Paweł Kliber
Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu
p.kliber@ue.poznan.pl
https://doi.org/10.18559/978-83-8211-192-7/9

9. FINANSE EWOLUCYJNE

Evolutionary finance

Abstract: In the article we present an evolutionary approach to the theory of finance, which becomes more and more popular in the recent years. This approach, known as 'evolutionary finance', differs from both the classical financial theory, based on the general equilibrium theory, and the more recent behavioural approach. As the behavioural approach, the evolutionary finance takes into account financial behaviours of real agents, which very often differ much from the ones proposed by the classical theory. But evolutionary finance (unlike the behavioural approach) also tries to provide explanations of these behaviours. These explanations provide an analysis of processes of historical evolution or some evolution-like processes (i.e. the processes that share the same mechanism as the biological evolution). In the chapter, we provide a brief overview of literature connected with this topic.

Keywords: evolutionary finance, preferences, risk premium, risk aversion, investment strategies, minority game, cultural evolution.

Wprowadzenie

Klasyczna teoria finansów jest oparta na teorii równowagi ogólnej. W modelach takich zakłada się, że agenci ekonomiczni są racjonalni i podejmują właściwe decyzje w odpowiedzi na napływające informacje. Teoria klasyczna przybiera

Sugerowane cytowanie:
Kliber, P. (2023). Finanse ewolucyjne. W: J. Polowczyk (red.), *Ekonomia i inne nauki społeczne. Studia interdyscyplinarne* (s. 151–169). Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu.
https://doi.org/10.18559/978-83-8211-192-7/9

Ta książka jest udostępniana na licencji Creative Commons – Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0 Międzynarodowe

najpełniejszy wyraz w hipotezie rynków efektywnych, zgodnie z którą rynki finansowe jedynie reagują na napływające informacje. Instytucje i osoby działające na takich rynkach natychmiast podejmują odpowiednie działania, a ceny wracają do „cen równowagi".

Takie podejście jest kwestionowane ze strony finansów behawioralnych. O ile klasyczne podejście ukształtowało się na gruncie teorii równowagi ogólnej i przedstawia przede wszystkim argumenty teoretyczne, o tyle w podejściu behawioralnym (opracowanym początkowo przez badaczy zajmujących się psychologią) stosuje się metody bardziej empiryczne. Przygląda się, jak rzeczywiście zachowują się jednostki, które muszą dokonywać wyborów takich jak decyzje na rynkach finansowych. O ile podejście klasyczne ma silnie rozbudowaną teorię, to podejście behawioralne ma mocną podstawą empiryczną.

W ostatnich latach coraz bardziej istotne staje się jeszcze inne podejście, tzw. „finansów ewolucyjnych", czyli takie, w którym stosuje się metody wypracowane w teorii ewolucji. O tym, że koncepcja ta jest coraz bardziej popularna, może świadczyć fakt, że dwa ważne czasopisma (*Journal of Mathematical Finance* oraz *Proceedings of the National Academy of Sciences*) poświęciły wydania specjalne tej tematyce. W finansach ewolucyjnych próbuje się przeprowadzić syntezę podejścia klasycznego i behawioralnego. Bierze się pod uwagę rzeczywiste zachowania agentów na rynku (jak w podejściu behawioralnym), ale w przeciwieństwie do niego próbuje się wytłumaczyć te zachowania teoretycznie. Podstawą wyjaśniania jest teoria ewolucji.

