się oczywisty, utrudnia on jednak w znacznym stopniu znalezienie wpływu pochodzącego od „wewnętrznej logiki rozwoju”. W podanym przypadku trudno rozstrzygnąć, czy fluktuacje w prędkości przyrostu prac z matematyki związane są jedynie z wpływami ekstrenalistycznymi — badany okres jest zbyt krótki, aby móc rozstrzygająco odpowiedzieć na to py-



Rys. 23. Ciąg reszt powstałych po odjęciu trendu liniowego od zlogarytmowanej liczby prac z matematyki (rys. 22). Linią ciągłą oznaczono funkcję aproksymującą, dobraną metodą minimalizacji błędu średniokwadratowego: $y(t) = 0.055789e^{0.014414t}(0.088886\cos(0.075665t) + 0.806206\sin(0.075665t))$

tanie. Na postawie zaprezentowanych danych można powiedzieć tylko, że w XX wieku tempo produkcji prac z matematyki było w przybliżeniu stałe, a niewielkie jego wahania można zinterpretować jako wpływ I oraz II wojny światowej.

Pomimo, iż fluktuacje w tym przypadku mają nieco inny charakter, to interesującym zadaniem może być sprawdzenie, czy one również posiadają statystyczne cechy cyklów wzrostu. Zauważmy jeszcze jedną charakterystyczną rzecz — pomimo dwu wojen, które drastycznie zmieniły obraz świata, w matematyce utrzymał się (w bardzo dobrym przybliżeniu) wzrost eksponencjalny. Jest to jedna z frapujących cech rozwoju nauki.



Rys. 24. Rozkład częstotliwości w ciągu reszt z liczby prac z matematyki. Wartości na osi odciętych odpowiadają częstotliwościom znormalizowanym (wartości pulsacji rzeczywistych wynoszą $\omega = \frac{2\pi}{102} f_{znorm}$)

3.4. Próba zastosowania rozszerzonego modelu eksponencjalnego

Poniżej przedstawione zostanie przykładowe zastosowanie rozszerzonego modelu eksponencjalnego[171] $\frac{dx(t)}{dt} = \alpha x(t-T)$ do opisu ewolucji liczby prac istotnych z logiki symbolicznej[172] (dane według bibliografii Churcha).

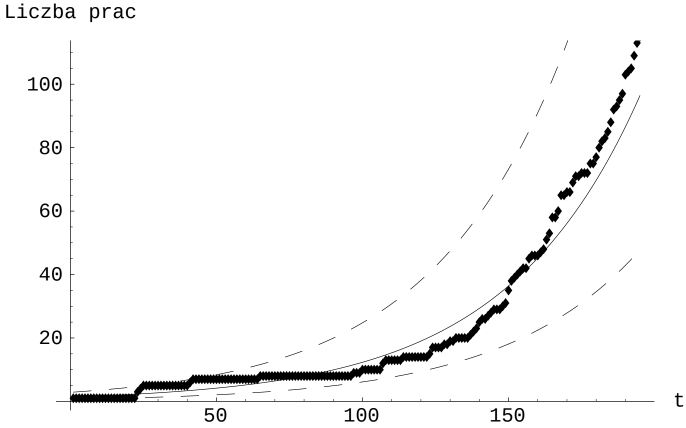
Jak widzieliśmy w poprzednim paragrafie, liczba prac istotnych z logiki formalnej daje się dosyć dobrze opisać trendem eksponencjalnym i tłumioną sinusoidą. Na podstawie dopasowanych funkcji obliczone zostały parametry modelu. Wynoszą one:

$T = 27.0521$ roku,

$\alpha = -0.0390903$.

Dla otrzymanych wartości modelu wyznaczono funkcję aproksymującą $y_4(t)$, w której uwzględniono cztery człony sumy (por. wzór (41)):

[171] Opis modelu znajduje się na stronach 66–69 niniejszej pracy.
[172] Dokładny opis danych znajduje się w poprzednim paragrafie.

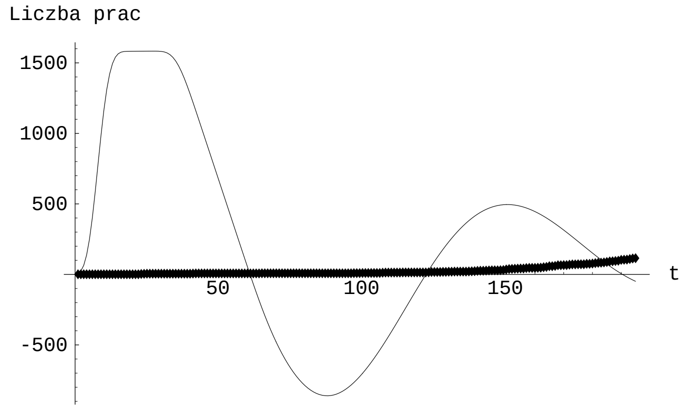


Rys. 25. Liczba prac istotnych z logiki symbolicznej wraz z dopasowanym trendem eksponencjalnym (linia ciągła) i oznaczonymi przedziałami ufności (linie przerywane). Wartości parametrów trendu zostały oszacowane na poziomie 99% (por. rys. 14)

$$\begin{aligned} y_4(t) = {} & 1.416063e^{0.021646t} + \\ & + e^{-0.010318t}(C_{1a}\cos(0.050635t) + C_{1b}\sin(0.050635t)) + \\ & + e^{-0.074132t}(C_{2a}\cos(0.280786t) + C_{2b}\sin(0.280786t)) + \\ & + e^{-0.095994t}(C_{3a}\cos(0.515789t) + C_{3b}\sin(0.515789t)) + \\ & + e^{-0.109570t}(C_{4a}\cos(0.749487t) + C_{4b}\sin(0.749487t)). \end{aligned} \tag{54}$$

Dla uzyskanej funkcji $y_4(t)$ należy wyznaczyć 8 stałych. Czynimy to poprzez określenie wartości „prefunkcji” dla $t < 0$ (w tym wypadku w ośmiu punktach). Zadanie polega wówczas na rozwiązaniu układu 8 równań. Rozpatrzmy trzy przykładowe założenia, aby zilustrować charakterystyczne cechy badanego modelu.

a) skokowa zmiana liczby prac



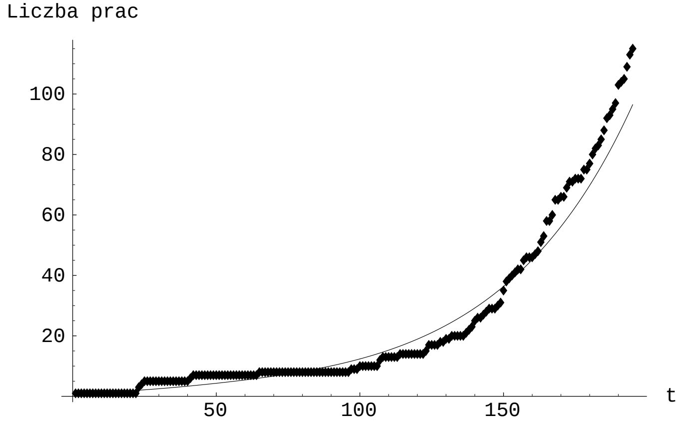
Rys. 26. Funkcja $y_4(t)$ (cienka linia) wyznaczona na podstawie założenia o zerowej liczbie prac dla $t < 0$ ($C_{1a} = 153.134, C_{1b} = 2190.14, C_{2a} = -281.598, C_{2b} = -453.031, C_{3a} = 137.928, C_{3b} = -0.0817607, C_{4a} = -9.87967, C_{4b} = 15.4797$)

Przyjmijmy, że dla $t < 0$ nie istniała żadna praca, a w chwili $t = 0$ pojawiła się pierwsza. Jest to bardzo naturalne założenie wynikające z naszej wiedzy o rozwoju liczby prac. W tym przypadku warunki początkowe możemy opisać ciągiem $\{0,0,0,0,0,0,0,1\}$. Na podstawie tych warunków początkowych wyznaczona została funkcja $y_4(t)$.

Jak widać z wykresu (rys. 26), wyznaczona funkcja nie pasuje do danych pomiarowych. Fakt ten można wytłumaczyć tym, że funkcja $y_4(t)$ zawiera człony eksponencjalne z dodatnim wykładnikiem, które powodują drastyczne zwiększanie błędów wraz z upływem czasu. Założenie o przybliżeniu początków rozwoju dyscypliny funkcją skokową jest więc w praktyce zbyt niedokładne. Ważną cechą modelu, którą można zaobserwować na podanym przykładzie, jest jego wrażliwość na małe zmiany warunków początkowych.

b) ciągła zmiana liczby prac

Przyjmijmy zatem inną postać „prefunkcji”, która będzie w sposób ciągły ekstrapolować trend: $\varphi(t) = e^{0.021646t}, \quad t \in [-T, 0]$.

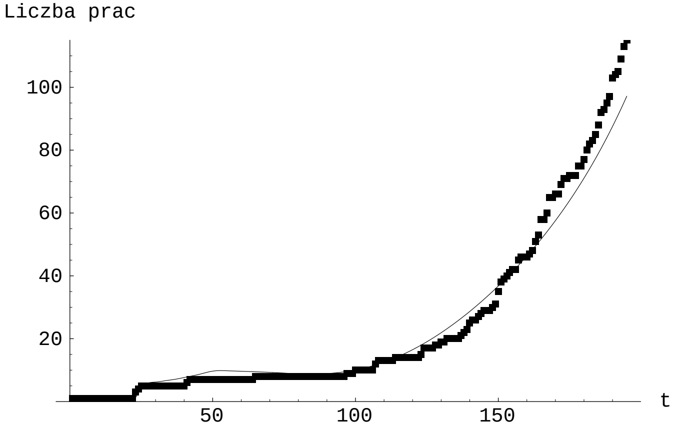


Rys. 27. Funkcja $y_4(t)$ (cienka linia) wyznaczona na podstawie „prefunkcji” $\varphi(t) = e^{0.021646t}$. Wyznaczone stałe: $C_{1a} = -0.439747$, $C_{1b} = -0.250503$, $C_{2a} = 0.0255838$, $C_{2b} = -0.00229357$, $C_{3a} = -0.00173992$, $C_{3b} = 0.00337179$, $C_{4a} = -0.00015989$, $C_{4b} = -0.000320295$

W tym przypadku funkcja $y_4(t)$ przybliża dosyć dobrze dane o liczbie prac istotnych (rys. 27). Średniokwadratowy błąd dopasowania został zmniejszony do 98,4% błędu dla samego trendu. Wskazuje to, że nie uzyskano znaczącej poprawy. Można to wytłumaczyć analogicznie jak w poprzednim przypadku — ze względu na eksponencjalne wzmacnianie błędów, nie da się wyznaczyć odpowiednio dokładnie wartości parametrów na podstawie ośmiu wartości.

c) funkcja dobrana (minimalizacja błędu średniokwadratowego)

W związku ze wskazanymi trudnościami możliwe jest tylko pokazanie, że wyznaczona funkcja $y_4(t)$ pozwala na dobry opis danych. W tym celu wyznaczone zostały wartości parametrów C_{1a}–C_{4b} na podstawie dopasowania funkcji do wszystkich danych (wykorzystując metodę minimalizacji błędu średniokwadratowego).



Rys. 28. Funkcja $y_4(t)$ (cienka linia) dopasowana metodą minimalizacji błędu średniokwadratowego. Dopasowanie przeprowadzono dla całego zestawu danych ($C_{1a} = -8.03138$, $C_{1b} = 3.87656$, $C_{2a} = -5.66012$, $C_{2b} = 8.36337$, $C_{3a} = 0.958962$, $C_{3b} = 7.59588$, $C_{4a} = 4.26486$, $C_{4b} = 1.96607$)

Na rys. 28 widzimy wykres obrazujący dopasowanie funkcji $y_4(t)$ do danych. W omawianym przypadku uzyskano zmniejszenie błędu średniokwadratowego do wartości 75% błędu przy dopasowaniu samego trendu. Podany przykład wskazuje, że można dopasować podany model (38) do danych o rozwoju liczby prac istotnych z logiki symbolicznej. Dzięki temu modelowi można uzyskać zmniejszenie błędu dopasowania w stosunku do modelu eksponencjalnego. Widać, że układ opisuje dosyć dobrze fluktuacje występujące w początkowym okresie rozwoju. Niestety, ze względu na zanikający charakter fluktuacji model ten nie pozwala na dokładniejsze opisanie całego badanego procesu.

3.5. Wnioski

Przeprowadzona analiza danych wskazuje, że w badanych dziedzinach posiadamy wciąż za mało danych, aby rozstrzygająco określić charakter zachodzących procesów. Zwykle analiza ukazuje niewiele więcej ponad jeden okres cykli wzrostu (jedynie dla liczby wszystkich publikacji z logiki symbolicznej uzyskaliśmy 1.5 okresu). Dotykamy więc istotnego ograniczenia badań: ponieważ badamy proces historyczny (rozwijający się w czasie) i jest to proces jednostkowy, nie mamy możliwości określenia, czy cykle wzrostu wraz z eksponencjalnym trendem stanowią istotną cechę rozwoju nauki. Bliżej zajmiemy się tym zagadnieniem w następnym rozdziale.

Zwróćmy z kolei uwagę na inny aspekt wskazanego ograniczenia. Przykład danych o rozwoju liczby tłumaczeń pokazuje, że dla pewnych danych trudno rozstrzygnąć, czy opisywać je krzywą logistyczną, czy eksponentą z cyklami wzrostu. W rozpatrywanym przypadku problem ten rozstrzygnięto odwołując się do naszej wiedzy o dalszym rozwoju logiki formalnej. Zauważmy, że są to informacje *zewnętrzne* wobec analizowanych danych. Uwzględniając jedynie informacje zawarte w danych źródłowych (w naszym przypadku pochodzą one z bibliografii Churcha), jedynym kryterium rozstrzygającym o wyborze modelu mogą być tylko odpowiednie wskaźniki dopasowania. Przykład ten wskazuje na wagę odpowiedniego dobrania przedziału czasowego, w którym badamy rozwój nauki. Jeżeli dobierzemy zbyt krótki okres, dane mogą pasować do różnych modeli (przyjmując tylko pierwsze 20 lat rozwoju liczby tłumaczeń, możemy równie dobrze aproksymować go linią prostą). Można powiedzieć, że w trakcie rozwoju historycznego następuje ograniczanie możliwych modeli, którymi można przybliżać określony proces. Wraz z pojawianiem się kolejnych danych maleje prawdopodobieństwo prawidłowego (tj. istotnego statystycznie) dopasowania innych modeli (np. modelu liniowego). Można sądzić, że w przejściu granicznym do nieskończonego ciągu danych pasuje tylko jeden model[173].

Uwagi te stawiają również w nowym świetle wnioski Dereka de Solla Price'a. Analiza przedstawionych przykładów pokazuje, że bardziej adekwatnym modelem jest model eksponencjalny z cyklami wzrostu. Wydaje się, że opisuje on w spójny sposób przypadki, które przedtem były klasyfikowane osobno jako należące bądź do modelu eksponen-

---

[173] Dokładnie rzecz biorąc, klasa modeli izomorficznych.

cjalnego, bądź do modelu logistycznego[174]. Można śmiało powiedzieć, że czysty wzrost eksponencjalny nie występuje przy badaniu rozwoju nauki (zawsze występują bowiem odchylenia w początkowym okresie rozwoju). Zaproponowane podejście rozwiązuje ten problem w prosty i elegancki sposób, poprzez opisanie tych odchyleń cyklami wzrostu.

Proponowana metoda badania rozwoju nauki daje również możliwość wytłumaczenia wszystkich charakterystycznych zachowań wzrostu logistycznego w warunkach ograniczeń (efekt schodowy, oscylacje zbieżne i oscylacje rozbieżne). Zostały one opisane przez D. de Solla Price'a w książce *Mała Nauka–Wielka Nauka*[175]. Różne postaci cyklów wzrostu dodanych to trendu eksponencjalnego lub logistycznego pozwalają na uzyskanie dowolnego z trzech typów reakcji[176]. Reakcje te, opisywane przedtem tylko jakościowo, uzyskują dzięki naszemu modelowi proste i jasne wytłumaczenie. Stanowi to kolejną zaletę prezentowanego podejścia.

Analiza danych ujawnia również inną interesującą cechę nauki. Widzimy, że od momentu powstania logiki symbolicznej[177] musiały upłynąć 74 lata do pojawienia się pierwszej pracy przełomowej. Od tego momentu prace istotne powstają coraz szybciej, a ich wzrost posiada trend eksponencjalny. Natomiast aby zaczęły pojawiać się pierwsze tłumaczenia musiał upłynąć prawie trzy razy dłuższy czas od początków tej dyscypliny (215 lat). Co ciekawe, o ile przez 215 lat tłumaczenia nie pojawiały się wcale, to od momentu pojawienia się pierwszego z nich ich liczba zaczęła rozwijać się bardzo szybko (posiada eksponencjalny

---

[174] Powyższe uwagi nie stanowią sugestii, aby całkowicie odrzucić model logistyczny. Wydaje się, że opisuje on dobrze rozwój dziedziny lub problematyki, która w pewnym momencie doszła do kresu swego rozwoju. Są to jednak przypadki w pewien sposób wyjątkowe dla nauki, zwykle jeden rozwiązany problem generuje kilka nowych, co zapewnia ciągły rozwój badań.

[175] Zob. *Mała Nauka...*, ss. 30–33.

[176] Zagadnienie to było szerzej dyskutowane przy okazji opisywania rozszerzonego modelu logistycznego, s. 70.

[177] Przypomnijmy, że jako datę graniczną przyjmujemy rok 1666, w którym została opublikowana pierwsza praca Leibniza dotycząca logiki symbolicznej zatytułowana *Dissertatio de arte combinatoria...*

trend wzrostu). Zachowanie takie sugeruje bogactwo wewnętrznej dynamiki nauki. Przeprowadzone powyżej analizy oraz liczne inne analizy naukometryczne sugerują jeszcze jeden wniosek. Każdorazowe wyłonienie się w procesie historycznej ewolucji nauki jakiegoś nowego aspektu powoduje, że jego ilościowy rozwój jest bardzo szybki i posiada trend eksponencjalny.

Na podstawie przeprowadzonych badań widać, że opisywanie ilościowego rozwoju nauki przy pomocy trendu eksponencjalnego i cykli wzrostu jest bardzo obiecującym podejściem. Chcąc kontynuować badania trzeba poddać analizie inne zestawy danych. Otrzymywane fluktuacje należy poddać testom statystycznym i ocenić, czy reprezentują one cykle wzrostu. Następnym krokiem powinno być opracowanie odpowiednich modeli. Kilka propozycji zostało przedstawionych w poprzedniej części pracy. Narzuca się tutaj również wykorzystanie metod ekonometrii, w której rozwiązywane są podobne problemy (np. związane z zachowaniami na giełdzie). Interesującą propozycją jest też wykorzystanie dyskretnych modeli i zaawansowanych metod analizy szeregów czasowych (np. modeli ARMA, ARIMA, itp.).

Zauważmy jeszcze, że z tej perspektywy widać również istotne podobieństwa pomiędzy procesami zachodzącymi w ekonomii oraz w nauce. Wydaje się również, że oddziaływania z opóźnieniem, które są odpowiedzialne za pojawianie się cykli wzrostu, należą nie tylko do istoty oddziaływań w nauce oraz w ekonomii, ale są bardziej powszechne. Odnajdziemy je również w innych aspektach rozwoju społecznego, w ekologii, jak i w niektórych procesach świata fizycznego. Należy dodać, że prezentowane podejście zostało zainspirowane badaniami M. Szydłowskiego i A. Krawca nad modelami naukometrycznymi z przesuniętym parametrem (zob. wcześniejsze rozdziały poświęcone tym modelom).

Przeprowadzona analiza wybranego modelu naukometrycznego pozwoliła ujawnić pewne problemy związane z modelowaniem rozwoju nauki. W związku z tym konieczne staje się dokonanie analizy metodologicznej modeli naukometrycznych. Analiza pozwoli określić znaczenie uzyskiwanych wyników dla naukometrii jak i dla filozofii. Zagadnieniom tym zostanie poświęcony następny rozdział.

4. Problemy wynikające z modelowania rozwoju nauki — analiza krytyczna

W niniejszym rozdziale spróbujemy przyjrzeć się tym aspektom modelowania rozwoju nauki, które wydają się problematyczne. Związane są one z samą metodą modelowania, z interpretacją danych, na podstawie których tworzymy modele, a także z samym opisem procesu rozwoju nauki oraz z rolą analogii pomiędzy modelami naukomterycznymi a modelami procesów znanych z przyrodoznawstwa. Spróbujemy także zastanowić się, jakie aspekty rozwoju nauki są w rzeczywistości opisywane przez modele dynamiczne.

Obecnie jednym z istotnych problemów badań naukometrycznych jest brak możliwości bezpośredniego wskazania logicznego związku między procesem rozwoju publikacji a rzeczywistym rozwojem nauki. Można go jednak rozstrzygnąć w sposób pośredni, wykorzystując np. Popperowską koncepcję świata 3 — zajmiemy się tym w ostatniej części rozdziału.