W tym rozdziale przedstawiamy kilka najważniejszych kwestii związanych z finansami ewolucyjnymi. Nie jest to przegląd systematyczny, a raczej prezentacja najważniejszych i najciekawszych problemów, które podejmują finanse ewolucyjne. Systematyczny przegląd literatury można znaleźć w artykule (Holtfort, 2019). W tym rozdziale przedstawiamy trzy rodzaje zastosowań metod ewolucji w finansach: 1) rozważania, w których bierze się pod uwagę fakt, że decyzje ekonomiczne człowieka są ukształtowane przez jego historię ewolucyjną, czyli uwzględniające biologiczne podstawy podejmowania decyzji finansowych; 2) podejście oparte na przeniesieniu zasad teorii ewolucji biologicznej na grunt finansowy (strategie inwestycyjne są traktowane jako rywalizujące ze sobą „organizmy") – w tym podejściu stosuje się modele i metody stosowane w biologii ewolucyjnej do problemów ekonomicznych; 3) propozycje uwzględnienia finansów jako elementu kultury i zastosowania metod ewolucyjnych do analizy zmian kulturowych.

Zachowania ekonomiczne w perspektywie ewolucyjnej

Pierwszy nurt literatury naukowej, którą można określić jako „finanse ewolucyjne", to prace poświęcone biologicznym podstawom zachowań finansowych lub ogólniej – ekonomicznych. Istotne są tu dwie kwestie. Po pierwsze, *homo sapiens* powstał w procesie ewolucji jako gatunek inteligentny i bardzo uspołeczniony. Można zatem zadać pytanie, jak fakt powstania takiego gatunku ewolucyjnie określa pewne własności jego psychiki i zachowań społecznych, istotne z punku widzenia ekonomii. System nagrody i kary w mózgu ludzkim jest bowiem ewolucyjnie znacznie starszy niż stosunkowo niedawno powstałe systemy poznawcze. Można zatem słusznie przypuszczać, że zasady determinujące działania ekonomiczne, takie jak maksymalizacja użyteczności, preferencje czasowe i preferencje względem ryzyka, pojawiły się, zanim człowiek stał się „rozumny". Dodatkowo „nagrodą" w procesie ewolucyjnym jest rozpowszechnianie genów, czyli zdolność do wytwarzania zdolnego do rozmnażania potomstwa. Uwzględniając zjawiska i cechy istotne w tym procesie i przenosząc je na grunt ekonomii, można znaleźć pewne wyjaśnienia, dlaczego ludzie, podejmując decyzje, zachowują się tak, jak się zachowują.

Drugą kwestią związaną z traktowaniem w ekonomii człowieka jako tworu ewolucji jest to, że gatunek ludzki ma swoją własną historię ewolucyjną. Rozwinął się w konkretnych okolicznościach i w trakcie tego rozwoju dotykały go pewne konkretne zdarzenia (pojawienie się w Afryce, egzystencja w społecznościach łowców-zbieraczy, epoka lodowcowa, odkrycie rolnictwa). Zdaniem pewnych autorów ta historia pozwala w pewnej mierze wyjaśnić konstrukcję współczesnych instytucji ekonomicznych i finansowych.

Ewolucja człowieka a funkcjonowanie systemów gospodarczych

Najbardziej znanym przykładem literatury podejmującej tę drugą kwestię jest chyba książka *Debt: The First 5,000 Years* Graebera (2014). Autor próbuje w niej rozprawić się z „mitem barteru", który określa jako „wielki mit założycielski dyscypliny ekonomii". Zgodnie z tradycyjnie opowiadaną w ekonomii historią wynalezienie pieniądza było poprzedzone wymianą barterową: towar za towar. Zdolność do takiej wymiany ma być unikalną cechą człowieka, wyróżniającą go od innych zwierząt: nikt nie widział, żeby jeden pies zamieniał celowo kość z drugim (Smith, 2012, rozdz. 1.2). Bezpośrednia wymiana towar za towar ma jednak ważną wadę. Czyni handel zbyt skomplikowanym. W systemie barterowym należy cały czas mierzyć wartość każdego towaru względem każdego innego. Gdy liczba dostępnych dóbr rośnie, liczba „kursów wymiany" rośnie

jeszcze szybciej (dokładniej – rośnie jak kwadrat liczby dóbr). Dodatkowo jeżeli dwie strony transakcji nie mają towarów, które chciałyby uzyskać, wymiana staje się niemożliwa lub skomplikowana. Stąd powstaje konieczność ustalenia jakiegoś wspólnego środka wymiany i pomiaru wartości. Pojawia się pieniądz; najpierw w postaci jednego wyróżnionego dobra (*numéraire*, takiego jako kruszec lub muszelki). Z biegiem czasu system wymiany oparty na pieniądzu (wymieniamy towar na pieniądz, a ten z kolei na pożądany przez nas inny towar) się komplikuje. Pojawiają się kredyty, transakcje odroczone, pieniądz fiducjarny (niepowiązany z żadnym towarem), bardziej rozwinięte instrumenty finansowe. Tworzy się współczesny rynek finansowy.

Według Graebera ta historia jest mitem. Jako antropolog stwierdza, że nigdy nie udało się znaleźć prymitywnej gospodarki opartej na barterze. Tym bardziej nie zaobserwowano nigdy i nigdzie powstania pieniądza z systemu wymiany barterowej. Taka wymiana zachodzi między społecznościami, a nie w obrębie jednej społeczności. Mówiąc językiem współczesnej ekonomii, dotyczy raczej gospodarki „międzynarodowej" niż wewnętrznego systemu gospodarczego. W tym wewnętrznym systemie („gospodarce narodowej") podstawowym narzędziem wymiany jest dług i spłata zadłużenia. Graeber pokazuje, jak systemy oparte na księgowaniu zadłużenia funkcjonowały w pierwszych cywilizacjach, na przykład u Sumerów. Gospodarka stosująca rozliczanie długu jest oparta na zasadzie wywiązywania się ze zobowiązań[1], była już obecna w społecznościach łowców-zbieraczy, a może być nawet starsza niż gatunek ludzki. W takim razie współczesny system finansowy i zachowania z nim związane wykształciły się wcześniej, niż może się nam wydawać, i ewoluowały naturalnie razem z ewolucją człowieka.

Do spraw związanych z wpływem najstarszej historii człowieka na nasze zachowania społeczno-gospodarcze Graeber powraca w wydanej pośmiertnie książce *Narodziny wszystkiego. Nowa historia ludzkości* Graeber i Wengrow, 2022). Przedstawia tam krótki zarys rozwoju ludzkości w epoce kamienia i analizuje przykłady rozwoju społeczeństw, zwłaszcza w okresie przejścia do rolnictwa. Jego zdaniem można tam zauważyć wiele sposobów organizacji społeczeństwa i gospodarki, które obecnie kojarzymy z epoką nowożytną. Wczesna historia człowieka może nam więc powiedzieć więcej o naszej obecnej sytuacji, niż mogłoby się wydawać.

Na to, że pewne cechy zachowań ekonomicznych wynikają z funkcjonowania społeczności ludzkich w początkowym okresie ewolucji człowieka, gdy były to społeczności łowców-zbieraczy, zwracają uwagę także Robson i Kaplan (2006). Podkreślają kilka zasadniczych cech, które odróżniają nas od naj-

[1] Wywiązywanie się ze zobowiązań lub „odwzajemnianie się za przysługi" (*reciprocity*) może być uważane za podstawę działalności gospodarczej człowieka (na przykład Polowczyk, 2021).

bliżej spokrewnionych z nami ewolucyjnie małp człekokształtnych. Człowiek zaczął uprawiać łowiectwo oparte raczej na wiedzy i umiejętnościach niż na przewadze czysto fizycznej. Człowiek żyje dłużej niż człekokształtne i ma inny cykl życia. Szczyt płodności i produktywności przypada u człowieka stosunkowo późno i w przeciwieństwie do człekokształtnych żyje on jeszcze długo po przekroczeniu szczytu płodności. Zdaniem autorów dwa trendy są istotne dla zrozumienia pewnych cech człowieka jako gatunku: zwiększenie mózgu i wydłużenie życia. Wydłużenie życia, a także konieczność opieki i kształcenia dzieci, znacznie wydłużyły czas opieki nad potomstwem. Według wyliczeń członkowie społeczności łowców-zbieraczy do dwudziestego roku życia zużywają więcej kalorii niż produkują (u szympansów jest to tylko od 5 do 7 lat). Sprawia to, że u człowieka istotna stała się specjalizacja pracy, transfery międzypokoleniowe i wywiązywanie się ze zobowiązań, czyli zjawiska, które mają przełożenie na gospodarkę i mogą być podstawą systemów finansowych.