4.1. Rola analogii

Pierwszym z rozważanych aspektów modelowania jest metoda tworzenia modeli wspólna dla większości z nich. Chodzi tutaj o szeroko wykorzystywane analogie z różnymi procesami, znanymi z przyrodoznawstwa. Przy tworzeniu modelu Hartmana i modeli dyfuzyjnych inspiracje czerpane były z termodynamiki. Szeroką grupę stanowią także modele zaczerpnięte z biologii i ekologii, np. model eksponencjalny, logistyczny, Taagepery oraz model Lotki–Volterry. Na istnienie głębokich analogii między naukometrią a innymi dziedzinami wskazywało wielu naukowców, m.in. Nalimow i Mulczenko, w swym artykule z 1971 roku, porównywali system nauki z systemem biosfery[178]. Kolejna ciekawa

[178] W. W. Nalimow, Z. M. Mulczenko, „Nauka i biosfera: próba porównania dwóch systemów”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 7 (1971), 565–580.

i płodna analogia została zaczerpnięta z epidemiologii — rozwój nauki został ujęty jako proces epidemicznego rozprzestrzeniania się idei. Ostatnią grupę stanowią analogie z ekonomią, które zostały wykorzystane przez M. Szydłowskiego i A. Krawca przy tworzeniu modeli z przesuniętym parametrem.

Wymienione analogie spełniły wieloraką funkcję. Szczególnie ważną była *rola heurystyczna*. Dzięki uchwyceniu analogii można było zreinterpretować istniejące już modele na potrzeby naukoznawstwa, ewentualnie wskazać drogę, jak utworzyć nowe modele. Zaskakujący jest fakt, że pomimo czerpania analogii z bardzo odległych dziedzin okazywało się, iż są one często *istotne*, to znaczy istnieje głębsze podobieństwo pomiędzy uchwyconymi procesami. Na przykład modelem logistycznym można opisywać równie dobrze wzrost populacji bakterii w ograniczonym środowisku, jak i rozwój liczby publikacji czy rozwój liczby czasopism z danej tematyki. Fakt ten wskazuje, że u podstaw obu procesów leżą bardzo zbliżone struktury warunkujące ich rozwój. Myślę, że owe „strukturalne podobieństwa" można wyrazić jeszcze innymi słowami mówiąc, iż relacje zachodzące pomiędzy „elementami" porównywanych procesów są identyczne (tzn. izomorficzne w sensie matematycznym). Dotykamy w tym miejscu ważnego pytania filozoficznego, dlaczego rzeczywistość posiada taką własność, że procesy tak różne (dla nas) przebiegają w oparciu o izomorficzne struktury relacji.

W przypadku omawianych modeli okazało się, że powierzchowne analogie porównywanych procesów wynikają z pewnej zgodności struktury relacji między elementami tworzącymi te procesy (czyli z wewnętrznej struktury tych procesów). Krytycznym spojrzeniem na powyższe stwierdzenie zajmiemy się w dalszej części pracy. Tymczasem chciałem zwrócić uwagę na inną kwestię. Ukazany problem wskazuje bowiem, że istnieje głębokie „zakorzenienie" nauki w świecie przyrody, wynikające z izomorficzności struktury rozwoju nauki ze strukturami wielu znanych procesów przyrodniczych. Okazało się przecież, że traktowanie nauki jako normalnego procesu przyrodniczego pozwala na skuteczne opisywanie jej i badanie. Posiadamy intuicje, że nauka wywodzi się w jakiś sposób ze świata przyrody, mówimy nawet, że w pewien sposób z niego wyewoluowała, będąc przedłużeniem i podtrzymaniem ewolucji gatunku *homo sapiens*[179]. Nieoczekiwanie od strony samej nauki otrzymujemy potwierdzenie tych intuicji. Opisane badania wskazały, że nauka może być z powodzeniem traktowana jako system ewolucyjny.

4.2. Analiza metody modelowania

Przy okazji prezentacji historii modeli dynamicznych często mówiliśmy o zgodności pomiędzy strukturami różnych procesów rzeczywistych i ich matematycznych modeli. Z punktu widzenia filozofii interesująca będzie krytyczna analiza stosowanego tutaj zabiegu utożsamienia. Na początku podejmiemy próbę zidentyfikowania poszczególnych kroków postępowania i najistotniejszych z przyjmowanych założeń. Będzie to próba logicznej rekonstrukcji, wykonana w celu ukazania znaczenia uzyskiwanych wyników.

Punktem wyjścia jest obserwacja pewnego „zachowania” nauki. Zakładamy, że możliwe jest obserwowanie jakiegoś fragmentu historii rozwoju nauki. Przyjęta metoda jest więc *metodą historyczną*. Zatem wszystko, co możemy powiedzieć o nauce, będzie wynikiem analizy *ex post*. Wydaje się, że jest to nieprzekraczalne ograniczenie.

Musimy jednak przyjąć kolejne założenie, że teoria układów dynamicznych jest w stanie opisać mechanizmy, które odgrywają decydującą rolę w obserwowalnym rozwoju nauki[180]. Przyjmujemy również, że naukę będziemy traktować jako proces tworzenia informacji w stanach

[179] Por. M. Heller, „Czy świat jest racjonalny”, *Zagadnienia Filozoficzne w Nauce*, 20 (1997), 76.

[180] Poprawne predykcje uzyskiwane dzięki modelom wskazują, że można uchwycić decydujące mechanizmy rozwoju nauki. Na przykład dzięki modelowi eksponencjalnemu udało się opisać rozwój wielu aspektów nauki. Obecne badania skupiają się natomiast w dużej mierze na próbach zwiększenia dokładności predykcji. Dokonuje się tego poprzez uwzględnianie efektów wyższego rzędu.

dalekich od równowagi[181]. Jest to krok, w którym dokonujemy ważnej redukcji; umożliwia ona skuteczne badanie zjawiska, lecz oczywiście pozbawia nas możliwości całkowitego wyjaśnienia go, w związku z zawężoną perspektywą i świadomym pominięciem wielu możliwych czynników. Przyjęcie tego założenia pociąga za sobą kolejne: będziemy rozważać proces rozwoju nauki, patrząc nań wyłącznie od strony ilościowej. Jest to wymuszone strukturą układów dynamicznych, które są opisywane równaniami różniczkowymi względem czasu[182].

Zauważmy również, iż proces rozwoju nauki dostępny jest nam wyłącznie od strony fenomenów. Obserwujemy zatem pewne wielkości, np. liczbę publikacji, co do których uważamy, że oddają one to, co istotnie uważamy za rozwój nauki. Napotykamy więc poważny problem: czy rozwój liczby publikacji odzwierciedla rozwój nauki? Można go przedstawić również w innych słowach: dlaczego proces rozwoju liczby publikacji, który rzeczywiście badamy, można utożsamiać z procesem rozwoju nauki, który chcemy badać? Rozważania na ten temat odłóżmy na dalszą część pracy — poświęcone mu zostały paragrafy 4.3–4.4.

Tymczasem, choć odpowiedź na postawione pytanie nie jest do końca oczywista, dla potrzeb badań naukometrycznych zakłada się, że utożsamienie rozwoju liczby prac znaczących z rozwojem dyscypliny jest możliwe i zasadne[183]. Przyjmijmy więc, że udało nam się zaobserwować

[181] Por. M. Heller, *Filozofia nauki. Wprowadzenie*, OBI–Wydawnictwo Naukowe PAT, Kraków 1992, s. 71.

[182] Oczywiście równania różniczkowe nie są jedyną strukturą matematyczną, którą można wykorzystać do modelowania pewnych aspektów nauki. Do badania nauki wykorzystuje się także np. teorię mnogości (używając zbiorów, relacji, itp.), która nie wymusza założenia o ograniczaniu się do ilościowej strony systemu. Jednakże wydaje się, że układy dynamiczne, ze względu na swą strukturę, najlepiej nadają się właśnie do modelowania czasowej ewolucji nauki (odpowiada to ujęciu diachronicznemu).

[183] O możliwości takiego utożsamienia wnioskuje się *a posteriori* — jeżeli udaje nam się dokonywać predykcji zgodnych z rzeczywistym rozwojem nauki, to znaczy, że dokonanie utożsamienia było możliwe. Inaczej otrzymywaną zbieżność należałoby tłumaczyć jedynie szczęśliwymi zbiegami okoliczności (jak jednak wytłumaczyć powszechne występowanie korzystnych zbiegów okoliczności?). O zasadności utożsamienia liczby prac z rozwojem nauki świadczą następujące fakty:

interesujący fakt zbieżności pewnej konkretnej realizacji modelu z danymi empirycznymi. Należy zaznaczyć, że zgodność ta nie jest nigdy idealna. Nie jest bowiem możliwe całkowite wyeliminowanie przypadkowych błędów pomiarów, nawet jeśli pomiarem w tym przypadku jest proces zliczania artykułów opublikowanych w danym roku[184]. Trzeba podkreślić, że błąd przypadkowy należy do istoty każdego, nawet najdokładniejszego, pomiaru i jest po prostu nieredukowalny[185].

Zgodność będziemy zatem zmuszeni rozważać zawsze w sensie statystycznym. Najczęściej w praktyce przyjmuje się liczbową miarę „niezgodności" wyrażaną poprzez tzw. błąd średniokwadratowy[186]. Z tego względu dla ścisłości należałoby wszędzie mówić wyłącznie o statystycznej zgodności pomiędzy wynikami[187].

Kolejnym krokiem, po wykryciu zgodności modelu z danymi, jest postawienie hipotezy, że musi istnieć pewna (ograniczona) zgodność

---

a) Nośnikiem informacji o odkryciach naukowych i nowych ideach są prace naukowe (przynajmniej te znaczące), zatem wzrost liczby takich prac świadczy pośrednio o pojawianiu się nowych odkryć i idei, co można utożsamić z rozwojem nauki).

b) Prędzej czy później każde istotne odkrycie naukowe zostanie opisane w pewnej pracy naukowej. W związku z ogromnymi „rozmiarami" współczesnej nauki (o czym mówiliśmy w pierwszym rozdziale), jedyną skuteczną formą propagowania idei i wyników jest ich publikcja.

Fakty te wskazują na *istotny* związek pomiędzy pojawianiem się prac znaczących a rozwojem nauki. Problematyczne pozostaje raczej określenie, *które* z prac są znaczące. Jak pokazał przykład analizy bibliografii Churcha, niekiedy można dokonać tego rozróżnienia z perspektywy historycznej.

[184] Dla przykładu, najczęstszymi z popełnianych błędów są: brak danych o dokładnym czasie wydania pracy (niekiedy posiadamy informacje z dokładnością do 2–4 lat) oraz błędne zakwalifikowanie (lub jego brak) artykułu do danej dziedziny.

[185] Patrząc na wszystkie wysiłki czynione w celu zwiększenia dokładności pomiarów, można powiedzieć, że występowanie błędów pomiarowych wynika z budowy rzeczywistości oraz z naszych nieprzekraczalnych ograniczeń epistemicznych.

[186] Definiuje się go jako sumę kwadratów różnic pomiędzy wartościami zmierzonymi a wynikającymi z modelu.

[187] W niniejszej pracy nie będziemy jednak używać pojęcia zgodności statystycznej, ze względu na przejrzystość wypowiedzi. Jednakże mówiąc o zgodności mamy zawsze na myśli zgodność statystyczną.

struktur relacji leżących u podstaw modelu i u podstaw zjawiska. Przyjmujemy więc, że relacjom w świecie rzeczywistym odpowiadają abstrakcyjne relacje matematyczne. I znowu pojawia się jeden z podstawowych problemów filozofii przyrody: dlaczego istnieje odpowiedniość pomiędzy strukturami matematycznymi a tym, co istnieje i działa w rzeczywistym świecie; dlaczego struktury matematyczne mają zdolność naśladowania rzeczywistych zjawisk i czemu czynią to z tak znaczną dokładnością? Oto pytania, związane z *problemem matematyczności przyrody*, które w ramach tej pracy mogą być tylko zasygnalizowane.

W toku naszych rozważań dotknęliśmy istotnego problemu — nie bardzo wiadomo, dlaczego struktura matematyczna modelu odpowiada rzeczywistości. Możemy jednak stwierdzić pewien fakt: pomimo tego, że nie wiemy jak się to dzieje, nasze modele skutecznie opisują rzeczywiste procesy. Przekonują nas o tym dokonywane predykcje. Jeżeli model prawidłowo przewiduje nowe zjawiska, to wiemy, że uzyskaliśmy w ten sposób nową informację, której sami nie zakodowaliśmy w modelu. Niewątpliwie musi więc występować jakaś głęboka zgodność pomiędzy układem a rzeczywistością, choć natura tej zgodności pozostaje dla nas wciąż niejasna.

Stwierdzenie zgodności wiedzie nas z kolei do utożsamienia obu procesów. Proces w formie matematycznej zaczynamy traktować jako reprezentację rzeczywistego procesu (traktujemy go jako formę procesu rzeczywistego, lepiej poddającą się naszym wysiłkom poznawczym). W modelu matematycznym można już identyfikować mechanizmy decydujące o kształcie rozwoju. Czynimy to poprzez analizę struktury matematycznej i jej interpretację.

Jak pokazały pierwsze dwa rozdziały, dzięki dynamicznym modelom rozwoju nauki udało się uchwycić co najmniej trzy interesujące mechanizmy „napędzające” i nadające kształt procesowi rozwoju nauki. Zobaczmy jeszcze raz, jakie procesy (mechanizmy) składowe udało się zidentyfikować.

Po pierwsze, już dzięki modelowi eksponencjalnemu można było potwierdzić doświadczalnie fakt, że mechanizm kumulacji wyników jest podstawowym mechanizmem rozwoju nauki — nowe wyniki tworzone są na podstawie starych. Występuje zatem często doświadczane przez naukowców zjawisko „dokładania do skarbnicy wiedzy". Mechanizm ten ujawnia się z dużą dokładnością, gdy bada się procesy rozwoju nauki w dużych skalach (np. w długim okresie czasu), gdy zachodzi uśrednianie fluktuacji.

Drugim mechanizmem jest wysycanie się badań, które związane jest z wyczerpywaniem tematyki lub ograniczonymi „zasobami środowiska badań". Można go zaobserwować najlepiej na przykładzie modelu logistycznego. Inną interpretacją mechanizmu ograniczania wzrostu jest interpretacja mówiąca o procesie „obumierania" (usuwania) przestarzałych wyników. Mechanizm ten ujawnia się przy bardzo długich skalach czasowych, gdy w grę zaczynają wchodzić ograniczenia środowiska.

Ostatnim procesem, na który należy zwrócić szczególną uwagę, jest specyficzny rodzaj sprzężenia zwrotnego z opóźnieniem, z jakim mamy do czynienia w modelach z przesuniętym parametrem. Chodzi o mechanizm opóźnionego wpływu wyników naukowych na aktualne badania. Jak pokazują pierwsze testy empiryczne, przyjęcie tego mechanizmu jest obiecujące: w rozszerzonym modelu logistycznym pozwala on na modelowanie krzywej wzrostu wraz z występującymi nań fluktuacjami.

Trzeba w tym miejscu przypomnieć konsekwencję założenia, które zostało poczynione na początku. Przyjęliśmy, iż będziemy zajmować się nieliniowymi układami dynamicznymi[188]. Konsekwencja tego założenia jest następująca: jeśli nawet uda nam się poprawnie zidentyfikować poszczególne mechanizmy składowe, to ze względu na nieliniowe zależności między nimi sensowne jest mówienie tylko o wszystkich mechanizmach składowych i łączącej je strukturze. Jak bowiem wiadomo, nieliniowość prowadzi do tego, że całość jest czymś więcej niż tylko prostą sumą (superpozycją) części składowych. Założenie o nieliniowo-

[188] Celem założenia było umożliwienie modelowania złożonej dynamiki rzeczywistego procesu rozwoju nauki. Istnieją bowiem przesłanki matematyczne mówiące, że struktura układów liniowych jest zbyt uboga, aby można ją było efektywnie wykorzystywać w tym celu.

ści wymusza więc pewien rodzaj *holizmu*. W tym przypadku podejście analityczne, polegające na oddzielnym badaniu części składowych, jest mniej lub bardziej sztuczne, a zależy to już wyłącznie od natury nieliniowych powiązań poszczególnych procesów[189].

Myślę, że zidentyfikowanie mechanizmów rozwoju nauki jest domeną filozofii. Mechanizmy te tworzą to, co nazywamy *wewnętrzną logiką rozwoju*[190]. Wydaje się, że jest ona miejscem, od którego trzeba rozpocząć budowanie filozoficznych modeli rozwoju nauki. Wszak filozofię nauki interesuje w głównej mierze właśnie wewnętrzna logika nauki, czyli wewnętrzna struktura procesu zwanego nauką.

Interesujące i konieczne, z punktu widzenia filozofii, jest dokonanie przeglądu wszystkich przyjętych dotychczas założeń, ograniczających uchwyconą dzięki modelom dynamicznym wewnętrzną logikę rozwoju. Pokazują one, że jest to wewnętrzna logika historycznego rozwoju procesu tworzenia informacji w stanach nierównowagowych, ujętego od strony ilościowej. Powstaje niezwykle ważne pytanie, na które odpowiedzi można szukać chyba tylko na gruncie filozofii: jak to, co opisujemy, ma się do rzeczywistej nauki?

4.3. Dostępne dane o dynamice rozwoju nauki

Przy próbach modelowania rozwoju nauki za pomocą układów dynamicznych pojawia się problem ustalenia parametrów charakteryzujących stan rozwoju nauki. Zauważmy, że już na samym wstępie czynione

[189] Jest to problem bardzo dobrze znany np. filozofii przyrody ożywionej. Jak łatwo zauważyć, w przypadku organizmu, który jest doskonałym przykładem układu nieliniowego, „rozłożenie" organizmu na części i badanie każdej z nich z osobna powoduje drastyczną zmianę badanego obiektu, gdyż najczęściej traci on najbardziej interesującą nas „własność", zwaną życiem. Ten problem dostrzegł już Arystoteles, proponując przyjęcie adekwatnej metody do badania życia (por. Arystoteles, *O Duszy*, 402a–405b, 406b, 407b–408a).

[190] Taką tezę zaproponował M. Heller. Por. M. Heller, *Filozofia nauki*. . . , ss. 66,69–72 a także „Nieliniowa ewolucja nauki" w: M. Heller, *Szczęście w przestrzeniach Banacha*, Znak, Kraków 1995, ss. 173–181.

jest założenie o tym, że w ogóle możliwe jest ustalenie pewnych parametrów, które w sposób jednoznaczny charakteryzują rzeczywisty stan rozwoju nauki. Założenie to zależy od przyjętej koncepcji nauki. Innymi słowy — nie istnieją kryteria rozstrzygania o tym, co jednoznacznie odzwierciedla rzeczywisty rozwój nauki[191]. Kwestia ta, wiążąca się ściśle z problemem oceny nauki i naukowców, była przedmiotem licznych dyskusji filozoficznych i naukoznawczych. Dotyczyła najczęściej problemu istnienia obiektywnych wskaźników i metod oceny stanu nauki[192].

W badaniach naukometrycznych przyjmuje się, że można stosować różne wskaźniki do scharakteryzowania stanu nauki[193]. Najczęściej stosowanymi grupami wskaźników są:

1) wskaźniki bibliometryczne (uzyskiwane na podstawie analizy prac naukowych);

2) wskaźniki demograficzne (uzyskiwane z badań populacji naukowców, np. struktura wiekowa pracowników nauki, liczebność naukowców w poszczególnych grupach awansowych, itp.);

3) wskaźniki ekonomiczne (opisujące naukę, jako proces uwarunkowany ekonomicznie);

4) wskaźniki infometryczne (opisujące wymianę informacji w nauce lub ilość zgromadzonej informacji).

[191] Powszechnie znane są problemy, które pojawiają się przy próbach ustalenia kryterium demarkacji nauki od działalności pseudonaukowej. W tym świetle doskonale widać, że ustalenie kryteriów, które badania naukowe są istotne, a które nie, musi napotkać na jeszcze większe trudności.

[192] Zagadnieniom tym poświęcona jest bogata literatura. Zob. np. *Evaluating Science and Scientists. An East–West Dialogue on Research Evaluation in Post–Communist Europe*, M. S. Frankel, J. Cave (eds), Central European University Press, Budapest 1997.

[193] W języku polskim nie ustaliła się jeszcze powszechnie używana nazwa dla tych wskaźników. W języku angielskim używa się nazw: *science indicators, R&D indicators*.

Zauważmy, że w podejściu takim konieczne jest przyjęcie kolejnego założenia o możliwości adekwatnego opisania stanu nauki pewnymi parametrami (lub zestawem parametrów). Założenie to skutkuje m.in. tym, że pomijamy indywidualne cechy naukowców lub prac naukowych. Równocześnie przyjmujemy, że podzielenie ich na kilka kategorii (lub zrównanie wszystkich) jest wystarczająco dokładnym przybliżeniem rzeczywistości[194].

Najczęściej stosowane w naukometrii są wskaźniki bibliometryczne[195]. Wskaźniki rozwoju nauki można podzielić na dwie grupy: wskaźniki bezwzględne i względne. W przypadku danych bibliometrycznych najczęściej używanymi wskaźnikami są[196]:

1) bezwzględne — liczba prac, uzyskana liczba cytowań, itp. (ang. *output, productivity*). Przykładowa analiza przeprowadzona w poprzednim rozdziale bazowała właśnie na takich danych;

2) względne
   a) wpływ pracy (IF – *Impact Factor*) — jest to liczba wszystkich cytowań podzielona przez liczbę publikacji. To ważny wskaźnik uwzględniany przy praktycznej ocenie prac lub naukowców. Bardzo często jest podstawą decyzji o przydziale środków na określone badania. W praktyce IF oblicza się jako stosunek łącznej liczby cytowań artykułów z danego

[194] Na przykład w bibliografii Churcha przyjęto podział prac na trzy kategorie (w naszej analizie zredukowany do 2 kategorii), natomiast w bazie ZMATH wszystkie prace mają ten sam status. Porównaj rozdział 3 niniejszej pracy.