Biologiczne podstawy zachowań ekonomicznych

W literaturze omówionej w poprzednim punkcie zwracano uwagę na pewne cechy charakterystyczne historycznej ewolucji *homo sapiens*. Można postawić pytanie, czy i jak ewolucja przekłada się na obecne funkcjonowanie człowieka w warunkach odmiennych niż te, w których wyewoluował. Wiąże się to z kwestią pierwszą, wskazaną na początku tego podrozdziału. W jaki sposób sam mechanizm ewolucji (niekoniecznie dotyczący gatunku ludzkiego) wpływa na zachowania powstałych gatunków, jeżeli rozważać je z ekonomicznego punktu widzenia? W literaturze poświęconej odpowiedzi na to pytanie rozważa się pewne modele teoretyczne procesu ewolucyjnego. W przeciwieństwie do rozważań z poprzedniego punktu, nie dotyczą one rzeczywistej historii ewolucyjnej człowieka. Rozważany jest pewien abstrakcyjny „gatunek", a modele jego ewolucji przyjmują następujące założenia: 1) przedstawiciele gatunku rozmnażają się; 2) jednostki należące do gatunku mogą być różnych „typów", charakteryzujących się różnymi zachowaniami; 3) „przystosowanie" lub „sukces" gatunku można mierzyć wzrostem jego liczebności w długim okresie; 4) zachowania przedstawicieli gatunku mają pewne interpretacje ekonomiczne. W literaturze tego nurtu podejmowane są próby ewolucyjnego wyjaśnienia kilku problemów ekonomicznych. Należą do nich biologiczne podstawy preferencji (funkcji użyteczności) jednostki, dyskontowania względem czasu (preferencji czasowych), awersji do ryzyka oraz statusu społecznego[2].

[2] Przegląd literatury dotyczącej wszystkich tych czterech zagadnień można znaleźć w: (Robson, 2001).

W biologicznej teorii ewolucji oraz w modelach stosowanych w tym podejściu miarą „przystosowania do środowiska" jest sukces reprodukcyjny w długim okresie. W ekonomii stosuje się preferencje (użyteczność) względem konsumpcji. Można jednak utrzymywać, że natychmiastowa konsumpcja jest w pewien sposób powiązana z sukcesem reprodukcyjnym. Konsumpcja z biologicznego punktu widzenia jest „dobrem pośrednim", łatwiejszym do oceny przez układ nagrody i kary w mózgu, niż „dobro finalne", jakim jest długookresowa liczba potomstwa. Z tego punku widzenia ma sens przenoszenie argumentów wyciągniętych z analizy ewolucyjnej na analizę zachowań ekonomicznych: jeżeli gatunek odnosi sukces ewolucyjny, to natychmiastowa ocena preferencji (dotyczących konsumpcji) musi być w jakiś sposób powiązana z sukcesem w długim okresie (sukcesem reprodukcyjnym). Robson (2001) zastosował tu analogię do programów szachowych. Analiza rozgrywki na wiele ruchów do przodu jest zbyt złożona i praktycznie niemożliwa – istnieje zbyt wiele kombinacji. W programach stosuje się więc różne algorytmy polegające na analizie kilku następnych ruchów, a następnie heurystycznej ocenie sytuacji na szachownicy i szacowaniu prawdopodobieństwa wygranej. W sytuacjach ekonomicznych taką heurystyką dla oceny sukcesu w dłuższym okresie jest konsumpcja.

Preferencje względem czasu (dyskontowanie) można wytłumaczyć cyklem życiowym jednostki oraz sukcesem reprodukcyjnym populacji. W najprostszym modelu (Robson i Samuelson, 2009) rozważa się populację złożoną z jednostek żyjących ustaloną liczbę T okresów. W każdym okresie życia jednostka wytwarza określoną liczbę potomstwa: w pierwszym okresie życia n_1, w drugim n_2, na przykład aż do n_T w okresie życia T. Prawdopodobieństwo, że jednostka dożyje do następnego okresu wynosi q, z wyjątkiem okresu T, po którym jednostka na pewno umiera. Dynamikę populacji takich jednostek można opisać pewnym (wektorowym) równaniem różnicowym: struktura wiekowa populacji w następnym okresie w pewien deterministyczny sposób zależy od struktury w okresie poprzednim. W równaniach tego typu istnieje stabilna ścieżka wzrostu (tj. taka, na której struktura populacji się nie zmienia) z największą możliwą stopą wzrostu liczebności populacji. Jak można pokazać, ta maksymalna stopa wzrostu ϕ odpowiada stałej stopie dyskontowej dla liczebności potomstwa w kolejnych okresach. Innymi słowy, jeżeli populacja rośnie z najwyższą możliwą stopą wzrostu, to „międzyokresowa stopa substytucji potomstwa w obecnym okresie życia przez potomstwo w okresie następnym" jest stała i wynosi ϕ. Przenosząc „dyskontowanie potomstwa" na dyskontowanie konsumpcji (lub użyteczności, lub pieniędzy), otrzymuje się klasyczną w ekonomii i finansach zasadę dyskontowania wykładniczego.

W ekonomii behawioralnej istnieją dowody empiryczne (na przykład Loewenstein i Prelec, 1992) na to, że w preferencjach względem czasu stosowane jest raczej „dyskontowanie hiperboliczne" (niespójne czasowo) niż wykładnicze

(spójne czasowo)[3]. W finansach behawioralnych takie dyskontowanie hiperoboliczne traktowane jest czasami jako fakt empiryczny. Bateson i Kacelnik (1996) przedstawili model ewolucyjny, jak takie preferencje czasowe mogły się pojawić.

Zagadką w finansach i ekonomii jest stosunek do ryzyka. W klasycznej teorii przyjmuje się, że ludzie na ogół charakteryzują się awersją względem ryzyka, wolą sytuacje mniej ryzykowne. Za ponoszenie ryzyka powinni otrzymać odpowiednią premię. Z tego względu na przykład ryzykowne instrumenty finansowe mają na ogół większą stopę zwrotu niż instrumenty pozbawione ryzyka. Z drugiej strony można zauważyć, że ludzie z własnej woli i ochoczo podejmują się działań ryzykownych – grają w ruletkę, kupują losy na loterii, grają w Lotto. W każdej z tych gier oczekiwana wygrana jest mniejsza od poniesionych wydatków, a więc jest to niezgodne z założeniem o awersji względem ryzyka. W przypadku możliwych strat ludzie wykazują się awersją do ryzyka, w przypadku możliwości zysków (zwłaszcza dużych) zachowują się tak, jakby ryzyko lubili. Zdaniem Kahnemana i Tverskiego (1979) zastosowanie ma tu „teoria perspektywy" (zob. też Kahneman, 2012, rozdz. 26). W ocenie możliwych zysków lub strat mamy pewien punkt odniesienia (*status quo*), bardziej obawiamy się ewentualnych strat, niż cieszymy się z możliwych zysków. Z ewolucyjnego punktu widzenia ta niespójność w podejściu do ryzyka ma inne wyjaśnienie związane ze statusem jednostki. Jak już zauważyli Friedman i Savage (1948), duże straty i duże zyski wiążą się ze zmianą pozycji społecznej: przejściem do wyższej klasy społecznej. Z tego punktu widzenia wydanie umiarkowanej sumy na los na loterii z perspektywą znacznego podwyższenia statusu społecznego może być małym ryzykiem. Z drugiej strony ryzykowne inwestycje wiążą się z możliwością stałych strat i w rezultacie obniżenia statusu (deklasacji). Bardziej rozbudowaną wersję tego argumentu, opartą na formalnych modelach, przedstawiają na przykład artykuły (Cooper i Kaplan, 1982) (w przypadku modeli biologicznych) lub (Cole i in., 1992) (modele ekonomiczne).