[195] Łatwo się o tym przekonać na podstawie modeli prezentowanych w poprzedniej części niniejszej pracy. Większość z nich bazowała właśnie na danych bibliometrycznych.

Metody bibliometryczne doczekały się licznych opracowań naukowych. Spis prac w języku polskim można znaleźć w: *Bibliografia bibliometryczna. Publikacje w języku polskim*, 30.11.2004, <www.bg.us.edu.pl/arton_inf/bibliografia.htm>.

[196] Por. A. Welljams–Dorof, „Quantitative citation data as indicators in science evaluations: A primer on their appropriate use” w: *Evaluating Science and Scientists...*, ss. 204–205. Oczywiście podana lista wskaźników nie jest zupełna.

tytułu czasopisma do ogólnej liczby artykułów z tego czasopisma za okres dwóch ostatnich lat[197];

b) efektywność (*efficiency*) — określana jako stosunek liczby prac zacytowanych do niezacytowanych;

c) bilans przepływu publikacji (*trade balances*) — jest to liczba prac publikowanych w swoim kraju w stosunku do liczby prac publikowanych w innych krajach;

d) współczynnik teraźniejszości, prace aktualne (*hot papers*) — prace o relatywnie wysokim stopniu cytowania w danym okresie badań. Prace takie często wskazują pojawianie się i rozwój nowych specjalności lub dyscyplin;

e) fronty badawcze (*research fronts*) — zbiór prac, uzyskiwanych poprzez śledzenie cytowań par prac cytowanych wspólnie. Prace odwołujące się do przynajmniej dwóch tych samych prac źródłowych uważane są za przynależne do tego samego frontu badań. Wskaźnik ten pozwala ujmować strukturę przedmiotową badań naukowych.

Wśród pozostałych wskaźników warto wymienić takie, jak: nakłady na naukę, nakłady na poszczególne badania, procentowy udział wydatków na badania w PKB danego kraju, wskaźniki opisujące materialną bazę badań (wskaźniki ekonomiczne), liczby naukowców przynależących do danej kategorii (wskaźniki demograficzne), a także wskaźniki infometryczne: liczba twierdzeń (dotyczy nauk formalnych), liczba zgromadzonych wyników doświadczalnych (np. obserwacji astronomicznych). Można powiedzieć, że każdy ze wskaźników odzwierciedla pewien aspekt rozwoju nauki. Lista wskaźników jest otwarta, ponieważ

[197] A. Machalska–Garbacz, *Udział Biblioteki AGH w procesie oceny dorobku naukowego uczelni. Kilka praktycznych rozwiązań*, KWE SBP. – EBIB, (29) 2001, <`http://ebib.oss.wroc.pl/2001/29/garbacz.html`>. Problemy związane z wykorzystaniem współczynnika IF przedstawia artykuł: A. K. Wróblewski, „Ostrożnie z tym współczynnikiem”, *Forum Akademickie*, 7-8 (1998), <`http://forumakad.pl/archiwum/98/7-8/artykuly/20-polemiki.htm`>.

można tworzyć nowe, które odzwierciedlają jeszcze inne aspekty rozwoju nauki[198]. Jedynymi ograniczeniami w tworzeniu nowych wskaźników są: ich adekwatność i wymóg, aby badane aspekty nauki były interesujące z pewnego punktu widzenia.

Waga problemu wyboru wskaźników polega na tym, że przyjęcie jakiegokolwiek rozstrzygnięcia w tej kwestii wpływa na uzyskiwany obraz rozwoju nauki. Równocześnie pojawiają się dwa sprzeczne dążenia: z jednej strony pragniemy opisać rozwój nauki w sposób maksymalnie pełny, a z drugiej nie jesteśmy w stanie analizować nazbyt złożonych modeli (im mniej zmiennych, tym lepiej). W związku z tym należy wybrać pewien kompromis pomiędzy tymi dążeniami. Niestety, nie można określić go *a priori*. Zbiór wskaźników, konieczny do opisania rozwoju nauki, można określić tylko na podstawie badań. Jedynie nieskuteczne próby badawcze mogą być wskazówką, że przyjęty zbiór jest nieodpowiedni[199].

4.4. Jak opisać rozwój nauki

Jak widzieliśmy naukometryczne wskaźniki rozwoju nauki mogą być bardzo różnorodne. Stosowane są one z dużym powodzeniem praktycznie, choć ich znaczenie poddawane jest różnorakiej krytyce. Przyjrzyjmy się teraz bliżej wysuwanym argumentom krytycznym. Zadanie to jest konieczne dla postawienia odpowiedzi na pytanie o rolę i znaczenie modeli naukometrycznych w naukoznawstwie i filozofii. Proponuję skupić naszą uwagę na wskaźnikach obrazujących liczbę prac, ponieważ są one najprostszym i najczęściej używanym wskaźnikiem opisującym roz-

[198] Przykłady innych wskaźników charakteryzujących rozwój nauki można znaleźć w: B. Stefaniak, „Naukometria. i możliwości wykorzystania wyników badań piśmiennictwa naukowego w kreowaniu polityki naukowej”, *Nauka i Szkolnictwo Wyższe*, 3 (1994), 43–64. Interesującą listę aspektów rozwoju nauki wraz z odpowiadającymi im wskaźnikami można znaleźć w: T. Luukkonen, „Quantitative techniques in evaluation in Western Europe” w: *Evaluating Science and Scientists. . .* , ss. 128–129.

[199] Oczywiście najpierw musi być określony wymagany stopień odpowiedniości.

wój nauki[200]. Większość uwag dotyczących tych wskaźników odnosi się również do pozostałych wskaźników. Przypomnijmy, że wskaźnik liczby prac został wykorzystany w przedstawionej w poprzednim rozdziale przykładowej analizie naukometrycznej.

Na początku naszych rozważań zauważmy, że opisując rozwój nauki poprzez liczbę prac dokonujemy sprowadzenia historii rozwoju nauki do aspektu ilościowego. Przyjmujemy, że ciąg liczbowy, zawierający kolejne liczby prac, opisuje dobrze historię rozwoju danej dyscypliny lub problemu. Widać, że na tym etapie dokonywana jest bardzo ścisła abstrakcja. Rozwój nauki widzimy przez pryzmat wybranego aspektu (określanego przez definicję użytego wskaźnika), a dodatkowo ograniczamy się tylko do jego wartości liczbowej.

Aby odpowiedzieć na kluczowe pytanie, co tak naprawdę opisujemy modelami dynamicznymi, musimy najpierw rozważyć kontrowersje, które pojawiają się już na poziomie definicji samych wskaźników.

Ustalenie dziedziny badań

Podstawowym problemem jest jednoznaczne ustalenie dziedziny, którą badamy. W świetle badań naukometrycznych okazuje się, że to zadanie jest w praktyce bardzo trudne do wykonania (o ile jest w ogóle możliwe). P. Weingart, R. Sehringer, M. Winterhager prezentują w tej sprawie stanowisko pesymistyczne[201] — istnieje nieredukowalna rozmytość granic dyscyplin, która uniemożliwia stawianie istotnych wniosków co do badanych dziedzin.

Wspomniani badacze przeanalizowali dwa przypadki: określenia zakresu nauk o morzu (*marine sciences*) oraz określenia przynależności dziedzinowej pewnego zagadnienia z medycyny. Na podstawie porównań różnych metod określania granic pomiędzy dyscyplinami doszli

[200] Krytyka w odniesieniu do wskaźników rozwoju liczby prac daje się w dużej mierze zastosować również do pozostałych wskaźników.

[201] P. Weingart, R. Sehringer, M. Winterhager, „Which reality do we measure?”, *Scientometrics*, 19 (1990), 481–493.

oni do wniosku, że każda z metod daje inny zakres. Stwierdzili oni: „[...] żadne z podejść: rozgraniczenie programów [badawczych] dla potrzeb polityki naukowej, oceny ekspertów w przeglądach i analizy bibliometryczne nie są w stanie opisać granic obszarów badawczych lub dyscyplin w sposób rozstrzygający [...]”[202]. Z podobnym problemem określenia zakresu prac przynależnych do danej dyscypliny spotkaliśmy się już przy okazji dyskusji granic logiki formalnej uwzględnionych w bibliografii Churcha[203]. Powyższe fakty skłaniają ku refleksji, że rozmytość granic przy podziałach nauki jest jej cechą istotną. W świetle prowadzonych badań naukometrycznych wydaje się jednak, że cecha ta nie jest przeszkodą uniemożliwiającą prowadzenie badań. Ogranicza ona jedynie dokładność stawianych wniosków[204].

Papierowy model nauki

Drugim problemem badań naukometrycznych jest tzw. papierowy model nauki (*paper model of science*). Wynika on z założenia, że liczba publikacji autora jest miarą udziału tegoż autora w rozwoju nauki[205]. Łatwo zauważyć, że założenie to jest często niespełnione w praktyce — nie wszystkie prace napisane przez naukowców wnoszą coś do rozwoju nauki.

Próby ominięcia tej trudności idą głównie po linii uzupełnienia danych o składnik quasi–jakościowy, który ma pomagać w rozstrzyganiu o tym, czy praca jest istotna z punktu widzenia rozwoju nauki. W tym

---

[202] Tamże, s. 493 (tłumaczenie własne).

[203] Por. strona 85 niniejszego opracowania.

[204] Jej rola jest analogiczna do doskonale znanego z nauk empirycznych błędu pomiarowego, który wynika z dyskretyzacji wielkości ciągłych. W przypadku granic nauki powstaje analogiczna ciągłość przejść między dyscyplinami. Interesujący, z filozoficznego punktu widzenia, jest problem, dlaczego rozmytość granic jest cechą istotną nauki.

[205] A. Bartkowski, *Bibliometria i patentometria*, 17.03.2003, <http://inpat.republika.pl/inne-bibliom.html>.

celu bada się najczęściej liczbę cytowań danej pracy. Prace istotne, czyli wnoszące coś do rozwoju nauki, można określać poprzez przyjęcie pewnej granicznej liczby cytowań. Zauważmy, że liczba określająca próg istotności wybierana jest arbitralnie, ponieważ nie istnieje jednoznaczne kryterium pozwalające rozstrzygnąć to zagadnienie. Przyjęcie liczby cytowań jako wskaźnika istotności pracy jest problematyczne również z innych względów.

Po pierwsze, styl cytowania silnie zależy od dyscypliny, czyli wartości progowe muszą być różne dla różnych dyscyplin (często zmieniają się nawet między specjalnościami), co stanowi dodatkową komplikację problemu w związku z arbitralnością wyboru tych wartości.

Po drugie, cytowania nie zawsze odzwierciedlają realny wpływ pracy na badania naukowe. Z jednej strony obserwuje się zjawisko braku odwoływania się do prac fundamentalnych mimo wykorzystywania ich wyników, np. w pracach związanych z ogólną teorią względności rzadko znajdziemy odwołania do dzieła Einsteina, mimo iż występują silne zależności treściowe. Wynika to z faktu, że nie cytujemy zwykle prac doskonale znanych w danym środowisku. Uważane jest to po prostu za niepotrzebną stratę czasu oraz wyraz skrajnie posuniętej pedanterii — to zadanie naukowcy pozostawiają historykom nauki. Z drugiej strony pojawiają się niekiedy prace maniaków lub prace zawierające błędy. Tuż po pojawieniu się bywają one cytowane bardzo często, co może sugerować duży wpływ na rozwój nauki[206]. Dodajmy do tego fakt, że niekiedy dokonuje się cytowania negatywnego — przytacza się pracę, spełniającą rolę antyprzykładu, która pozwala zaobserwować na przykładzie popełnionego błędu jakąś istotną prawdę. W tym przypadku cytowana praca nie wnosi jednak pozytywnego wkładu do rozwoju nauki.

W celu uniknięcia opisywanych problemów zaproponowano metodę sprawdzania uzależnień treściowych przypisów. Niestety, jest to metoda nieefektywna, podatna na wpływ subiektywizmu, więc nie stosuje się jej na większą skalę. Próby wprowadzenia wskaźników oddziały-

[206] Dla przykładu podajmy tu rzekome odkrycie tzw. zimnej fuzji jądrowej, które wywołało z początku duże poruszenie w świecie naukowym.

wania pracy (*impact*), czy ważności pracy (*importance*) jako składnika quasi–jakościowego także nie rozwiązują problemu, ponieważ bazują one również na analizie cytowań, posiadają więc te same ograniczenia.

Inną metodą uzyskania czynnika jakościowego są oceny pracy uzyskiwane metodą ekspercką. Istota ich polega na przypisywaniu danej pracy określonego statusu na podstawie orzeczenia eksperta (lub grupy ekspertów) z danej dziedziny. Metoda ta jest problematyczna ze względu na możliwy subiektywizm eksperta (ograniczony w przypadku ocen grupowych), a także ze względu na niejednoznaczność ocen ważności pracy. Ocena ważności pracy może bowiem zmieniać się wraz z upływem czasu, w miarę jak przybywają nowe wyniki. Wydaje się jednak, że istnieje pewna perspektywa czasowa, z której można już dosyć dobrze określić wpływ pracy na podstawie opinii eksperckiej uzupełnionej o badania historyczne nad wpływem danej pracy. Nie da się jednak *a priori* powiedzieć jak długi czas musi upłynąć, aby dało się określić wpływ danej pracy[207].

Jak widać, również oceny eksperckie posiadają istotne wady. Ich zaletą jest jednak to, że pozwalają ocenić znaczenie pracy na podstawie jej treści. Spoglądając na bibliografię Churcha, analizowaną w poprzednim rozdziale, możemy zobaczyć bardzo dobry przykład metody eksperckiej. Church uważał jednak, że obiektywizacja takich ocen jest problematyczna, skłaniał się raczej ku twierdzeniu, że jest ona wyrazem jego

---

[207] Pewne wskazówki mogą dać tutaj badania nad schematami cytowań prac. Schematy cytowań zawierają informacje odzwierciedlające aktualność cytowanych prac. Wydaje się, że wygaśnięcie zainteresowania pracą jest oznaką tego, że poznano już wszystkie istotne konsekwencje proponowanych rozwiązań (dotyczy zarówno prac dobrych jak i złych, w drugim przypadku z reguły szybciej określa się wartość pracy). Jest to więc odpowiedni moment do podjęcia prób oceny pracy. Moment ten można określić na podstawie analizy cytowań. Problemy sprawiają prace genialne, których konsekwencje wciąż się bada, a których nie cytuje się ponieważ są dobrze znane (na przykład prace Einsteina z teorii względności).

Więcej informacji na temat badania schematów cytowań można znaleźć w pracy: J. Vlachý, „Citation histories of scientific publications. The data sources”, *Scientometrics*, 7 (1985), 505–528.

subiektywnej oceny[208]. W świetle tych uwag widać, że ze względu na niemożliwość dokonania obiektywnej oceny znaczenia pracy nie da się do końca zredukować problemu papierowego modelu nauki. Owszem, możemy obiektywizować nasze oceny, używając różnych metod oceniania i krytycznej dyskusji, ale obiektywna ocena pozostanie zawsze nieosiągalnym ideałem do którego dążymy[209].

Ustalenie liczby prac

Kolejnym istotnym problemem oceny rozwoju nauki przy pomocy liczby prac jest trudność dokładnego ustalenia liczby prac. Istnieje kilka źródeł tego problemu. Po pierwsze, jak już to zostało wspomniane, istnieją kłopoty z określeniem granic danej dziedziny, musi to więc rzutować na decyzję, które prace będziemy uwzględniać, a które wykluczać z badań. Po drugie, badania naukoznawcze pokazują, że rozproszenie publikowanych prac jest zgodne z prawem Bardforda[210]. Z zależności tej wynika, że znalezienie wszystkich prac z danej tematyki jest niezwykle trudne, ponieważ rozproszenie pojedynczych prac jest bardzo silne. Staje się to szczególnym problemem przy dużej liczbie publikacji — wówczas znalezienie niewielkiej liczby artykułów silnie rozproszonych może zajmować niepomiernie dużo czasu. Obecnie, przy bardzo dużych liczbach publikacji, które pojawiają się każdego dnia, powstaje jeszcze inny problem: w skali globalnej w określonym czasie powstaje więcej artykułów niż jesteśmy w stanie znaleźć i opracować w tym samym okresie czasu. Jak twierdzi D. de Solla Price w na-

[208] Por. A. Church, „A bibliography of symbolic logic", *The Journal of Symbolic Logic*, 1 (1936), 122.

[209] Jest to po prostu szczególny przypadek podstawowego problemu przybliżania się do prawdy w badaniach rzeczywistości.

[210] Prawo Bradforda mówi, że jeśli poukładamy czasopisma pod względem malejącej liczby artykułów z pewnej tematyki, to można podzielić je na grupy, w których liczba artykułów z tej tematyki jest równa. Wówczas liczby czasopism należących do kolejnych grup będą tworzyły rosnący ciąg geometryczny. Por. np. A. I. Jabłoński, *Matematiczeskie modeli w isledovanii nauki*, Nauka, Moskwa 1986, s. 37n.

uce po raz pierwszy osiągnięto absurdalny punkt rozwoju czasopism już około 1830 r., wówczas: „[...] żaden uczony nie był już w stanie przeczytać wszystkich czasopism ani zapoznać się należycie z wszystkimi publikacjami, mogącymi przedstawiać dla niego jakąś wartość”[211]. Badania naukoznawcze ujawniają więc kolejną interesującą własność obecnej „Wielkiej Nauki”[212] — jeśli wybierzemy odpowiednio szeroką dziedzinę, to produkcja informacji naukowej jest w niej większa od możliwości przetwarzania tych informacji przez jednego człowieka lub zespół naukowców. Obecnie jest rzeczą oczywistą, że w rozwiniętych dziedzinach z reguły nie ma możliwości uwzględniania całej istniejącej literatury. Wynika to z natury procesu publikacji (rozproszenia) i z samej liczby publikacji. O ile drugie ograniczenie ma charakter techniczny i być może kiedyś zostanie ominięte (choć na razie nic na to nie wskazuje), to pierwsze jest nieredukowalne[213]. W związku z tym w większości przypadków rozwiniętych dziedzin nie możemy określić dokładnej liczby wszystkich prac. Po raz kolejny trzeba stwierdzić, że problem ten nie uniemożliwia adekwatnego opisu rozwoju nauki — jesteśmy bowiem w stanie oszacować błąd jaki popełniamy[214]. Powyższe ograniczenia mają podobne znaczenie jak błąd pomiarowy — wpływają tylko na dokładność stawianych wniosków.

W końcu trzeba zaznaczyć, że przyjęliśmy tutaj optymistyczne założenie o możliwości opisywania rozwoju nauki przez pewne wskaźniki. Racją ku temu są udane zastosowania modeli rozwoju nauki[215]. Zauważ-

[211] D. de Solla Price, *Węzłowe problemy historii nauki*, PWN, Warszawa 1965, s. 99.

[212] Pojęcie to wprowadził Derek de Solla Price na określenie współczesnej nauki, której dynamiczny rozwój wynika z jej ogromnych rozmiarów. Por. D. de Solla Price, *Mała Nauka — Wielka Nauka*, PWN, Warszawa 1967.

[213] Nawet wprowadzenie powszechnych elektronicznych publikacji w Internecie nie rozwiązuje problemu rozproszenia prac, lecz przesuwa go tylko na inny poziom.

[214] W tym celu można wykorzystać m.in. podane powyżej prawo Bradforda.

[215] Przykładów takich jest wiele, wymieńmy choćby zagadnienia polityki naukowej, planowania przedsięwzięć badawczych, itp. Można powiedzieć, że sukces współczesnej nauki byłby niemożliwy bez sprawnego planowania i zarządzania. To często zapominany, choć bardzo ważny element decydujący o sukcesie nauki.

my jednak, że w filozofii nauki wciąż żywe są dyskusje nad kryteriami oceny postępu naukowego[216]. Widać z nich, że racjonalne uzasadnienie kryteriów oceny jest bardzo trudne i kontrowersyjne. Wiąże się ono silnie z przyjętą koncepcją nauki. W związku z tym, w niniejszej pracy odwołujemy się jedynie do skuteczności zaproponowanego tutaj podejścia.

Bibliometria a naukometria

Na zakończenie postawmy pytanie: dlaczego twierdzimy, że nasze badania rozwoju liczby publikacji należą do naukometrii a nie po prostu do bibliometrii? Jest to pytanie, na które ostateczna odpowiedź jest jeszcze niemożliwa. Wynika to z nieustalonego wciąż do końca statusu obu wspomnianych specjalności. Niemniej można już dzisiaj wskazać pewne argumenty za tym, że modele rozwoju liczby publikacji opisują coś więcej, niż tylko rozwój produkcji wydawniczej.

Zauważmy, że przyjęliśmy oczywiste założenia, iż publikacje naukowe są wynikiem działalności naukowej oraz że spełniają rolę środków komunikacji naukowej. Te dwie cechy wskazują, że rozwój liczby publikacji naukowych wyraża coś więcej, niż tylko czysty proces wydawniczy. Zwłaszcza drugie założenie wskazuje na istotną zależność pomiędzy publikowaniem prac naukowych, a rozwojem nauki. Można śmiało powiedzieć, że bez publikacji naukowych nie byłoby nauki[217]. Zatem rozwój nauki jest ściśle związany z rozwojem nowych publikacji — warunkuje go. Z drugiej strony, rozwój publikacji jest wynikiem działalności naukowej. Wskazuje to, że dynamika rozwoju publikacji jest wynikiem dynamiki rozwoju nauki. Jednocześnie dynamika rozwoju publikacji wpływa za pomocą sprzężenia zwrotnego na dynamikę

[216] Przegląd tych koncepcji można znaleźć w: Z. Hajduk, *Temporalność nauki. Kontrowersyjne zagadnienia dynamiki nauki*, RW KUL, Lublin 1995.

[217] Wystarczy spojrzeć na historię rozwoju nauki, którą tworzą kolejne prace naukowe. Historia nauki, jaką możemy badać, jest zawarta *tylko* w pracach naukowych (prace naukowe rozumiemy tu bardzo szeroko, jako wszystkie utrwalone przekazy dotyczące problemów poruszanych przez naukę).

rozwoju badań naukowych. Widzimy, jak ściśle są powiązane ze sobą te procesy. Choć nie znamy dokładnego związku pomiędzy dynamiką publikacji a dynamiką rozwoju nauki, to wiemy, że związek taki istnieje. Celem badań nauki za pomocą układów dynamicznych jest właśnie próba zrekonstruowania tego związku. Dopiero poprawny model zależności między dynamiką publikacji a dynamiką badań naukowych pozwoli nam w pełni odpowiedzieć na postawione powyżej pytanie. Tymczasem natura tego związku jest dla nas wciąż zakryta. Sukcesy modelowania za pomocą układów dynamicznych w różnych dziedzinach nauki oraz istotne analogie pomiędzy naukometrią a tymi dziedzinami[218], pozwalają sądzić, że jest to dobra i skuteczna metoda badań pozwalająca wyjaśnić zależności pomiędzy dynamiką rozwoju publikacji a dynamiką rozwoju nauki.

4.5. Socjologia czy filozofia nauki?

Po przeanalizowaniu trudności związanych z badaniami naukometrycznymi możemy powrócić do zasadniczego pytania: co w istocie badamy przy pomocy układów dynamicznych. Z pytaniem tym związany jest istotny problem — jakie jest znacznienie prezentowanej metody dla filozofii. Można bowiem twierdzić, że proponowane tu badanie rozwoju nauki należy do swoiście rozumianej empirycznej socjologii nauki. Zarzut ten jest istotny, ponieważ podważa znaczenie podanych badań dla filozofii. Stawia on też pod znakiem zapytania kwestię uzasadnienia wniosków filozoficznych formułowanych na bazie badań naukoznawczych. Spróbujmy odpowiedzieć na postawione zarzuty.

Na wstępie zauważmy, że od strony metodologicznej badania rozwoju nauki za pomocą układów dynamicznych są typowymi badaniami procesów historycznych[219], które wykorzystują standardową metodę matematyczno–empiryczną. Pod tym względem badania naukoznawcze nie różnią się niczym od badań prowadzonych w dowolnej dziedzinie na-

[218] Analogie te zostały szerzej opisane na stronach 121–123 niniejszej pracy.

[219] To znaczy procesów rozwijających się w czasie.

uk empirycznych. Jedynym wyróżnikiem naukometrii jest przedmiot jej badania — jednostkowy i niepowtarzalny proces rozwoju nauki. Z punktu widzenia metody matematyczno–empirycznej istotne są tylko dwie podane uprzednio cechy — jednostkowość i niepowtarzalność — decydują one o specyfice badań, ale nie są czymś wyjątkowym na gruncie nauki[220]. Twierdzenie, że badania naukoznawcze są empiryczną socjologią nauki ma zatem swe ugruntowanie w metodzie tych badań.

Jeżeli jednak znaczenie badań naukometrycznych ograniczałoby się jedynie do analizy społecznych uwarunkowań działalności naukowej, to w tym miejscu należałoby przyznać całkowitą rację krytykom naukometrii. Trzeba jednakże rozgraniczyć dwie możliwe odmiany socjologii nauki: socjologię poznawczą (*cognitive sociology*) i socjologię pozapoznawczą (*non–cognitive sociology*). Pierwsza z nich podejmuje kwestię wpływu uwarunkowań socjologicznych na genezę i zawartość *treści* badań naukowych. Druga, nie podejmując kwestii tego wpływu, zajmuje się badaniami kulturowo–instytucjonalnego kontekstu badań[221]. O ile socjologia poznawcza budzi wiele kontrowersji (wspomnijmy choćby o mocnym programie socjologii wiedzy)[222], o tyle znaczenie drugiego nurtu jest zupełnie inne. J. Życiński twierdzi, w stosunku do socjologii pozapoznawczej, że „rola i wartość tej dyscypliny nie stanowią przedmiotu kontrowersji”[223]. Zaznaczmy, że prezentowane przez nas badania przynależą do drugiego nurtu.

---

[220] Zaznaczmy, że badania naukometryczne nie są jedynymi, w których przedmiot badania jest jednostkowy i rozwijający się w czasie. Takim przykładem jest kosmologia, w której dysponujemy możliwością obserwowania tylko jednego Wszechświata ewoluującego tylko w jednym procesie rozwoju.

[221] Por. J. Życiński, „Spór o racjonalność nauki a zasada naturalności interdyscyplinarnej”, *Analecta Cracoviensia* 19 (1987), 517.

[222] Zob. np. J. Losee, *Wprowadzenie do filozofii nauki*, Prószyński i S–ka, Warszawa 2001, ss. 284–286.

[223] J. Życiński, „Spór o racjonalność nauki a zasada naturalności interdyscyplinarnej”, *Analecta Cracoviensia* 19 (1987), 517. Zobacz także: J. Życiński, *Elementy filozofii nauki*, Biblos, Tarnów 1996, ss. 140–141.

Problem przejścia od wniosków socjologii pozapoznawczej do wniosków filozofii pozostaje jednak nadal otwarty. Możliwych jest kilka rozwiązań, przedstawmy tutaj jedną, wybraną koncepcję, według której naukometria jest badaniem Popperowskiego świata 3.

Przedstawiona przez K. R. Poppera koncepcja „świata 3”[224] posiada interesujące zastosowanie na gruncie badań naukometrycznych[225]. Postulowany przez Poppera świat 3 obejmuje wszystkie wytwory ludzkiego umysłu; a jednocześnie „możemy uważać świat problemów, teorii i argumentów krytycznych za szczególny przypadek, za świat w wąskim sensie, albo też za logiczną lub intelektualną prowincję świata 3”[226]. Jedna z „prowincji” świata 3 jest wypełniana przez książki i publikacje, jako nośniki obiektywnej wiedzy. Popper zakładał, że nie jest ważna ani prawdziwość, ani użyteczność tej wiedzy. Można stąd wnioskować, że w świecie 3 znajdują się zarówno prace Platona, Galileusza, Pascala, Einsteina, jak i Lenina, Stalina oraz Łysenki. Jeżeli ograniczymy jeszcze „prowincję” do książek i publikacji naukowych, to obejmowany przez nią zakres jest tożsamy z tym, który badamy przy pomocy modeli dynamicznych.

Teoria świata 3 dobrze wyjaśnia status książek i publikacji naukowych, badanych przy rozważaniu historii nauki — są one wytworem ludzkiego umysłu, posiadają dosyć dobrze określony początek istnienia, a z drugiej strony od momentu pojawienia się zaczynają swe własne, w miarę autonomiczne istnienie (niekiedy nawet wbrew intencjom autora). Nie wdając się w dyskusje wokół kwestii ontologicznych związa-

---

[224] Por. m.in. K. R. Popper, „Epistemologia bez podmiotu poznającego” w: *Wiedza obiektywna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1992, ss. 148–206 oraz K. R. Popper, *Nieustanne poszukiwania. Autobiografia intelektualna*, Znak, Kraków 1997, ss. 252–260.

[225] Inspiracją do tych rozważań była uwaga L. Gurjevy, która zaproponowała interpretację dziedziny informacyjnego modelu rozwoju nauki jako identycznego ze światem 3. (Zob. L. G. Gurjeva, *Early Soviet Scientometrics and Scientometricians*, Thesis for the degree of MSc in Science Dynamics, collegekaartnr. 9177035, Wetenchapsdynamica Universiteit van Amsterdam, Amsterdam 1992, s. 62).

[226] K. R. Popper, *Nieustanne poszukiwania*…, s. 259.

nych z Popperowską koncepcją świata 3 można stwierdzić, że jej istotną zaletą jest połączenie czasowości rozwoju ludzkiej wiedzy (czego nie rozwiązywała na przykład Platońska koncepcja wiedzy) z trwałością wiedzy i pewną jej autonomią od momentu stworzenia. Zastosowanie koncepcji świata 3 pozwala wytłumaczyć zjawisko kumulacji osiągnięć naukowych.

Jeżeli tak rozumiemy badanie naukoznawcze to można powiedzieć, że badamy historię rozwoju wycinka świata 3. W historii tej próbujemy odnaleźć jakieś prawidłowości i opisać przy pomocy pewnego modelu matematycznego. Zauważmy, że przy przyjęciu takiej koncepcji nastąpiło przesunięcie z badania rozwoju nauki na badanie rozwoju części świata 3. Jak już wspominaliśmy, obecnie nie posiadamy adekwatnej teorii związków pomiędzy rozwojem nauki a rozwojem publikacji, można jednak podać interpretację zaproponowanej tu metody jako badanie świata 3. Co ważniejsze — badana „prowincja" świata 3 jest wytworem nauki i jednocześnie motorem napędowym nowych badań. Być może okaże się, że badanie świata 3 będzie zadaniem co najmniej równie interesującym jak badanie rozwoju nauki.

4.6. Znaczenie badań naukometrycznych dla filozofii

Wielokrotnie wspominano już o wartości praktycznej omawianych badań wynikającej z możliwości predykcyjnych modeli. Zaleta ta jest oczywista i nie budzi żadnych kontrowersji. Istnieją jednak również inne zalety płynące z uwzględnienia proponowanej metody w filozoficznym badaniu nauki. J. Życiński przyznaje, że „[...] przejawem niedopuszczalnych uproszczeń byłoby lekceważenie roli socjologii w odkrywaniu struktur i mechanizmów rozwoju nauki"[227]. Wypowiedź ta wskazuje na ważną rolę badań naukometrycznych — udział w procesie *odkrywania mechanizmów i struktur*. Zauważmy, że wyjaśnienie struktur i mechanizmów rozwoju nauki leży w kręgu zainteresowań filozofii nauki. Zatem

[227] J. Życiński, „Spór o racjonalność nauki...", s. 517.

rola proponowanej metody polegałaby na dostarczaniu materiału do filozoficznych przemyśleń. Co ważne, dzięki tej metodzie na poparcie pewnych koncepcji uzyskujemy argumenty empiryczne.

Uwagi zamieszczone w poprzednich paragrafach sugerują, że znaczenie badań naukometrycznych wykracza poza odkrywanie, opis i modelowanie mechanizmów społecznych zachowań uczonych. Dzieje się to z kilku powodów.

Po pierwsze, ścisły związek procesu rozwoju nauki i procesu rozwoju publikacji powoduje, że nie możemy badać jednego z nich abstrahując od drugiego. Dokładnie rzecz biorąc, dążymy do zrekonstruowania takiej dynamiki rozwoju nauki, aby dawała ona jako wynik prawidłową dynamikę rozwoju liczby prac. Owszem, tak rozumiana nauka jest mocno zredukowana, lecz dzięki tej redukcji jesteśmy w stanie powiedzieć coś istotnego o dynamice rozwoju nauki. Uzyskujemy weryfikowalną wiedzę o dynamice rozwoju nauki w pewnym aspekcie. Wydaje się, że jest to już znaczące osiągnięcie.

Po drugie, rola badań naukometrycznych jest analogiczna do roli badań przyrodniczych w odkrywaniu struktury świata[228]. Wiadomo dziś, że badania naukowe nie tylko warunkują postęp w pracy filozoficznej, ale odpowiedzialna refleksja filozoficzna z konieczności musi odbywać się w ramach udostępnianych przez teorię. Analogiczna sytuacja zachodzi na polu badania nauki. Badania naukometryczne dostarczają teorii, w ramach której gromadzimy informacje o rozwoju nauki. O ile pewne teorie rozwoju nauki mogą okazać się nieadekwatne, o tyle sam schemat rozwiązywania problemu wydaje się niezwykle pożyteczny.

Po trzecie, badania przy pomocy układów dynamicznych mogą służyć do testowania dynamicznych konsekwencji przyjmowania pewnych założeń. Podejście takie prezentują W. E. Herfel i C. A. Hooker[229]. Dzię-

[228] Jako przykład podajmy analogię do roli badań fizycznych w odkrywaniu natury czasu i przestrzeni.

[229] Por. W. E. Herfel, C. A. Hooker, „From formal machine to social colony: Toward a complex dynamical philosophy of science” w: *Language, Quantum, Music: Select Proceedings of the 10th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy*

ki badaniom empirycznym i symulacyjnym można skutecznie badać, jakie są owe konsekwencje. W ten sposób można uzyskiwać argumenty za daną teorią rozwoju nauki. Oczywiście otrzymywane w ten sposób wnioski muszą być poddane wnikliwej analizie metodologicznej, aby zbadać zakres ich stosowalności.

Po czwarte, zaproponowana metoda badania rozwoju nauki może być traktowana jako formalizacja pewnych koncepcji rozwoju nauki. Formalizacja, jako narzędzie badawcze, pozwala na uściślenie prowadzonej dyskusji. Posiada ona wiele zalet[230], wśród których bardzo interesującą z naszego punktu widzenia jest ujawnianie ukrytych założeń. Na przykładzie kilku modeli rozwoju nauki widzieliśmy, że tę samą filozoficzną koncepcję nauki próbowano modelować na różne sposoby. Różnice wynikały z odmiennego wyboru założeń, które nie były wyrażone *eksplicite* w danej koncepcji, a które były konieczne dla otrzymania pewnych modeli. Jak widać, ukryte założenia, które maskowane są niekiedy niejasnościami językowymi, mogą mieć znaczący wpływ na rekonstruowaną dynamikę rozwoju nauki. Tak więc formalizacja pozwala na odkrywanie istnienia ukrytych założeń i zmusza do sformułowania ich w sposób jawny. Proces taki pogłębia niewątpliwie nasze rozumienie problemu rozwoju nauki i przyczynia się w ten sposób do rozwoju dyskusji filozoficznej.

Mając na uwadze niepowodzenie programu neopozytywistycznego, niekiedy zarzuca się podobnym dążeniom, że techniki formalne nie są adekwatne do ujmowania badanych zjawisk. W odpowiedzi na ten zarzut należy zauważyć, że nie można rozstrzygać *a priori*, czy formalizm układów dynamicznych jest nieodpowiedni do rozwiązywania postawionych tu problemów. Jeżeli zgodzimy się na przyjęcie odpowiedniej redukcji tematycznej, to być może modele formułowane na gruncie układów dynamicznych okażą się odpowiednim narzędziem w wyjaśnianiu

---

of Science, M. L. Dalla Chiara et al. (red.), Kluwer Academic Publishers, Boston 1998, s. 16. Temat ten jest opisany szerzej na stronie 170 niniejszej pracy.

[230] Zbiór podstawowych zalet formalizacji w ujęciu szkoły P. Suppesa można znaleźć w: J. Życiński, *Elementy filozofii nauki...*, ss. 98–100.

rozwoju nauki, tak samo, jak odpowiedni model ogólnej teorii względności, skonstruowany przez Einsteina, wyjaśnia naturę czasoprzestrzeni. Uważam, że jedynie niepowodzenie w wyjaśnianiu lub pojawienie się lepszej struktury wyjaśniania są w stanie odpowiedzieć negatywnie na pytanie o przydatność modeli dynamicznych.

Aby jasno odpowiedzieć na pytanie o rolę układów dynamicznych w badaniu nauki, podsumujmy przedstawione rozważania. Dzięki zastosowaniu dynamicznych modeli rozwoju nauki uzyskujemy pomoc przy odkrywaniu mechanizmów i struktur rozwoju nauki. Odkrywane mechanizmy rozwoju posiadają uzasadnienie empiryczne i na podstawie formułowanych modeli możemy mówić o ich istotnym wpływie na rozwój nauki z punktu widzenia danego modelu. Nie możemy uwolnić się od zrelatywizowania istotności formułowanych wniosków, ponieważ wszelkie informacje o rozwoju nauki są nam udzielane wyłącznie w ramach konkretnego modelu. Trzeba zaznaczyć, że odkrywane mechanizmy z pewnością nie są wszystkimi determinantami rzeczywistego rozwoju nauki, co wynika z koniecznego ograniczenia się do wybranych aspektów. Jeśli dodatkowo zauważymy, że każdy mechanizm jest w gruncie rzeczy czynnikiem nakładającym ograniczenia na proces rozwoju[231], to można powiedzieć, że stosując modele dynamiczne badamy ograniczenia rozwoju nauki.

---

[231] Mechanizm rozwoju opisuje nie tylko jaki będzie następny stan procesu, ale określa również jaki *nie będzie* ten stan. W tym sensie mechanizm jest ograniczeniem nakładanym na stany procesu.

5. Miejsce modeli dynamicznych w filozofii

Pytania typu: „jak rozwija się nauka?”, choć z pozoru proste, przy próbie odpowiedzi okazują się niesłychanie trudnymi. Trudność ze znalezieniem odpowiedzi polega na ogólności pytania, domaga się ono bowiem odpowiedzi ujmującej całą różnorodność i wieloaspektowość problemu. Długa historia poznawczych wysiłków człowieka jasno wskazuje, że jedyną skuteczną drogą rozwiązywania takich problemów jest ich podział, zacieśnianie do wybranych aspektów — swoista asceza, wyrażająca się w rezygnacji z szerokich horyzontów na rzecz niezwykle ograniczonych.

Przyjmuję tutaj, m.in. za K. R. Popperem[232] i M. Hellerem[233], że pierwotne są problemy (oraz pytania będące ich wyrazem), a nie filozofie, metody, teorie czy pojęcia. Wszystkie one są próbą zmierzenia się z problemem, swoistą odpowiedzią, która jest sensowna o tyle, o ile odpowiada na rzeczywisty problem, a nie na problem wytworzony przez samą siebie[234].

Doskonałą ilustracją jest problem ruchu, leżący u podstaw fizyki. Gdy Arystoteles próbował udzielić odpowiedzi na pytanie, czym jest ruch w ogóle, to badania ugrzęzły na poziomie kilku rozróżnień i zablokowały dalszy rozwój problematyki. Dopiero, począwszy od Buridana[235], gdy skupiono się jedynie na fizycznym aspekcie ruchu (w termi-

---

[232] Por. K. R. Popper, „Natura problemów filozoficznych i ich korzenie w nauce” w: K. R. Popper, *Droga do wiedzy. Domysły i refutacje*, tłum. S. Amsterdamski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999, s. 118; K. R. Popper, „Modele, narzędzia i prawda” w: *Mit schematu pojęciowego. W obronie nauki i racjonalności*, tłum. B. Chwedeńczuk, Książka i Wiedza, Warszawa 1997, ss. 174–175.

[233] Por. np. M. Heller, „Jak uprawiać filozofię przyrody?” w: M. Heller, *Nauka i wyobraźnia*, Znak, Kraków 1995, s. 148.

[234] Por. K. R. Popper, „Natura problemów filozoficznych ...”, ss. 118, 130–131.

[235] W rzeczywistości Buridan nie był jedynym twórcą tego zwrotu. Wspomina się głównie o nim, gdyż opracował pierwszą, najbardziej spójną teorię ruchu, mogącą konkurować z teorią Arystotelesa. Początków teorii impetu można się doszukiwać już

nologii Arystotelesa zwanego ruchem lokalnym) prace nad poznaniem ruchu zaczęły postępować[236], doprowadzając tę linię rozwoju problemu ruchu aż do sformułowania mechaniki Newtona.

Patrząc na rozwój filozofii i nowożytnej nauki, możemy z łatwością dostrzec proces przejmowania pewnych problemów filozoficznych przez naukę. Nie znaczy to jednak, że nauka udziela ostatecznej odpowiedzi, rozwiązującej pierwotny problem. Następuje raczej wybór pewnego aspektu problemu (tak, jak w podanym powyżej przypadku Buridana[237]), który następnie poddawany jest coraz ściślej badaniom matematyczno–empirycznym. Sam proces badania i uściślania rodzi z kolei nowe problemy, nie tylko natury matematyczno–empirycznej, ale również filozoficznej[238].

Zwróćmy uwagę na występujący tu swoisty proces, który można nazwać procesem *precyzacji problemów*. Wykazuje on istotne podobieństwa do procesu precyzacji językowej, jaki ma miejsce w komunikacji za pomocą języka naturalnego. Badania zrekonstruowanego formalnie mechanizmu precyzacji językowej prowadzą do wniosków, że dzięki nieprecyzyjności języka komunikacja ta jest możliwa oraz efektywna[239].

w VI w. u Philoponusa, a następnie u franciszkanina Piotra Jana Olivii (ok. 1248–1298), por. F. Copleston, *Historia filozofii. T. 3, Od Ockhama do Suáreza*, Instytut Wydawniczy PAX, Warszawa 2001, ss. 171–174. Zob. także E. Gilson, *Historia filozofii chrześcijańskiej w wiekach średnich*, Instytut Wydawniczy PAX, Warszawa 1987, s. 458.

[236] Już w XIV wieku teoria impetu Buridana doczekała się rozwinięcia przez Alberta z SaksoniiAlbert z Saksonii (Albertus Parvus)—textit, Marsyliusza z Inghen i Mikołaja Oresme. Jak widać, po dokonaniu odpowiedniego zacieśnienia tematycznego, problem ruchu zaczął się dość szybko rozwijać (por. F. Copleston, *Historia Filozofii. T. 3, Od Ockhama…*, s. 174; zob. także E. Gilson, *Historia filozofii chrześcijańskiej…*, ss. 459–461).

[237] Buridan polemizował już tylko z koncepcją ruchu lokalnego u Arystotelesa, nie podejmując np. problemu ruchu w sensie metafizycznym. Por. E. Gilson, *Historia filozofii chrześcijańskiej…*, ss. 457–459; F. Copleston, *Historia Filozofii. T. 3, Od Ockhama…*, ss. 171–174.

[238] Na takie ciągi „zagadnień faktycznych” zwraca uwagę M. Heller w pracy: M. Heller, „Jak uprawiać filozofię przyrody…”, s. 148.

[239] Por. np. R. Piechowicz, „Bliskość znaczeń a zagadnienia porozumienia języko-

Gdy rozważamy ewolucję pytań i problemów mamy do czynienia z następującą sytuacją: wychodzimy od ogólnych, nieścisłych, nieprecyzyjnie postawionych problemów i pytań. Nasze wysiłki poznawcze, zmierzające do rozwiązania problemu, polegają głównie na sprecyzowaniu sytuacji problemowej, pozwalającej następnie na podejmowanie prób udzielenia odpowiedzi. W historii rozwoju myśli ludzkiej nie postawiono ogólnego, nietrywialnego pytania, na które udałoby się udzielić interesującej odpowiedzi bez uprzedniego doprecyzowania problemu. Droga precyzacji problemów (pytań) wydaje się więc nieunikniona.

Precyzacja jest pewnym procesem „nieliniowym" i holistycznym — nowy wynik stawia niekiedy w zmienionym świetle stare wyniki, dokonując przesunięć ich znaczeń[240]. Prowadzi to do sytuacji, w której potrafimy dokładnie postawić pytanie o problem dopiero wtedy, gdy uda nam się go rozwiązać (a rozwiązanie jest pewnym sprecyzowaniem). Choć brzmi to paradoksalnie, sytuacja taka jest rozwiązywalna — działa tu specyficzna pętla nieliniowego sprzężenia zwrotnego[241].

---

wego", *Semina Scientiarum*, 2 (2003), 6–8.

[240] Wynikiem przedstawionego procesu precyzacji problemów i pytań jest obserwowana ewolucja pojęć naukowych.

Precyzacja problemów dokonuje się poprzez proponowanie coraz precyzyjniejszych teorii mających rozwiązać dany problem. Precyzacja teorii pociąga za sobą precyzację znaczeń wykorzystywanych pojęć. Na zjawisko precyzacji pojęć zwraca uwagę np. Alan Chalmers, pisząc: „[...] typowa historia jakiegoś pojęcia naukowego, czy to będzie «pierwiastek chemiczny», «atom», «podświadomość» czy coś innego, to historia, w której najpierw pojawia się to pojęcie w postaci niejasnej idei, a potem następuje jego stopniowa precyzacja, w miarę jak teoria, do której ono należy, przybiera ściślejszą i coraz bardziej spójną formę" (A. Chalmers, *Czym jest to, co zwiemy nauką?*, Wydawnictwo Siedmioróg, Wrocław 1997, s. 109).

[241] Można znaleźć wiele podobnych ujęć tego problemu, choć nie odwołują się one do pojęcia precyzacji. Na przykład M. Heller mówi o niedomkniętym kole sprzężenia zwrotnego między wnioskami a przesłankami powodującymi wzrost spójności systemu i jego wiarygodności. Por. M. Heller „Czy świat jest racjonalny?", *Zagadnienia Filozoficzne w Nauce*, 20 (1997), 71; M. Heller, „Przeciw fundacjonizmowi" w: *Sensy i nonsensy w nauce i filozofii*, M. Heller, J. Urbaniec, J. Mączka (red.), OBI–Kraków, Biblos–Tarnów, 1999, ss. 81–101.

Co więcej — wielu badaczy twierdzi, że taka sytuacja jest konieczna, aby w nauce mogło dochodzić do poznawania nowych obszarów rzeczywistości[242].

Spójrzmy na przykład z historii rozwoju nauki, jakim jest rozwój pojęcia nieskończoności. Po raz pierwszy pojawiło się ono na terenie filozofii u samych początków rozwoju myśli filozoficznej, gdy Anaksymander wprowadził pojęcie *apeiron* (bezkres)[243]. Następnie pojęcie to pojawia się już w zmienionej formie u Melissosa (nieskończoność bytu w czasie i przestrzeni) a później u Zenona z Elei, przy okazji słynnych aporii mających uzasadniać niemożliwość ruchu.

Postępujący proces wyodrębniania różnych znaczeń nieskończoności i uściślania ich doprowadził u Arystotelesa do rozróżnienia nieskończoności aktualnej i potencjalnej. Zauważmy jak daleko nastąpiło przesunięcie w znaczeniu nieskończoności, związane z precyzacją wybranych znaczeń. Dalsze badania powodowały coraz mocniejsze uściślanie i ograniczenie tematyki badawczej. W końcu, dzięki pracom Cantora, nieskończoność uzyskała poprawne formalne ujęcie, które pozwoliło na rozwiązanie wielu problemów. Rozwiązanie Cantora nie spowodowało jednak zamknięcia problemu nieskończoności — wręcz przeciwnie, pozwoliło na wyróżnienie różnych typów nieskończoności i postawienie wielu ważnych pytań filozoficznych[244]. A pierwotny problem, czym jest

---

[242] Proces precyzacji jest przykładem procesu samowspornego (*bootstrap*). Szerzej o kwestiach związanych z tym problemem można znaleźć np. w: T. Nickles, „Epistemiczne wzmacnianie: ku samowspornej metodologii nauk” w: *Oblicza idealizacji*, *Poznańskie studia z Filozofii Humanistyki*, 2 (1996), 245–282.

Wydaje się, że zjawisko samowsporności, wywoływane przez nieliniowe pętle sprzężeń zwrotnych, jest bardzo ważne dla zrozumienia logiki rozwoju wiedzy.

[243] Opis procesu rozwoju pojęcia nieskończoności można znaleźć m.in. w: J. Dadaczyński, *Filozofia matematyki w ujęciu historycznym*, OBI–Kraków, Biblos–Tarnów, 2000; P. Polak, „Rozwój pojęcia nieskończoności. Dialog pomiędzy filozofią a matematyką”, *Semina Scientiarum*, 1 (2002), 34–42.

[244] Por. J. Dadaczyński, „Heurystyka teorii mnogości Georga Cantora” w: *Matematyka w oczach filozofa. Jedenaście artykułów z filozofii matematyki*, OBI–Kraków, Biblos–Tarnów, 2002, ss. 101–108.

nieskończoność, choć nierozwiązany, widzimy dziś w zupełnie innym świetle niż Starożytni — dokładniej i jaśniej. I na tym polega efekt owego „nieliniowego” sprzężenia pomiędzy wynikami a przesłankami[245].

Zwróćmy teraz uwagę na jeden z możliwych scenariuszy przebiegu zaprezentowanego procesu specjalizacji i precyzacji. Uważam, że można przedstawić go za pomocą dość prostego schematu, dającego się zaobserwować właśnie w przypadku problemu nieskończoności. Pierwszą fazą jest ogólne postawienie problemu (lub odpowiednich pytań wyrażających ten problem). Bardzo często pytania stawiane są na gruncie filozofii („sytuacja pytania to punkt wyjścia filozofii”[246]). Od momentu postawienia problemu wyzwolony zostaje nieodwracalny proces — zaczyna się badanie, polegające na próbach uściślenia wybranych fragmentów problemu. Jedną z najskuteczniejszych form uściślania problemu jest jego formalizacja. Zauważmy, że uściślanie problemu jest *de facto* jego zmianą[247]. Poszukujemy więc odpowiedzi na zmienione, zacieśnione pytania. Uzyskanie rozwiązania na gruncie formalnym samo w sobie jest złożonym procesem. Jego wynik ma jednak również znaczenie dla wyjściowego problemu — stawia go w nowym świetle. Ponadto powstają nowe problemy i pytania. Badania naukometryczne pokazują, że problemy (a zatem i pytania) generowane są z tempem wykładniczym, średnio każdy z postawionych problemów wywołuje kilka

[245] Innym dobrym przykładem tego, jak uściślenie, a następnie sformalizowanie zagadnienia posunęło naprzód debatę filozoficzną, jest przykład twierdzenia Gödla. Dzięki formalnemu wykazaniu przez Gödla istnienia ograniczeń systemów aksjomatycznych, dokonał się niebywały postęp w debacie nad istotą tych systemów.

Interesujący przykład procesu precyzacji na gruncie fizyki podał A. Chalmers. Ukazał on, w jaki sposób badania nad elektromagnetyzmem stopniowo doprowadziły do uściślenia pojęcia pola elektromagnetycznego. W wyniku tego procesu uściślona została również sama teoria elektromagnetyzmu osiągając formę równań Maxwella (zob. A. Chalmers, *Czym jest*..., s. 109).

[246] M. Heller, *Filozofia świata. Wybrane zagadnienia i kierunki filozofii przyrody*, Znak, Kraków 1992, s. 17.

[247] W podanym przykładzie każde kolejne pojęcie nieskończoności jest nieco inne od poprzedniego. Zauważmy, jak różne jest na przykład matematyczne pojęcie nieskończoności od „nieskończoności w ogóle”.

nowych. To frapująca cecha nauki, zapewniająca niewyczerpalność obszaru jej badań. Można więc powiedzieć, że rozwój nauki, wbrew temu, co sądzono u schyłku XIX wieku, nie dąży do wyczerpania zagadnień, lecz powiększa stale obszar niewiedzy.

Proces naszego poznawczego „zmierzania się" z problemami prowadzi zatem, poprzez stadium uściślania (aż do formalizacji), ku nowym problemom. Nowe problemy są niekiedy niezwykle bliskie problemowi wyjściowemu. Proces poznawczy zatacza wówczas niedomknięte koło, o którym wspomina np. M. Heller[248]. W jego wyniku może zdarzyć się, że staniemy znów blisko punktu wyjścia, jednak sytuacja jest już zasadniczo inna. Nawet stawiając ponownie pierwotne pytania, stawiamy je już w innym kontekście — nasz system wiedzy jest przebudowany procesem badawczego uściślania. Z punktu widzenia przebudowanej sieci pojęć i udoskonalonych metod można pierwotne pytanie postawić tak, aby dokładniej trafiało w problem, który chcemy rozwikłać. Tutaj znowu pojawia się miejsce dla filozofii, przed którą staje pierwotny problem w nowym świetle, lub pojawiają się nowe problemy do refleksji. Zauważmy jednak, że w wyniku przejścia całego procesu zmian pojęciowych filozofia również jest już innym systemem, niż w chwili stawiania wyjściowego pytania.

Zaznaczmy, że wskazana tu droga nie jest jedyną, ale jest najskuteczniejszą z tych, jakie znamy. Można się o tym przekonać *ex post* poprzez wskazanie, że ewolucja istotnych problemów[249], które uzyskały pewne interesujące rozwiązania, szła właśnie taką drogą. O skuteczności tego podejścia przekonujemy się więc na tej samej zasadzie, jak przekonujemy się o skuteczności przystosowania się organizmów do danego środowiska — sukces populacyjny gatunku stanowi dowód na przystosowanie do warunków środowiska. Tak więc sukces w rozwią-

[248] Por. M. Heller, „Czy świat jest racjonalny?", *Zagadnienia Filozoficzne w Nauce*, 20 (1997), 71 oraz M. Heller, „Przeciw fundacjonizmowi…", ss. 81–101.

[249] M. Heller nazywa je *zagadnieniami faktycznymi* (por. M. Heller, „Jak uprawiać filozofię przyrody…", ss. 148–149). Przykładem może być wskazany już problem nieskończoności.

zywaniu istotnych problemów jest dowodem na to, że podany schemat rozwoju był najskuteczniejszym z istniejących. Oczywiście, nie stanowi to dowodu, że będzie on skuteczny we wszystkich innych przypadkach, albo że nie pojawią się doskonalsze metody. Można jednak zaproponować konkluzję, że jest to najskuteczniejszy ze znanych schematów rozwiązywania problemów. Wniosek taki każe skupić się na prezentowanej metodzie, jako najpoważniejszej kandydatce, odpowiedniej do zmierzenia się z postawionym na wstępie rozdziału problemem rozwoju nauki.

Przedstawiony powyżej schemat, próbujący opisać relacje pomiędzy filozofią a nauką, jest oczywiście mocno uproszczony. Należy bowiem pamiętać, że sam proces uściślania jest niezwykle złożony i posiada bogatą dynamikę (sam może składać się z zagnieżdżonych procesów precyzacji problemów), a także zachodzą w nim złożone relacje pomiędzy wyjściowymi problemami a ich uściśleniami. Sądzę jednak, że dla naszych rozważań taki uproszczony schemat jest wystarczający. Jego zaletą jest to, że wskazuje jasno na miejsce i rolę modeli dynamicznych w procesie badania nauki. Jeżeli przyjmiemy, że pierwotne pytanie o rozwój nauki jest zbliżone do postawionych na początku rozdziału, to można interpretować filozoficzne modele rozwoju nauki jako pierwszy etap procesu uściślania. Tak więc propozycje Poppera, Kuhna, Lakatosa, Toulmina i innych stanowią zacieśnienie pierwotnego, beznadziejnie trudnego problemu. H. E. Herfel i C. A. Hooker z University of Newcastle (Australia) zaproponowali kolejny krok — „ujawnienie ukrytych implikacji dynamicznych lub modeli zawartych implicite w tradycyjnych propozycjach”[250]. To jeden z możliwych sposobów przeniesienia debaty nad rozwojem nauki z obszaru filozofii na grunt formalny, bardziej ścisły i dający się efektywnie badać. Inną drogą jest kierunek

[250] W. E. Herfel, C. A. Hooker, „From Formal Machine to Social Colony: Toward a Complex Dynamical Philosophy od Science” w: *Language, Quantum, Music: Select Proceedings of the 10th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science*, M. L. Dalla Chiara et al. (red.), Kluwer Academic Publishers, Boston 1998, s. 7. Wszystkie cytaty z tej pracy podawane są w przekładzie własnym.

badań zapoczątkowany przez D. de Solla Price'a — naukę należy badać metodami formalnymi, budować modele jej rozwoju, weryfikować je, a następnie nadawać im interpretację filozoficzną, mającą stanowić odpowiedź na pytanie o to, jak się rozwija nauka. Oba zaprezentowane podejścia w praktyce okazują się na tyle bliskie, że najczęściej posługujemy się pewnym ich połączeniem[251].

Z badaniami tymi wiążą się nadzieje na wzbogacenie filozoficznej debaty nad problemem rozwoju nauki. Uważam, że badania nad dynamiką nauki stanowić będą punkt wyjścia dla nowych, ważnych pytań o rozwój nauki, a obraz świata, wytworzony dzięki tym zaawansowanym badaniom, pozwoli lepiej rozumieć nie tylko rozwój nauki, ale i innych, złożonych procesów (np. społecznych, ewolucyjnych, itd.).

Na zakończenie tej części rozważań warto jeszcze przyjrzeć się innym implikacjom zaprezentowanego schematu rozwoju nauki. Po pierwsze, schemat ten musi prowadzić do powstawania nowych gałęzi badań i nowych dyscyplin, co wiąże się z podziałem wyjściowych problemów. Po drugie, tłumaczy on, dlaczego na gruncie filozofii nie występuje korespondencja pomiędzy różnymi koncepcjami i dlaczego w ogóle wszelkie wysiłki wykazania korespondencji w filozofii są niesłychanie trudne. Wiąże się to, jak zauważa M. Heller, z koniecznością posiadania sformalizowanej teorii[252] (kwestię potwierdzenia pomijamy). W świetle procesu precyzacji warunek ten staje się jasny. Tylko na gruncie sformalizowanych teorii znaczenia terminów są „sztywno" ustalone (wykazują dużą stabilność znaczeń przy przebudowie systemu pojęciowego — zapewnia to możliwość porównywania i tłumaczenia teorii przed i po rewolucji naukowej). Natomiast pojęcia używane w filozofii są mniej

[251] Pluralizm podejść czy metod jest bardzo ważnym czynnikiem stymulującym rozwój nauki. Na przykład Feyerabend, w swoich propozycjach pluralizmu metodologicznego (zob. np. P. K. Feyerabend, *Przeciw metodzie*, tłum. S Wiertlewski, Siedmioróg, Wrocław 1996, s. 42), słusznie zauważył ten charakter różnorodności metod, nie wziął jednak pod uwagę destabilizującego dla struktury nauki charakteru przyjęcia zasady akceptowania dowolnych reguł.

[252] Por. druga odpowiedź na argumenty antykumulatywistów w: M. Heller, *Filozofia nauki. Wprowadzenie*, OBI–Wydawnictwo Naukowe PAT, Kraków 1992, s. 57.

stabilne, ponieważ silnie zależą od całego systemu pojęć. Przebudowy w systemie pojęć prowadzą więc z reguły do poważnych zmian znaczenia używanych terminów, stąd łatwiej zauważyć niewspółmierność i oryginalność koncepcji filozoficznych, niż ich zbieżność. Owa niestabilność, niedookreśloność jest jednak, jak już zostało powiedziane, warunkiem koniecznym, aby mogło dochodzić do precyzacji. Dzięki pewnej dozie niestabilności[253] nasz system wiedzy jest otwarty i w kręgu naszych poszukiwań mogą pojawiać się nowe, nieuchwytne dotąd problemy.

[253] Całkowita niestabilność byłaby destrukcyjna, ponieważ prowadziłaby do chaosu.

6. Nauka jako system oddziaływań dynamicznych

Po przedstawieniu różnych prób modelowania rozwoju nauki przy pomocy układów dynamicznych i po omówieniu ich filozoficznego znaczenia, zastanówmy się, jak zastosowanie układów dynamicznych do badania rozwoju nauki zmieniło obraz samej nauki. W tym celu proponuję przyjrzenie się kilku istniejącym już koncepcjom filozoficznym. Zaprezentowane przykłady trudno porównywać ze sobą — cechuje je pewna niewspółmierność ponieważ każda z nich powstawała w innym celu. Pomimo tego, z prezentowanych podejść wyłania się pewnien wspólny obraz nauki jako systemu oddziaływań dynamicznych.

Prezentację rozpoczniemy od koncepcji A. I. Jabłońskiego, która najściślej związana jest z matematycznym modelowaniem rozwoju nauki. W dalszej części przedstawimy bardziej rozbudowane od strony filozoficznej koncepcje M. Hellera oraz W. Herfela i C. Hookera.

6.1. Koncepcja A. I. Jabłońskiego

Prezentację obrazu nauki, wyłaniającego się w świetle badań przy pomocy układów dynamicznych, rozpoczniemy od koncepcji A. I. Jabłońskiego. W monografii, zatytułowanej *Matematiczeskie modeli w isledowanii nauki*[254], przedstawił on bogaty i interesujący plan badania rozwoju nauki metodami matematycznymi. Wykorzystując różnorodne metody matematyczne (niekiedy bardzo nowatorskie), autor zaprezentował modele wielu różnorodnych aspektów nauki. Kostyuk i Schreider zauważyli, że: „modele tworzone przez Jabłońskiego zorientowane są na opis wewnętrznych mechanizmów nauki determinujących jej rozwój i strukturę”[255]. Jabłoński realizował więc program w części zbliżony do

[254] A. I. Jabłoński, *Matematiczeskie modeli w isledowanii nauki*, Nauka, Moskwa 1986. Wszystkie cytaty z tej pracy podawane są w przekładzie własnym.

[255] V. Kostyuk, J. Schreider, „A Review of A. I. Yablonsky’s *Mathematical Models in Science Studies*”, *Scientometrics*, 15 (1989), 156.

tego, który został zaprezentowany w pierwszej części niniejszej pracy — chciał stworzyć modele, które w sposób formalny ujmują wewnętrzne mechanizmy nauki. Niestety Jabłoński nie przeprowadził głębszej analizy uzasadniającej ten zabieg, stwierdził tylko, że ważne jest „głębokie metodologiczne opracowanie podstawowych pojęć naukoznawstwa pozwalające stworzyć dobrze ugruntowany, matematyczny opis nauki, który powinien opierać się na wewnętrznych mechanizmach jej funkcjonowania”[256].

Jabłoński zaproponował traktowanie nauki jako systemu społecznego o szczególnych cechach. Specyfika systemów społecznych, takich jak nauka, polega według niego na tym, że są to systemy złożone z wielu elementów. Następnie podkreśla on, że systemy takie są otwarte, znajdują się daleko od stanu równowagi i charakteryzują się niestacjonarnymi i nieergodycznymi procesami (w przeciwieństwie do złożonych systemów fizycznych, np. gazu). Ponadto podkreślił, że w systemach społecznych widoczny jest związek między elementami, określający strukturę organizacyjną systemu[257].

Jabłoński osobno rozpatrywał dynamikę rozwoju nauki jako systemu otwartego i dynamikę systemu wyników naukowych. Dokonał więc podziału badań na badanie nauki i na badanie jej wyników. Do pierwszego użył metod jakościowych, proponując kilka modeli opisowych, a do drugiego — modeli dynamicznych[258]. Autor dokonał ciekawego rozróżnienia, wyodrębniając spośród różnych procesów dynamicznych (zmiennych w czasie) *procesy rozwoju*. Charakteryzują się one tym, że dochodzi w nich do jakościowej zmiany charakteryzujących go zmiennych[259].

Jabłoński podjął bardzo interesującą próbę zinterpretowania filozoficznej koncepcji rozwoju nauki T. Kuhna[260] w kategoriach termodyna-

[256] A. I. Jabłoński, *Matematiczeskie modeli...*, s. 7.
[257] Por. A. I. Jabłoński, *Matematiczeskie modeli...*, s. 8.
[258] Modele tego typu zostały opisane w pierwszej części niniejszej pracy.
[259] Por. A. I. Jabłoński, *Matematiczeskie modeli...*, s. 295.
[260] T. S. Kuhn, *Struktura rewolucji naukowych*, Aletheia, Warszawa 2001.

miki nieliniowej, wypracowanej przez I. Progogine'a[261] i jego zespół badawczy. W tym celu najpierw zinterpretował normalną naukę z koncepcji Kuhna jako stan stabilny systemu nauki. Gromadzące się anomalie interpretowane były jako czynnik destabilizujący, zaś rewolucja naukowa jako niestabilność systemu, prowadząca poprzez skokowe przejście w nowy stan stabilny, odpowiadający ustaleniu się nowego paradygmatu u Kuhna[262]. Następnie Jabłoński stwierdził, że rozpatrywanie nauki jako systemu otwartego, dalekiego od stanu równowagi, pozwala na zinterpretowanie tych stanów w pojęciach termodynamiki nieliniowej Prigogine'a. Zatem ustalenie się paradygmatu odpowiada stanom stacjonarnym, a zmiana paradygmatu w momencie kryzysowym odpowiada fluktuacyjnej niestabilności (przejście systemu z jednego stanu ustalonego w inny, bardziej zorganizowany). Zwiększone możliwości wyjaśniania nowego paradygmatu, wynikające według Jabłońskiego ze wzrostu organizacji wiedzy naukowej, odpowiadają zmniejszeniu się entropii i wzrostowi organizacji w systemie nauki[263]. Na poparcie tej koncepcji Jabłoński podał wyniki badań W. Goffmana i G. Harmona[264], którzy na przykładzie logiki symbolicznej wykazali występowanie związku pomiędzy przełomowymi odkryciami w tej dyscyplinie a cyklami wzrostów aktywności twórczej naukowców[265].

Swoje rozważania, dotyczące rozwoju nauki, Jabłoński oparł na teorii stabilności systemów. Uznał on niestabilność za czynnik rozwoju nauki. Tłumaczył, odwołując się do prac Lapunowa i Thoma[266], że wystąpienie niestabilności systemu nauki może sprawić, iż fluktuacje pew-

---

[261] Por. I. Prigogine, I. Stengers, *Z chaosu ku porządkowi*, PIW, Warszawa 1990.

[262] Por. A. I. Jabłoński, *Matematiczeskie modeli...*, ss. 94–95.

[263] Por. A. I. Jabłoński, *Matematiczeskie modeli...*, ss. 96–97.

[264] W. Goffman, G. Harmon, „Mathematical approach to the prediction of scientific discovery", *Nature*, 229 (1971), 103–104.

[265] Zauważmy, że Jabłoński w tym miejscu przestaje być wierny przyjętemu przez siebie podziałowi. Używając jego terminologii można powiedzieć, że uzasadnia on przyjęty model dynamiki rozwoju nauki dynamiką rozwoju rezultatów pracy naukowej.

[266] Por. R. Thom, *Stabilité structurelle et morphogénese. Essai d'une théorie générale des modeles*, W. A. Benjamin Inc., Massachusetts 1972.

nych parametrów doprowadzą do jakościowej zmiany w funkcjonowaniu systemu. Niestabilności systemu nauki Jabłoński wiązał zaś z narastaniem w nim anomalii podważających dotychczasowy system wiedzy[267]. Z drugiej strony zauważył on, że po skokowym przejściu w nowy reżim rozwoju system musi zacząć wykazywać cechy stabilności, aby nie uległ destrukcji. W przypadku nauki chodzi o stabilność systemu wiedzy (pojęć, twierdzeń). Jabłoński wiązał powstającą w procesie rozwoju organizację systemu wiedzy naukowej z historią procesu rozwoju nauki — miała ona odzwierciedlać następstwo etapów systemu. Następnie zinterpretował to jako odpowiednik organizacji hierarchicznych systemów w teorii Prigogine'a[268]. Jabłoński podał również argumenty za tym, że można system nauki rozpatrywać jako *strukturę dyssypatywną* w stanie dalekim od równowagi, w której możliwe są procesy samoorganizacji (czyli zmniejszania entropii)[269]. W przypadku nauki strumienie energii zasilającej ją i zapewniającej możliwości rozwoju rozumiane są jako informacja naukowa, nakłady finansowe i inne. Ważną częścią tej koncepcji nauki jest pewna odmiana holizmu, płynąca z nieliniowości nauki.

W celu wytłumaczenia, jak powstają skokowe zmiany w systemie nauki w momentach niestabilności, Jabłoński próbował zastosować teorię katastrof, stworzoną przez R. Thoma[270]. Wykorzystując jedną z elementarnych katastrof próbował on pokazać, jak można zrozumieć niektóre zjawiska w historii rozwoju naukowo–technicznego. Autor podał trzy przykłady (wzrost dokładności pomiaru, wzrost szybkości tworzenia nowych materiałów, wzrost szybkości procesów przemysłowych), w których określił zmienne i nadał interpretacje w kategoriach teorii katastrof.

W ujęciu Jabłońskiego nauka jest traktowana jako złożony system społeczny, wyróżniający się specyfiką swych zadań i działań. System ten

[267] Por. A. I. Jabłoński, *Matematiczeskie modeli...*, ss. 94–95.
[268] Por. A. I. Jabłoński, *Matematiczeskie modeli...*, s. 97.
[269] Por. A. I. Jabłoński, *Matematiczeskie modeli...*, ss. 97–100.
[270] Por. R. Thom, *Stabilité structurelle et morphogénese...*

rozwija się według powtarzającego się schematu, przechodząc kolejno przez stany stabilne i niestabilne. Narastanie wewnętrznych anomalii destabilizuje system, który staje się podatny na fluktuacje parametrów. W pewnym momencie, pod wpływem wzmocnienia fluktuacji, dochodzi do skokowego przejścia systemu w nowy reżim, który szybko stabilizuje się i cykl rozwoju powtarza się. Podany schemat dynamiki systemu budzi jednak pewne wątpliwości. Podstawową wadą koncepcji Jabłońskiego jest to, że autor, chyba wbrew pierwotnym założeniom, podaje tylko możliwości takiego rozwoju nauki. Niestety, w ramach tak ogólnego i nieprecyzyjnego modelu nie można wykazać, że nauka musi się rozwijać w taki sposób, jaki został podany, ani nawet, że w rzeczywistości tak się rozwijała.

Jabłoński twierdził, że zaprezentowana przez niego koncepcja nauki należy do nowego nurtu badań nauki w którym: „[...] koncepcje teorii katastrof, termodynamiki nieliniowej, dynamiki chaotycznej, oparte na bifurkacji rozwiązania przy zmianie parametrów w systemach nieliniowych i na powstającej niestabilności jako czynniku jakościowej zmiany systemu [...] pozwalają przypuszczać, że jesteśmy obecnie na progu nowych przesunięć paradygmatycznych”[271]. Niestety, śmierć Jabłońskiego, zaraz po napisaniu omawianej monografii (ostatnie korekty pracy wykonywał już w szpitalu), przeszkodziła w dalszym rozwijaniu tej koncepcji[272].

[271] A. I. Jabłoński, *Matematiczeskie modeli...*, s. 316.

[272] Koncepcję nauki, w pewnym sensie podobną do propozycji Jabłońskiego, zaprezentowali również M. Lubański i Sz. Ślaga. Wychodząc od badań systemowych zaproponowali oni rozumienie nauki jako całościowego, względnie stabilnego, samoorganizującego się systemu. (Por. M. Lubański, Sz. Ślaga, „Dwie cechy wiedzy naukowej”, *Studia Philosophiae Christianae*, 15 (1979), 121–131; M. Lubański, Sz. Ślaga, „Proces badawczy w aspekcie systemowym”, *Studia Philosophiae Christianae*, 16 (1980), 139–152. Zob. także opracowanie: J. Ropek, „Metodologia systemowa a filozofia przyrody”, *Zagadnienia Filozoficzne w Nauce*, 20 (1997), 113–115). Bez trudu można w tym podejściu dostrzec pojęcia znane z koncepcji A. I. Jabłońskiego, w tym względną stabilność, stanowiącą uprzednio pojęcie centralne.

Sz. Ślaga wraz z M. Lubańskim przedstawili również systemowe ujęcie procesu badawczego (M. Lubański, Sz. Ślaga, „Proces badawczy...”, 139–152). Według tej

6.2. Koncepcja M. Hellera

Związki pomiędzy pojęciami termodynamiki nieliniowej a pojęciami dotyczącymi rozwoju nauki dostrzegł również M. Heller. W tym przypadku, odmiennie niż u Jabłońskiego, nie doszło jednak do bezpośredniej reinterpretacji modelu Kuhna, lecz została stworzona nowa koncepcja rozwoju nauki — bifurkacyjny model rozwoju. Inspiracją tego modelu były prace nad tłumaczeniem przedrelatywistycznych teorii dynamicznych na język geometrii różniczkowej, przeprowadzone wraz z D. J. Rainem[273]. Badania te doprowadziły M. Hellera do stwierdzenia, że „zastosowanie tej metody ukazało (wbrew naszym intencjom) zadziwiającą logikę rozwoju czasoprzestrzennych struktur [...]; z tym, że «logika rozwoju» ujawniła nam zupełnie inne oblicze od zakładanego niegdyś przez zwolenników akumulatywnego rozwoju wiedzy"[274]. W związku z tym pojawił się problem filozoficzny — jak pogodzić

koncepcji „proces badawczy jest traktowany jako całościowy i dynamiczny system, jako jedność strukturalna i funkcjonalna z powiązaniami i sprzężeniami między jej elementami" (J. Ropek, „Metodologia systemowa...", s. 114). W prezentowanym podejściu autorzy skupiają się jednak bardziej na cechach systemowych nauki, niż na dynamice procesu rozwoju nauki. Koncepcja ta jest interesująca z naszego punktu widzenia, ponieważ podkreśla kategorię całościowości systemu nauki i podstawowy charakter sprzężeń zwrotnych w nauce. Są to istotne czynniki, które są konieczne dla zrozumienia dynamiki rozwoju nauki. W tym sensie rozważania Lubańskiego i Ślagi stanowią więc punkt wyjścia do budowania koncepcji dynamiki nauki. Pewnym mankamentem zaproponowanych rozwiązań jest ich bardzo ogólny charakter — brakuje oparcia rozważań na materiale z historii nauki, lub wręcz na pewnych potwierdzonych modelach nauki. Możliwym wyjściem z tej sytuacji może być próba zastosowania tej koncepcji do pewnych modeli dynamiki rozwoju nauki. Wówczas wprowadzonym tu pojęciom można by nadać interpretacje wynikające z modelu dynamicznego.

[273] Por. M. Heller, „Kilka uwag o rozwoju nauki" w: *Fizyka ruchu i czasoprzestrzeni*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993, ss. 168–180; M. Heller, „Nieliniowa ewolucja nauki" w: *Szczęście w przestrzeniach Banacha*, ZNAK, Kraków 1995, ss. 159–160; M. Heller, *Filozofia nauki. Wprowadzenie*, OBI–Wydawnictwo Naukowe PAT, Kraków 1992, ss. 53–72; M. Heller, „Nieliniowa ewolucja nauki", *Roczniki Filozoficzne (KUL)*, 22 (1984), 105–125.

[274] M. Heller, „Nieliniowa ewolucja...", s. 159–160.

zaobserwowaną ciągłość z powszechnym przekonaniem o katastroficzności (rewolucyjności) rozwoju nauki. Model bifurkacyjny miał być próbą jego rozwiązania. Przyjrzyjmy się, jakie nowe rozumienie ciągłości w rozwoju nauki proponuje M. Heller.

Badania Hellera i Rainego[275] wykazały, że kolejne teorie dynamiczne, przedstawione w formalizmie geometrii różniczkowej, wykazują logiczny rozwój struktur modelujących czasoprzestrzeń kolejnych teorii. Ciągłość i logika rozwoju nauki jest zatem, według Hellera, wynikiem logicznych uogólnień struktur modelujących rzeczywistość. Okazuje się również, wbrew poglądom antykumulatywistów, że z odpowiednio ogólnego poziomu (formalizmu) można rekonstruować struktury matematyczne używane w poprzednich teoriach tak, aby zachować ich właściwości dynamiczne. Zatem teza o nieprzekładalności terminów teorii oddzielonych rewolucją napotyka na ograniczenie: okazuje się, że możliwy jest przekład teorii starszej w terminach nowszych, ogólniejszych teorii. Wyniki Hellera i Rainego nie stanowią dowodu, iż musi się tak dziać w każdym przypadku rewolucji naukowej, poddają jednak w wątpliwości tezę o absolutnej nieprzekładalności struktur teorii.

W koncepcji Hellera matematyczna struktura teorii okazuje się zatem podstawą ciągłości rozwoju nauki w okresach rewolucji. Można by to spróbować wytłumaczyć następująco[276]: Kuhn (i inni antykumulatywiści) operowali *pojęciami teorii*, które jak się wydaje są pochodne wobec *matematycznej struktury teorii*. W przypadku pojęć teorii oddzielonych rewolucjami naukowymi można wykazywać niewspółmierności między ich zawartością treściową. Treść pojęć jest bowiem określona nie tylko przez matematyczną strukturę teorii. Zagadnienie treści pojęcia jest uwikłane w cały skomplikowany problem znaczenia. Innymi słowy — wydaje się, że pojęcia danej teorii nie są jednoznacznie determino-

[275] D. J. Raine, M. Heller, *The Science of Space–Time*, Pachart Publishing House, Tucson 1981. Zob. także M. Heller, *Fizyka ruchu i czasoprzestrzeni*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.

[276] Jest to moja próba rozwiązania tego problemu, rozwijająca sugestie zawarte w pracach: M. Heller, „Nieliniowa ewolucja...” oraz M. Heller, *Filozofia nauki...*.

wane jedynie matematyczną strukturą tej teorii. Tłumaczy to, dlaczego w przypadku pojęć tak trudno wykazać ciągłość rozwoju[277]. Natomiast w przypadku matematycznych struktur modelujących wybrany aspekt rzeczywistości można argumentować zgodnie ze stanowiskiem realizmu niereprezentacyjnego[278], że kolejne z nich stosują się coraz lepiej do tej rzeczywistości. Tak więc stanowią one coraz lepsze formalne przybliżenia struktury rzeczywistości widzianej z perspektywy wybranego aspektu.

Powróćmy teraz do bifurkacyjnego modelu rozwoju nauki. Po stwierdzeniu ciągłości i logiczności zmian, Heller zauważa analogie pomiędzy procesem rozwoju teorii a procesem ewolucyjnym[279], w związku z czym proponuje zastosowanie aparatu teorii układów dynamicznych do badania rozwoju nauki. Analogicznie do Kuhna wyróżnia on dwa typy zachowań procesu rozwoju nauki. Pierwsze z nich to *fazy stacjonarne* rozwoju, kiedy występuje przewaga mechanizmów pochodzących z „wewnętrznej logiki rozwoju". Innymi słowy są to badania prowadzone w ramach programu badawczego[280]. Drugie, to *stany bifurkacyjne* — „okresy wrzenia" w nauce, kiedy małe fluktuacje mogą spowodować duże zmiany. Heller stwierdza, że do badania rozwoju nauki w tych stanach najbardziej odpowiednie są metody historyczne i socjologiczne — logika rozwoju widoczna jest dopiero z szerszej perspektywy.

---

[277] Używając pojęcia stabilności z poprzedniego rozdziału można powiedzieć, że *pojęcia teoretyczne* wykazują mniejszą stabilność treściową w procesie tłumaczenia niż *struktury matematyczne teorii*. Da się to łatwo wytłumaczyć, odwołując się do ścisłych (zatomizowych) znaczeń elementów struktury matematycznej określanych formalizmem, w przeciwieństwie do rozmytych i nieścisłych znaczeń pojęć języka naturalnego używanego do wyrażenia pojęć teoretycznych. Zaznaczmy, że jest to jedynie wprowadzenie do problemu, a zagadnienie to wymaga opracowania i przebadania odpowiedniego modelu formalnego.

[278] Por. A. Chalmers, *Czym jest to, co zwiemy nauką?*, Wydawnictwo Siedmioróg, Wrocław 1997, ss. 204–206.

[279] M. Heller, „Nieliniowa ewolucja...", ss. 160–161.

[280] M. Heller, *Filozofia nauki...*, s. 69.

Odpowiada to stanowi nauki zwanemu zwykle rewolucją, jednak nie są to rewolucje naukowe w dotychczas używanym sensie. Heller używa pojęcia: *rewolucja przez bifurkacje*. Owszem, dochodzi w nich do niestabilnego rozwoju nauki, mogą występować różne nieprzewidywalne zwroty, ale jest to przejście kierowane „logiką bifurkacji”[281], dającą w efekcie nową, lepszą strukturę matematyczną teorii. Zaznaczmy, że według tej koncepcji jest to przejście ciągłe w przedstawionym powyżej sensie. Heller dodaje: „rewolucje nie są wynikiem tajemnego spisku, lecz stanowią istotną część logiki rozwoju. Nieprzewidywalne są tylko fluktuacje, które dokonują przewrotu i skierowują układ do nowego reżimu ewolucyjnego”[282]. Można zatem przewidywać wystąpienie rewolucji (destabilizacji nauki), lecz nie można przewidzieć jej efektu, gdyż zależy on od przypadkowych czynników, głównie natury eksternalistycznej.

Heller podkreśla rolę modelu bifurkacyjnego w wyjaśnianiu historycznym. Model ten, odwołując się do teorii układów dynamicznych[283], tłumaczy, dlaczego nie możemy przewidzieć przyszłej historii rozwoju nauki, a jednocześnie dlaczego możemy zrekonstruować w ramach spójnej teorii przeszłą historię rozwoju nauki. W kontekście powyższej analizy należałoby dodać, że zamiast mówienia o historii rozwoju nauki lepiej byłoby mówić o historii rozwoju matematycznych struktur wybranych teorii. Heller podkreśla, że można w ramach tego podejścia wykazywać w przeszłej historii rozwoju racjonalność przejść (nawet rewolucyjnych). Zaznacza jednak, że „logika rozwoju ujawnia się dopiero po kilku bifurkacjach”[284]. Na potwierdzenie tych koncepcji odwołuje się jeszcze do analizy historycznej, dodając: „wszystkie genialne rewolucje naukowe *ex post* wydają się proste i logiczne”.

---

[281] To sytuacja analogiczna do opisywanych przez teorię chaosu deterministycznego — chociaż działają prawa deterministyczne, to ich forma jest taka, że skutek ich działania jest nieprzewidywalny.

[282] M. Heller, *Filozofia nauki. Wprowadzenie*, OBI–Wydawnictwo Naukowe PAT, Kraków 1992, ss. 67–68.

[283] Chodzi tu w szczególności o procesy chaotyczne i nieodwracalne.

[284] M. Heller, „Nieliniowa ewolucja. . . ”, s. 180.

[284]Tamże, s. 182.

Podsumowując koncepcję Hellera, można się posłużyć krótkim i trafnym stwierdzeniem autora: „Nauka jest procesem odległym od stanu równowagi. Do jej istoty należy rozwój przez fluktuacje”[285], zaś „[...] model ten harmonijnie łączy dwa dotychczas przeciwstawne obrazy rozwoju nauki: obraz «wewnętrznej logiki rozwoju» i obraz katastroficznych rewolucji”[286]. Patrząc na przeprowadzoną powyżej analizę, można łatwo wskazać dalsze kierunki badań nad istotą rozwoju nauki, które pojawiają się na horyzoncie tych rozważań. Sądzę, że bardzo interesujące mogą być badania ewolucji struktur matematycznych następujących po sobie teorii. Co prawda, wymagałoby to zapewne opracowania odpowiednich metod pozwalających na reprezentację kolejnych struktur przetłumaczonych w ramach jakiejś jednej struktury. Uczyniony został już pierwszy krok — prace Hellera i Rainego oraz innych badaczy[287] przygotowały materiał dla takich badań. Dzięki nim posiadamy już zrekonstruowany ciąg matematycznych struktur czasoprzestrzeni, czyli podstawę do dalszych badań.

6.3. Koncepcja W. E. Herfela i C. A. Hookera

W. E. Herfel i C. A. Hooker, pracujący w ramach grupy badawczej CASRG[288] (ang. *Complex Adaptive Systems Research Group*), podjęli prace nad zastosowaniem koncepcji wynikających z badań nad układami dynamicznymi i złożonymi układami adaptacyjnymi do badania rozwoju nauki. W artykule[289], zaprezentowanym na 10 Międzynarodowym

[285] M. Heller, „Wstęp do rewolucji naukowej” w: *Szczęście w przestrzeniach Banacha*, Znak, Kraków 1995, s. 145.

[286] M. Heller, *Filozofia nauki...*, s. 71.

[287] Spis innych geometrycznych rekonstrukcji teorii dynamicznych znajdziemy w: M. Heller, „Nieliniowa ewolucja...”, s. 166.

[288] Więcej informacji na temat tej grupy można znaleźć na stronie <http://www.newcastle.edu.ca/centre/casrg/index.html>.

[289] W. E. Herfel, C. A. Hooker, „From formal machine to social colony: Toward a complex dynamical philosophy of science” w: *Language, Quantum, Music: Select Proceedings of the 10th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy*

Kongresie Logiki, Metodologii i Filozofii Nauki, przedstawili wyniki swoich rozważań. Postawili sobie za cel „poszukiwanie modelu nauki, z pomocą którego akceptowane teorie, praktyka i zjawiska rozwijają się we wspólnych dynamicznych interakcjach”[290].

Wyszli od krytyki rekonstrukcjonizmu logicznego twierdząc, że model zredukowany do interakcji kilku prostych reguł logicznych (zwanych metodą naukową) nie jest w stanie opisać złożonego charakteru rozwoju nauki. Herfel i Hooker twierdzili, że „ten analityczny ideał jest teraz stopniowo odrzucany i widzimy, że jest on także głęboko nieadekwatny do dynamicznego charakteru nauki, dając w rezultacie błędny zbiór pytań i problemów”[291]. Zmiana perspektywy badawczej miała zatem służyć również skierowaniu dysputy filozoficznej na bardziej odpowiednie tory. Tym bardziej adekwatnym podejściem miało być rozważanie nauki jako układu dynamicznego.

We wcześniejszych pracach Herfel i Hooker udowadniali, że nieliniowa dynamika jest charakterystyczna dla nauki (Herfel), oraz że system naukowo–techniczny jest nieliniowym systemem dynamicznym, posiadającym wiele cech wyróżniających organizmy żywe (Hooker)[292]. Powstaje więc pytanie, czym jest i jak wygląda dynamiczna nauka w koncepcji tych badaczy.

Herfel i Hooker twierdzą, że nauka jest systemem, który „zawiera obecnie system indywidualnych naukowców oddziałujących nieliniowo (np. zmieniających wzajemnie swoje przekonania i zachowanie), poddany zbiorowi ograniczeń o charakterze instytucjonalnym (np. procedury laboratoryjne, proces publikacji artykułów i konwencje oceniania) i wspomagany, tj. ograniczony w stanie dalekim od równowagi, przez przepływ zasobów (energii, dóbr, usług, pieniędzy) przez niego”[293]. Za-

of Science, M. L. Dalla Chiara et al. (red.), Kluwer Academic Publishers, Boston 1998, ss. 7–18 (wszystkie cytaty pochodzące z tego artykułu podawane są w tłumaczeniu własnym).

[290] Tamże, s. 7.

[291] Tamże, s. 11.

[292] Por. tamże, s. 7.

[293] Tamże, s. 11.

tem cechami charakterystycznymi tak pojmowanej nauki są: systemowość, hierarchiczność poziomów (np. poziom poszczególnych naukowców, dziedziny, cały system nauki), nieliniowe oddziaływania między elementami, przebywanie w stanie dalekim od równowagi, poddanie różnorodnym ograniczeniom. Wspomnianych badaczy interesuje dynamika socjologiczno–kognitywistycznej struktury nauki (*socio–cognitive structure of science*).

W omawianej pracy Herfel i Hooker podali schemat wykorzystania pojęć dynamiki nieliniowej do modelowania nauki jako systemu nieliniowych interakcji. Wymienili oni 10 grup pojęć takich, jak bifurkacje, nieodwracalność, samoorganizacja, adaptacyjność, itd. Zaproponowali również sposób interpretacji tych pojęć w celu wykorzystania ich do badania nauki (oczywiście w ramach przyjętego przez siebie rozumienia tejże). Szczególnie interesujące są koncepcje związane z adaptacyjnością, samoorganizowaniem się systemu nauki oraz z cechami rewolucyjnych zmian w nauce. Przyjrzyjmy się im po kolei.

Herfel i Hooker zauważyli, że nauka, rozumiana jako system nieliniowych oddziaływań dynamicznych, „[...] jest wysoce adaptacyjnym systemem ze względu na jej zinstytucjonizowaną wrażliwość na informacje ze środowiska (wyniki, dane) i zaangażowanie we włączanie tej informacji w jej przyszłe sposoby działania”[294]. Cecha wrażliwości na informacje ze środowiska jest próbą ujęcia tego aspektu nauki, który ukazuje ją jako proces silnie zależny od uzyskiwanych wyników i danych. Informacjami ze środowiska mogą być np. wyniki pomiarów. Znamy wiele przykładów, gdy wyniki pewnych pomiarów wpływały bardzo silnie na dalszy rozwój nauki, prowadząc niekiedy nawet do głębokiej przebudowy aparatu teoretycznego danej dyscypliny[295]. Herfel i Hooker

[294] Tamże, s. 13.

[295] Za przykład może posłużyć wynik doświadczenia Michelsona–Morleya, który zmusił fizyków do przebudowy systemu teoretycznego. Jego efektem było odrzucenie koncepcji eteru, a w dalszej perspektywie — stworzenie szczególnej teorii względności. Por. np. M. Rival, *Wielkie eksperymenty naukowe*, Cyklady, Warszawa 1997, ss. 114–119.

proponują zatem, aby uznać wyniki i dane za parametry sterujące rozwojem nauki[296]. Nauka jest więc systemem adaptacyjnym w tym sensie, że dostosowuje swoją strukturę teorii do danych otrzymywanych przy badaniu świata zewnętrznego.

Kolejną ciekawą koncepcją jest samoorganizowanie się nauki. Autorzy stwierdzają, że przejawia się ono w wyłanianiu się pewnych struktur organizacyjnych w nauce pod wpływem rozwoju nauki (jako wynik dynamiki rozwoju nauki). Innym jego aspektem jest wyłonienie się pewnych struktur wiedzy. Działalność poszczególnych naukowców i ich nieliniowe oddziaływania na siebie z konieczności prowadzą do wytworzenia takich struktur, twierdzą autorzy. Zjawisko to ma jeszcze inny aspekt — powstała struktura ma ograniczający wpływ na dynamikę poszczególnych naukowców[297], z drugiej strony umożliwia przeprowadzanie badań, niemożliwych do wykonania przez jednostki[298]. Struktury wyłaniają się w wyniku działalności naukowej i zarazem modyfikują jej dynamikę — zachowanie naukowców tworzy i podtrzymuje te struktury[299]. To kolejny przykład nieliniowej pętli sprzężenia zwrotnego w nauce. Autorzy ujmują to zjawisko następującymi słowami: „w samoorganizowaniu się nowego, globalnego porządku system nie tylko po prostu używa jego istniejących makroskopowych dynamicznych praw do reorganizacji siebie, ale zmienia te prawa poprzez wprowadzenie nowych rodzajów wewnętrznych ograniczeń”[300]. Rozważania te rzucają interesujące światło na problem powstawania nauki zinstytucjonalizowanej i na problem powstawania zorganizowanych struktur wiedzy (struktur teoretycznych).

[296] Pewną trudność sprawia to, że wyniki i dane również zależą od rozwoju samej nauki. Prowadzi to do znacznego skomplikowania struktury wspomnianej zależności.

[297] Dla przykładu, ograniczenia instytucjonalne, np. przynależność do danego instytutu, modyfikują zachowanie naukowca jako jednostki.

[298] Na tę bardzo istotną rolę ograniczeń strukturalnych w rozwoju nauki zwrócił uwagę już T. Kuhn przy omawianiu istoty nauki normalnej (por. T. S. Kuhn, „Istota nauki normalnej” w: *Struktura rewolucji naukowych…*, ss. 53–72).

[299] Por. W. E. Herfel, C. A. Hooker, „From formal machine…”, ss. 14–15.

[300] Tamże, s. 12.

Warto wspomnieć jeszcze o tym, jak w koncepcji Herfela i Hookera prezentuje się problem rewolucji naukowych. Są to gwałtowne zmiany, których źródłem, podobnie jak w poprzednich koncepcjach, jest wewnętrzna dynamika nauki. Ciekawe jest jednak, że autorzy twierdzą, iż rewolucje naukowe „mogą być rozróżnione jedynie przez ich efekty dynamiczne od innych złożonych, lecz bardziej powierzchownych zmian pojawiających się cały czas”[301]. Nauka ciągle zmienia się, a jedynie badając efekty tego rozwoju (zmiany dynamiki) można wnioskować o rewolucji. Jest to więc koncepcja nauki w ciągłej przebudowie. Pierwotnie ostry u Kuhna podział na naukę zinstutucjonalizowaną i rewolucyjną, u Herfela i Hookera jest już rozmyty. W związku z tym debata nad wyjątkowością rewolucji ma już sens tylko na płaszczyźnie badania dynamiki rozwoju nauki. Pytania o racjonalność i kumulatywność przejść rewolucyjnych są zatem dokładnie tak samo sensowne, jak pytania o racjonalność i kumulatywność najmniejszej zmiany w nauce. Wydaje się, że Herfel i Hooker odsunęli najpoważniejsze filozoficzne problemy, związane z rozwojem nauki, w sferę problemów źle postawionych. Do takich wniosków można dojść zgadzając się na cały ciąg założeń, jakie poczynili autorzy. Wydaje się jednak, że nie wszystkie z nich trzeba koniecznie przyjmować. Niemniej można powiedzieć, że w perspektywie takiej, jaka została przyjęta przez autorów, pytania o racjonalność i kumulatywność rewolucji naukowych są bezsensowne, co wynika z innej perspektywy patrzenia na rewolucje naukowe i proces zmiany naukowej w ogóle.

Autorzy zwracają jeszcze uwagę, na to że zachowanie systemów z dynamiką nieliniową (a zatem również nauki) nie jest determinowane jedynie ich prawami interakcji, lecz również ograniczeniami zewnętrznymi. Zatem model musi być dostosowywany do występujących konkretnie warunków ograniczających. Nie jest możliwe, według Herfela i Hookera, stworzenie jednego uniwersalnego modelu, właśnie ze względu na niemożliwość uwzględnienia wszystkich potencjalnych ograniczeń rozwoju, mogących kształtować jego dynamikę. Twierdzą oni, że wsku-

[301] Tamże, s. 13.

tek tego nie może być adekwatna żadna wielka, zunifikowana teoria nauki, posługująca się prostymi modelami logicznymi[302]. Stanowi to kolejny argument przeciw rekonstrukcji logicznej, czyli koncepcji nauki jako „formalnej maszyny" — używając terminologii autorów. Jak wobec tego prowadzić badania nad nauką? Herfel i Hooker dają następującą odpowiedź: „musimy studiować naukę tak, jak to zawsze czynimy, tj. historycznie, iterując przy pomocy sekwencji następujących oddziaływań, jak rozchodzą się one nieliniowo w systemie, generalizując tam, gdzie jest to możliwe. Każda zmiana naukowa jest w pewnej mierze wyjątkowa (*unique*) i musi być zrozumiana w swych własnych terminach — jednak nic z tego nie prowadzi do odrzucenia racjonalności, a jedynie [do odrzucenia] prostego logicznego modelu racjonalności"[303].

Na koniec warto wspomnieć o koncepcji norm regulujących działalność naukową. Herfel i Hooker zauważyli, że „normy wynikają z praktyki i odwrotnie rzecz biorąc, regulują praktykę"[304]. Stwierdzają, że każda z norm ma konsekwencje dynamiczne — przyjęcie normy zmienia dynamikę badań. Normy badawcze (np. procedury laboratoryjne) są pewnym ograniczeniem procesu badawczego (wskazują, jakie badanie jest niedopuszczalne, a jakie możliwe), wpływają więc one na działalność badawczą, która z kolei może prowadzić do powstawania nowych norm lub modyfikacji starych. Metody naukowe rozwijają się zawsze w nieliniowych oddziaływaniach z teorią i danymi. Herfel i Hooker postulują, ażeby normy metodologiczne „bazowały na empirycznych modelach tego, co jest dynamicznie stosowne i niezawodne (*dynamically relevant and reliable*)"[305]. W związku z tym twierdzą, że zaciera się pierwotnie ostra granica pomiędzy normatywną a dynamiczną stroną nauki. Konkludują te rozważania następującymi słowami: „jedynie dynamiczna koncepcja norm, twierdzimy, jest w stanie właściwie zawrzeć

[302] Por. tamże, s. 15.
[303] Tamże, s. 16.
[304] Tamże, s. 16.
[305] Tamże, s. 16.

fundamentalną społeczną i historyczną naturę nauki”[306]. Tak więc Herfel i Hooker zaproponowali dynamiczny obraz nauki, w której normy, teorie, struktury wiedzy i struktury instytucjonalne rozwijają się splecione siecią nieliniowych oddziaływań, której owocem jest bogata i wielopoziomowa dynamika systemu. Można sądzić, że sieć nieliniowych zależności występujących w nauce tłumaczy, dlaczego dotychczasowe próby „linearnego” podejścia do nauki napotykają tak mocne ograniczenia — występują efekty, których nie da się wytłumaczyć przy pomocy struktur oddziaływań liniowych (np. klasyczna logika).

Podejście Herfela i Hookera obarczone jest zasadniczym mankamentem — autorzy używają pojęć matematycznych teorii (np. układów dynamicznych), nie budując jednak i nie sprawdzając żadnych modeli, posługując się jedynie analogiami. Wydaje się, że bez zbudowania odpowiednich modeli i testowania ich, ten kierunek badań może zacząć oddalać się coraz bardziej w kierunku czystych, oderwanych od rzeczywistości spekulacji. Herfel i Hooker zaznaczają co prawda, że ich propozycja jest próbą ukazania pewnych możliwości budowania koncepcji rozwoju nauki, nie podają jednak, w jaki sposób można myśleć o zbudowaniu na jej podstawie spójnej koncepcji rozwoju nauki. Pomimo licznych niedoskonałości podejście takie wydaje się jednak z wielu względów interesujące.

Zaprezentowane w niniejszym rozdziale koncepcje filozoficzne pokazują, że twórcze wykorzystywanie wyników osiągniętych na gruncie badań naukometrycznych może istotnie wzbogacić filozoficzną refleksję nad rozwojem nauki. Dzięki zastosowaniu układów dynamicznych możemy zrozumieć pewne zjawiska w rozwoju nauki, których nie dało się wyjaśnić z tradycyjnego punktu widzenia. Jako przykład może posłużyć koncepcja Hellera, w której wykorzystano mechanizm bifurkacji, aby wytłumaczyć w obrębie jednej struktury możliwość występowania nieprzewidywalności rozwoju nauki oraz fakt zrozumiałości historii jej rozwoju *ex post*.

[306] Tamże, s. 7.

Przykład ten pokazuje wyraźnie wpływ badań prowadzonych przy pomocy układów dynamicznych na filozofię nauki. Badania te otworzyły nowe drogi dla refleksji filozoficznej. Dzięki nim doszło do zmian w rozumieniu samych sytuacji problemowych występujących w filozofii nauki. Filozoficzna debata nad nauką niewątpliwie postawiła kolejny krok naprzód.

Zakończenie

Nauka w XX wieku przeszła kilka rewolucyjnych zmian. Mechanika kwantowa i teoria względności są najlepiej rozpoznawanymi przykładami rewolucyjnych wstrząsów, których doświadczyły podstawy nauki. Wielkie rewolucje naukowe pociągały za sobą nie tylko zmiany w sposobie pojmowania świata, lecz również powodowały zmiany w zapatrywaniach na samą metodę naukową[307].

Niejako w cieniu tych wielkich przemian dokonała się inna zmiana, której konsekwencje wciąż pozostają słabo rozpoznane. Chodzi o fakt wykorzystania nauki do badania jej własnej istoty, który dokonał się na gruncie naukoznawstwa. Było to wydarzenie bez precendensu, ponieważ dotychczas taki zabieg można było wykonywać jedynie na gruncie filozofii (tworząc metafilozofię, czyli filozofię filozofii). Co ciekawe, nie dokonało się to przy okazji rewolucji naukowej, lecz było wynikiem pewnego wewnętrznego procesu wynikającego z prowadzonych badań naukowych[308]. Wykorzystanie metody naukowej do badania jej samej tworzy specyficzne samoodniesienie badawcze nauki. Jest to fakt domagający się filozoficznego wytłumaczenia. Obecnie nie można już przechodzić obok niego obojętnie ze względu na skuteczność empirycznych badań nauki.

Niniejsza praca miała za cel przybliżenie podstawowych kwestii związanych z zagadnieniem modelowania rozwoju nauki przy pomocy

[307] Znamienne są słowa Mariana Smoluchowskiego, wielkiego polskiego fizyka, który był wnikliwym obserwatorem zmian dokonujących się w rozumieniu metody naukowej pod wpływem obu wspomnianych rewolucji naukowych. Pisał on: „Dzisiaj w teoriach fizycznych nie upatrujemy trwałej treści nauki, lecz narzędzie badania" (M. Smoluchowski, „Kierunki i zagadnienia fizyki dzisiejszej" w: *Wybór pism filozoficznych*, PWN, Warszawa 1956, s. 457). To krótkie zdanie napisane w 1917 roku odzwierciedla istotę dramatycznego przewrotu, który dokonał się w fizyce na przełomie wieków. Na skutek rewolucji naukowej zmieniły się również poglądy na naturę i rolę badań naukowych.

[308] Zob. L. Leydesdorff, *The Challenge of Scientometrics. The Development, Measurment, and Self–organisation of Scientific Communication*, Universal Publishers/ uPUBLISH.com, USA 2001, s. 15.

układów dynamicznych. Należy być świadomym, że są to dopiero początki badań filozoficznych nad modelami naukometrycznymi. W związku z tym wiele kwestii jest sformułowanych niejasno i wymaga na pewno dalszego doprecyzowania. Również zbiór problemów i implikacji filozoficznych z pewnością daleki jest od pełności, lecz dopiero przyszły rozwój problematyki ujawni z pewnością wiele kwestii, które dzisiaj pozostają niedostrzeżone.

Wykorzystując naukę do badania jej samej odkrywamy nowe, nieznane dotąd oblicze nauki. Zmusza nas to do ponownego przemyślenia pewnych fundamentalnych kwestii związanych z filozofią nauki[309]. Takie odkrycie jest intrygujące z filozoficznego punktu widzenia, ponieważ ukazuje, że nauka odsłania wciąż nowe cechy, których nabywa w trakcie swego rozwoju. Ukazuje się nam ona jako konstrukcja dynamiczna, podlegająca ciągłym zmianom — swoistej ewolucji. W związku z tym widać coraz wyraźniej, że nauka nie może być zrozumiana w oderwaniu od historii jej rozwoju. Z tej perspektywy dobrze widać, dlaczego propozycje rekonstrukcji jednej, ponadczasowej logiki rozwoju nauki napotykać muszą na poważne trudności.

Adaptatywność, bifurkacje, niestabilność rozwoju, wyłanianie się struktur — te pojęcia zaczerpnięte z nauki o złożoności mogą odegrać w najbliższym czasie zasadniczą rolę w zrozumieniu *wewnętrznej logiki* rozwoju nauki. Owszem, od zaprezentowanych w niniejszej książce stosunkowo prostych modeli do problemu istoty rozwoju nauki dzieli nas daleka droga. Niemniej pierwszy krok został postawiony — odkryta została droga badania nauki, która w obiecujący sposób może dopomóc w rozjaśnieniu tajemnicy, jaką wciąż jest dla nas nauka.

Przyszłość filozoficznych badań nad dynamiką nauki niewątpliwie będzie silnie związana z postępami w rozumieniu natury systemów złożonych[310]. Nauka jest bowiem systemem, który wykazuje złożone za-

---

[309] W niniejszej pracy pokazano na przykład konieczność dokonania rozróżnienia treściowego i ilościowego rozwoju nauki. Rozróżnienie takie nigdy wcześniej nie było konieczne, ponieważ nie istniał problem badań naukometrycznych.

[310] Istnieje bogata literatura na ten temat. Jako wprowadzenie do tych zagadnień

chowanie. Konieczne jest dalsze pogłębianie analizy metodologicznej problemu modelowania rozwoju nauki. Ze względu na charakter niniejszego opracowania przedstawiono tu jedynie pewną szkicową próbę takiej analizy.

Dzięki wykorzystaniu modeli dynamicznych i ukazaniu głębokich analogii pomiędzy rozwojem nauki a innymi procesami znanymi z przyrody otwierają się nowe perspektywy badania nauki. W chwili obecnej filozoficzna refleksja nad rozwojem nauki jest jednak wciąż słabo rozwinięta. Prowadzone rozważania idą w różnych kierunkach, co jest zjawiskiem typowym dla początkowego okresu rozwoju każdej nowej dziedziny. Poza koncepcjami, które zostały zaprezentowane w niniejszej książce, warto zwrócić uwagę na kilka innych, które nie zostały dotąd wspomniane. Prezentują one odmienne kierunki refleksji zainspirowanej badaniami naukometrycznymi i z tej racji wykraczały poza zakres tego opracowania. Ich lektura może jednakże wzbogacić obraz nowego nurtu badań filozoficznych i dać dobry materiał do własnych przemyśleń.

Pierwsza ze wspomnianych prac, napisana przez L. Leydesdorffa[311], ukazuje szeroką perspektywę badań naukoznawczych. Jest to interesująca praca napisana przez autora, który należy do ścisłej czołówki badaczy z dziedziny naukometrii. Kolejna praca prezentuje filozoficzne aspekty związane z próbami tworzenia modeli ewolucyjnych w epistemologii[312]. Jest ona reprezentantką innego kierunku refleksji filozoficznej[313] niż

---

można polecić dwie książki: P. Coveney, R. Highfield, *Granice złożoności. Poszukiwania porządku w chaotycznym świecie*, Prószyński i S–ka, Warszawa 1997; Y. Bar–Yam, *Dynamics of complex systems*, Addison–Wesley, Massachusetts 1997.

[311] L. Leydesdorff, *The Challenge of Scientometrics. The Development, Measurment, and Self–organisation of Scientific Communication*, Universal Publishers/uPUBLISH.com, USA 2001; <`http://www.upublish.com/books/leydesdorff.htm`>.

[312] J. S. Wilkins, *Evolutionary models of scientific theory change*, Master thesis, Departament of Philosophy, Monash University 1995, <`http://members.dodo.com.au/~wilkinsjandp/papers/MA/Thesis.html`>.

[313] Bliższe informacje o tym kierunku można znaleźć w artykule: M. Bradie, W. Harms, „Evolutionary Epistemology", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta (red.), <`http://plato.stanford.edu/archives/spr2004/entries/`

zaprezentowana w niniejszym opracowaniu. Mimo, iż niektóre z prezentowanych tam poglądów są dyskusyjne (np. możliwość utworzenia przestrzeni stanów dla opisu rozwoju treści teorii), niemniej praca ta przedstawia dobry zarys interesującego programu badawczego. Warto również zwrócić uwagę na prace powstające w ramach wspomnianego już ośrodka CASRG, w którym działają W. Herfel i C. A. Hooker. Badania pracujących tam filozofów idą w różnych kierunkach, lecz łączy ich zainteresowanie systemami adaptacyjnymi[314].

Badania nad dynamiką rozwoju nauki ujawniły istnienie nowej płaszczyzny refleksji filozoficznej. Wykorzystanie tej nowej drogi przez filozofię nauki możne spowodować znaczący postęp w badaniach nad nauką. Jak wskazuje koncepcja Hellera, być może właśnie w zrozumieniu dynamicznej strony nauki leży klucz do rozwiązania trudnych problemów filozofii nauki. Może stoimy właśnie u progu nowego rozdziału refleksji nad nauką...

`epistemology-evolutionary/`>.

[314] W wyniku prac grupy CASRG powstało wiele interesujących prac. Warto tutaj przytoczyć dwie z nich: J. D. Collier, C. A. Hooker, „Complexly Organised Dynamical Systems”, *Open Systems and Information Dynamics*, 6 (1999), 241-302 oraz pod adresem internetowym: <`http://www.newcastle.edu.au/centre/casrg/publications/Cods.pdf`>; W. Christensen, C. A. Hooker, *Self–directed anticipative learning processes in science*, 30.11.2004, <`www.newcastle.edu.au/centre/casrg/publications/SDALSCIv7.pdf`>.

Literatura

Arnold W. I., *Równania różniczkowe zwyczajne*, PWN, Warszawa 1975;

Arystoteles, *O Duszy*, tłum. P. Siwek, PWN, Warszawa 1972;

Avramescu A., „Eksploracyjne metody prognozowania", *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 7 (1971), 220–234;

Baker G. L., Gollub J. P., *Wstęp do dynamiki układów chaotycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998;

Bar–Yam Y., *Dynamics of complex systems*, Addison–Wesley, Massachusetts 1997;

Barile M., *Verhulst, Pierre – Francois (1804–1849) — from Eric Weisstein's World of Scientific Biogrphy*, 30.11.2004, `<scienceworld.wolfram.com/biography/Verhulst.html>`;

Bartkowski A., *Bibliometria i patentometria*, 17.03.2003, `<http://inpat.republika.pl/inne-bibliom.html>`;

Bernal J. D., Mackay A. L., „Na drodze do naukoznawstwa", *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 2 (1966), 9–17;

Bernal J. D., *The Social Function of Science*, London 1939;

Blackburn S., „Malthus Thomas Robert (1766–1834)" w: *Oksfordzki słownik filozoficzny*, Książka i Wiedza, Warszawa 1997;

Bradie M., Harms W., „Evolutionary Epistemology", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta (red.), 30.11.2004, `<http://plato.stanford.edu/archives/spr2004/entries/epistemology-evolutionary/>`;

Bruckner E., Ebeling W., Scharnhorst A., „The Application of Evolution Models in Scientometrics”, *Scientometrics*, 18 (1990), 21–41;

Candolle A. de, *Historie des Sciences et des Savants Depuis Deux Siècles, d'après l'Opinion des Principales Académies ou Sociétés Scientifiques*, Librairie Arthème Fayard, Paris 1987;

Chalmers A., *Czym jest to, co zwiemy nauką?*, Wydawnictwo Siedmioróg, Wrocław 1997;

Church A., „A bibliography of symbolic logic”, *The Journal of Symbolic Logic*, 1 (1936), 121–218;

Church A., „Additions and corrections to *A bibliography of symbolic logic*”, *The Journal of Symbolic Logic*, 3 (1938), 178–192;

Christensen W., Hooker C. A., *Self–directed anticipative learning processes in science*, 30.11.2004, <`http://www.newcastle.edu.au/centre/casrg/publications/SDALSCIv7.pdf`>;

Collier J. D., Hooker C. A., „Complexly Organised Dynamical Systems”, *Open Systems and Information Dynamics*, 6 (1999), 241–302;

Copleston F., *Historia filozofii. T. 3, Od Ockhama do Suáreza*, Instytut Wydawniczy PAX, Warszawa 2001;

Coveney P., Highfield R., *Granice złożoności. Poszukiwania porządku w chaotycznym świecie*, Prószyński i S–ka, Warszawa 1997;

Dadaczyński J., „Heurystyka teorii mnogości Georga Cantora” w: *Matematyka w oczach filozofa Jedenaście artykułów z filozofii matematyki*, OBI–Kraków, Biblos–Tarnów, 2002;

Dadaczyński J., *Filozofia matematyki w ujęciu historycznym*, OBI–Kraków, Biblos–Tarnów, 2000;

Daley D. J., „Concerning the spread of news in a population of individuals who never forget”, *Bulletin on Mathematica Biophysics*, 29 (1967), 373–376;

Dawkins R., *Samolubny gen*, Prószyński i S–ka, Warszawa 1996;

Dobrow G. M., „Tiendiencyi razwitia organizacyi nauki”, *Organon*, 2 (1965), 227–242;

Egghe L., Rao I. K., „Classification of growth models based on growth rates and its applications”, *Scientometrics*, 25 (1992), 5–46;

Evans G., Honkapohja S., Romer P., „Growth cycles”, NBER Working Paper 5659, National Bureau of Economic Research, Cambridge 1996;

Falbo C. E., *Analytic and Numerical Solutions to the Delay Differential Equation* $y'(t) = \alpha y(t - \delta)$, 30.11.2004, `<http://www.sonoma.edu/math/faculty/falbo/pag1dde.html>`;

Feyerabend P. K., *Przciw metodzie*, tłum. S Wiertlewski, Siedmioróg, Wrocław 1996;

Gilson E., *Historia filozofii chrześcijańskiej w wiekach średnich*, Instytut Wydawniczy PAX, Warszawa 1987;

Goffman W., „A mathematical method for analyzing the growth of a scientific discipline”, *Journal of the Association for Computing Machinery*, 18 (1971), 173–185;

Goffman W., „Mathematical approach to the spread of scientific ideas — the history of mast cell research”, *Nature*, 212 (1966), 449–452;

Goffman W., Harmon G., „Mathematical approach to the prediction of scientific discovery”, *Nature*, 229 (1971), 103–104;

Goffman W., Newill V. A., „Generalization of epidemic theory. An application to the transmission of ideas", *Nature*, 204 (1964), 225–228;

Granovsky Yu. V., „Comments on V. V. Nalimov recipent of The 1987 Derek de Solla Price Award", *Scientometrics*, 15 (1989), 8–9;

Griffith B. C., „Derek Price (1922–1983) and the social studies of science", *Scientometrics*, 6 (1984), 5–7;

Gupta B. M. et al., „Modeling the growth of world social science literature", *Scientometrics*, 53 (2002), 161–164;

Gupta B. M., Karisiddappa C. R., „Modelling the growth of literature in the area of theoretical population genetics", *Scientometrics*, 49 (2000), 321–355;

Gurjeva L. G., *Early Soviet Scientometrics and Scientometricians*, Thesis for the degree of MSc in Science Dynamics, collegekaartnr. 9177035, Wetenchapsdynamica Universiteit van Amsterdam, Amsterdam 1992;

Hajduk Z., *Temporalność nauki. Kontrowersyjne zagadnienia dynamiki nauki*, RW KUL, Lublin 1995;

Heller M., „Czy świat jest racjonalny?", *Zagadnienia Filozoficzne w Nauce*, 20 (1997), 66–78;

Heller M., „Jak uprawiać filozofię przyrody?" w: M. Heller, *Nauka i wyobraźnia*, Znak, Kraków 1995;

Heller M., „Kilka uwag o rozwoju nauki" w: *Fizyka ruchu i czasoprzestrzeni*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993;

Heller M., „Nieliniowa ewolucja nauki", *Roczniki Filozoficzne (KUL)*, 22 (1984), 105–125;

Heller M., „Nieliniowa ewolucja nauki” w: *Szczęście w przestrzeniach Banacha*, Znak, Kraków 1995;

Heller M., „Przeciw fundacjonizmowi” w: *Sensy i nonsensy w nauce i filozofii*, M. Heller, J. Urbaniec, J. Mączka (red.), OBI–Kraków, Biblos–Tarnów, 1999;

Heller M., „Wstęp do rewolucji naukowej” w: *Szczęście w przestrzeniach Banacha*, Znak, Kraków 1995;

Heller M., *Filozofia nauki. Wprowadzenie*, OBI–Wydawnictwo Naukowe PAT, Kraków 1992;

Heller M., *Filozofia świata. Wybrane zagadnienia i kierunki filozofii przyrody*, Znak, Kraków 1992;

Heller M., Krawiec A., Szydłowski M., „Time–to–build of science and its cyclic time evolution”, *preprint*, Uniwersytet Jagielloński, Kraków 2002;

Herfel W. E., Hooker C. A., „From formal machine to social colony: Toward a complex dynamical philosophy of science” w: *Language, Quantum, Music: Select Proceedings of the 10th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science*, M. L. Dalla Chiara et al. (red.), Kluwer Academic Publishers, Boston 1998;

Hübner P., „Nauka o nauce”, *Forum Akademiackie*, 3 (2001);

Irwin R., *The Lotka–Volterra Model of Interspecific Competition*, 30.11.2004, <`http://www.utm.edu/~rirwin/LVComp.htm`>;

Jabłoński A. I., *Matematiczeskie modeli w isledowanii nauki*, Nauka, Moskwa 1986;

Kochen M., „Mathematical model for the growth of two specialties”, *Science of Science*, 3 (1983), 199–217;

Kochen M., „Stability in the growth of knowledge", *American Documentation*, 20 (1969), 186–197;

Kochen M., Blaivas A., „A model for the growth of mathematical specialties", *Scientometrics*, 3 (1981), 265–273;

Kostyuk V., Schreider J., „A Review of A. I. Yablonsky's *Mathematical Models in Science Studies*", *Scientometrics*, 15 (1989), 155–157;

Kot S. M., „Rozwój dyscypliny naukowej w świetle statystycznej analizy cytowań", *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 16 (1980), 152–169;

Kot S. M., *Modele stochastyczne rozwoju dyscyplin naukowych*, praca doktorska nieopublikowana (sygnatura BG AE: 139244), Akademia Ekonomiczna, Kraków 1975;

Kot S. M., *Modelowanie procesów informacyjnych w nauce*, Secesja, Kraków 1992;

Krajewski W., *Prawa nauki. Przegląd zagadnień metodologicznych i filozoficznych*, Książka i Wiedza, Warszawa 1998;

Kuhn T. S., *Struktura rewolucji naukowych*, Aletheia, Warszawa 2001;

Kulikowski R., Mierzejewski H., Rokicki W., „Model rozwoju kadry naukowej", *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 11 (1975), 60–69;

Lehman H. C., „The exponential increase of man's cultural output", *Social Forces*, 25 (1947), 281–290;

Leydesdorff L., *The Challenge of Scientometrics. The Development, Measurment, and Self–organisation of Scientific Communication*, Universal Publishers/uPUBLISH.com, USA 2001;

Losee J., *Wprowadzenie do filozofii nauki*, Prószyński i S–ka, Warszawa 2001;

Lubański M., Ślaga Sz., „Dwie cechy wiedzy naukowej”, *Studia Philosophiae Christianae*, 15 (1979), 121–131;

Lubański M., Ślaga Sz., „Proces badawczy w aspekcie systemowym”, *Studia Philosophiae Christianae*, 16 (1980), 139–152;

Luukkonen T., „Quantitative techniques in evaluation in Western Europe” w: *Evaluating Science and Scientists. An East–West Dialogue on Research Evaluation in Post–Communist Europe*, M. S. Frankel, J. Cave (eds), Central European University Press, Budapest 1997;

Machalska–Garbacz A., *Udział Biblioteki AGH w procesie oceny dorobku naukowego uczelni. Kilka praktycznych rozwiązań*, KWE SBP. – EBIB, (29) 2001, `<http://ebib.oss.wroc.pl/2001/29/garbacz.html>`;

Mikulinsky S., „Alphonse de Candolle’s «Histoire des sciences et des savants savants depuis deux siècles» and its historic significance”, *Organon*, 10 (1973), 223–243;

Müller F., „Fortschritt der Wissenschaft — mathematisch modelliert”, *Wissenschaft und Fortschritt*, 22 (1972), 162–165;

Müller F., „O pewnej hipotezie postępu naukowego”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 14 (1978), 158–161;

Nalimow W. W., Mulczenko Z. M., *Naukometria*, WNT, Warszawa 1971;

Nalimow W. W., Mulczenko Z. M., „Nauka i biosfera: próba porównania dwóch systemów”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 7 (1971), 565–580;

Nardin P., *The Lotka–Volterra Equation*, 30.11.2004, `<http://www.gris.uni-tuebingen.de/projects/dynsys/latex/dissp/node16.html>`;

Nickles T., „Epistemiczne wzmacnianie: ku samowspornej metodologii nauk” w: *Oblicza idealizacji*, *Poznańskie studia z Filozofii Humanistyki*, 2 (1996), 245–282;

Nowakowska M., „Epidemical models of the development of science”, *Science of Science*, 2 (1981), 321–338;

Nowakowska M., „Epidemiczne rozprzestrzenianie się wytworów naukowych (próba empirycznego ujęcia niektórych problemów socjologii nauki)”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 7 (1971), 318–345;

Nowakowska M., „Mikroparadygmaty, symulacje, prognozy. Dalsze rozwinięcie teorii epidemicznego rozprzestrzeniania się wytworów naukowych”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 9 (1973), 29–42;

Nowakowska M., *Teoria badań. Ujęcie modelowe*, PWN, Warszawa 1977;

Ossowska M., Ossowski S., „Nauka o nauce”, *Nauka Polska*, 20 (1935), 1–12;

Otto S. P., *Biomathematics Lectures*, 30.11.2004, `<http://www.zoology.ubc.ca/~bio301/Bio301/Lectures.html>`;

Piechowicz R., „Bliskość znaczeń a zagadnienia porozumienia językowego”, *Semina Scientiarum*, 2 (2003), 6–8;

Pietrowa T. M., „Modele matematyczne dziedziny badania naukowego”, *Zagadnienia Naukoznawstwa*, 11 (1975), 129–142;

Polak P., „Rozwój pojęcia nieskończoności. Dialog pomiędzy filozofią a matematyką”, *Semina Scientiarum*, 1 (2002), 34–42;

Popper K. R., „Epistemologia bez podmiotu poznającego” w: *Wiedza obiektywna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1992;

Popper K. R., „Modele, narzędzia i prawda” w: *Mit schematu pojęciowego. W obronie nauki i racjonalności*, tłum. B. Chwedeńczuk, Książka i Wiedza, Warszawa 1997;

Popper K. R., „Natura problemów filozoficznych i ich korzenie w nauce” w: *Droga do wiedzy. Domysły i refutacje*, tłum. S. Amsterdamski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999;

Popper K. R., *Nieustanne poszukiwania. Autobiografia intelektualna*, Znak, Kraków 1997;

Popper K. R., „Filozofia a fizyka” w: *Mit schematu pojęciowego. W obronie nauki i racjonalności*, Książka i Wiedza, Warszawa 1997;

Prigogine I., Stengers I., *Z chaosu ku porządkowi*, PIW, Warszawa 1990;

Purica I. I., „Creativity, intelligence and synergetic processes in the development of sience”, *Scientometrics*, 13 (1988), 11–24;

Purica I. I., „Creativity and the socio–cultural niche”, *Scientometrics*, 15 (1989), 181–187;

Puzikov M. D., Kasjanov A. E., „Quantitative estimation of «Big» and «Little» Science interrelation”, *Scientometrics*, 11 (1987), 99–104;

Raine D. J., Heller M., *The Science of Space–Time*, Pachart Publishing House, Tucson 1981;

Rival M., *Wielkie eksperymenty naukowe*, Cyklady, Warszawa 1997;

Ropek J., „Metodologia systemowa a filozofia przyrody”, *Zagadnienia Filozoficzne w Nauce*, 20 (1997), 113–115;

Schubert A., „The Web of Scientometrics. A statistical overview of the first 50 volumes of the journal”, *Scientometrics*, 53 (2002), 3–20;

Sharov A., *Logistic Model*, 30.11.2004, <http://www.ento.vt.edu/~sharov/PopEcol/lec5/logist.html>;

Sharov A., *Lotka–Volterra Model*, 30.11.2004, <www.ento.vt.edu/~sharov/PopEcol/lec10/predat.html>

Sloot P., *Lectures of Prof. dr Peter Sloot*, 30.11.2004, <http://artemis.wszib.edu.pl/~sloot/>;

Solla Price D. J. de, *Mała Nauka — Wielka Nauka*, PWN, Warszawa 1967;

Solla Price D. J. de, *Węzłowe problemy historii nauki*, PWN, Warszawa 1965;

Solla Price D. J. de, „The History of Science as Training and Research for Administration and Political Decision–making”, *Organon*, 1 (1964), 21–24;

Stefaniak B., „Naukometria. i możliwości wykorzystania wyników badań piśmiennictwa naukowego w kreowaniu polityki naukowej”, *Nauka i Szkolnictwo Wyższe*, 3 (1994), 43–64;

Szabó A. T., „Alphonse de Candolle’s Early Scientometrics (1883, 1885) with References to Recent Trends in the Field (1978–1983)”, *Scientometrics*, 8 (1985), 13–33;

Szlenk W., *Wstęp do teorii gładkich układów dynamicznych*, PWN, Warszawa 1982;

Szydłowski M., Krawiec A., Czaja W., „Growth cycles in the Church bibliography of symbolic logic”, *preprint*, Uniwersytet Jagielloński, Kraków 2004;

Szydłowski M., Krawiec A., „Scientific cycle model with delay”, *Scientometrics*, 52 (2001), 83–95;

Szydłowski M., Krawiec A., „Układy dynamiczne w modelowaniu rozwoju nauki” w: A. Jonkisz (red.), Postacie prawdy 3, *Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego*, 1802 (1999), 108–109;

Szydłowski M., Krawiec A., „Złożone zachowanie prostych układów nieliniowych”, *Filozofia Nauki*, 6 (1998), 78–79;

Taylor J. R., *Wstęp do analizy błędu pomiarowego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995;

Thom R., *Stabilité structurelle et morphogénese. Essai d'une théorie générale des modeles*, W. A. Benjamin Inc., Massachusetts 1972;

Vlachý J., „Citation histories of scientific publications. The data sources”, *Scientometrics*, 7 (1985), 505–528;

Vlachý J., „Mobility in science : A bibliography of scientific career migration, field mobility, international academic circulation and brain drain”, *Scientometrics*, 1 (1979), 201–228;

Weingart P., Sehringer R., Winterhager M., „Which reality do we measure?”, *Scientometrics*, 19 (1990), 481–493;

Weisstein E. W., *Logistic Equation. From MathWorld–A Wolfram Web Resource*, 2.12.2004,
`<http://mathworld.wolfram.com/LogisticEquation.html>`;

Weisstein E. W., *Lotka–Volterra Equations. From MathWorld–A Wolfram Web Resource*, 30.11.2004,
`<mathworld.wolfram.com/Lotka-VolterraEquations.html>`;

Welljams–Dorof A., „Quantitative citation data as indicators in science evaluations: A primer on their appropriate use” w: *Evaluating*

Science and Scientists. An East–West Dialogue on Research Evaluation in Post–Communist Europe, M. S. Frankel, J. Cave (eds), Central European University Press, Budapest 1997;

Wilkins J. S., *Evolutionary models of scientific theory change*, Master thesis, Departament of Philosophy, Monash University 1995, <http://members.dodo.com.au/~wilkinsjandp/papers/MA/Thesis.html>;

Wouters P., *Scientometrics by Hand. The Ups and Downs of Scientometrics in Russia*, 30.11.2004, <www.upmf-grenoble.fr/adest/seminaires/wouters.html>;

Wróblewski A. K., „Ostrożnie z tym współczynnikiem", *Forum Akademickie*, 7-8 (1998), 30.11.2004, <http://forumakad.pl/archiwum/98/7-8/artykuly/20-polemiki.htm>;

Życiński J., „Spór o racjonalność nauki a zasada naturalności interdyscyplinarnej", *Analecta Cracoviensia* 19 (1987), 517–535;

Życiński J., *Elementy filozofii nauki*, Biblos, Tarnów 1996;

Bibliografia bibliometryczna. Publikacje w języku polskim, 30.11.2004, <http://www.bg.us.edu.pl/arton_inf/bibliografia.htm>;

Inspec, 30.11.2004, <http://zatoka.icm.edu.pl/ovidweb>;

Science Citation Index – Expanded, 30.11.2004, <http://zatoka.icm.edu.pl/sci/index.html> oraz <http://www.isinet.com/>;

Zentralblatt MATH, 30.11.2004, <http://www.emis.de/ZMATH/>.

Skorowidz

Kursywą oznaczono strony, na których nazwisko występuje w przypisie.