[3] Różnica między dyskontowaniem spójnym i niespójnym czasowo jest następująca. Rozwiązując jakikolwiek problem związany z wyborem międzyokresowym (na przykład podziałem konsumpcji lub wydatków), stosując dyskontowanie spójne, czasowo otrzymujemy to samo rozwiązanie bez względu na moment początkowy. Dla dyskontowania niespójnego rozwiązania za każdym razem są inne. Na przykład jeżeli problemem jest pomalowanie pokoju w ciągu następnego tygodnia, to przy dyskontowaniu spójnym czasowo rozwiązaniem może być: „wykonaj 1/7 pracy w obecnym dniu". Rozwiązanie problemu nie zmienia się, bez względu na to, czy zastanawiamy się nad tym w poniedziałek, czy we wtorek (pod warunkiem, że w poniedziałek pomalowaliśmy 1/7 ścian). W przypadku rozwiązania z dyskontowaniem hiperbolicznym (niespójnym czasowo) rozwiązaniem może być: „zacznij malować jutro", przy czym „jutro" zmienia się z dnia na dzień. W poniedziałek postanawiamy zacząć pracę we wtorek, we wtorek decydujemy się ją zaczynać w środę itd., aż do końca tygodnia. A na ścianach nadal nie ma farby.

Zagadka premii za ryzyko

Problem statusu społecznego w podejmowaniu decyzji finansowych wiąże się z zagadnieniem preferencji względem ryzyka – jak dużą awersję względem ryzyka wykazuje większość ludzi. Pytanie to jest ściśle związane z jednym z najciekawszych problemów w teorii finansów: zagadką premii kapitałowej (*equity risk premium puzzle*). Problem postawili Mehra i Prescott (1985)[4].

Zgodnie z klasyczną teorią finansów instrumenty ryzykowne powinny mieć większą oczekiwaną stopę zwrotu niż instrumenty pozbawione ryzyka. Jeżeli większość inwestorów przejawia awersję wobec ryzyka, to w warunkach rynkowych powinna otrzymywać dodatkowe wynagrodzenie (premię za ryzyko) za podejmowanie ryzykownych inwestycji. Akcje są instrumentami bardziej ryzykownymi od obligacji lub lokat bankowych, a zatem, zgodnie z teorią, zwrot z lokat w akcje powinien być w dłuższej perspektywie wyższy od zwrotu z inwestycji pozbawionych ryzyka. Mehra i Prescott stwierdzili jednak na podstawie danych dotyczących rynku kapitałowego Stanów Zjednoczonych w okresie od 1889 do 1978, że premia za ryzyko wynosiła w tym okresie ponad 6 punktów procentowych. Tak dużej różnicy między stopami zwrotu nie da się wyjaśnić za pomocą standardowych modeli teorii finansów[5]. Na podstawie tych danych inwestorzy cechowaliby się tak dużą awersją do ryzyka, że loteria, w której można z 50-procentowym prawdopodobieństwem wygrać 100 dolarów, byłaby dla nich równoważna z pewną wypłatą 2,3 dolara.

Istnieje kilka proponowanych rozwiązań zagadki premii za ryzyko[6]. W ramach podejścia ewolucyjnego Robson i Orr (2021) zaproponowali rozwiązanie oparte na rozróżnieniu ryzyka indywidualnego (idiosynkretyczngo) i ryzyka zbiorowego (zagregowanego). Przyjmując perspektywę ewolucyjną, jednostki powinny mieć różne podejście do tych dwóch typów ryzyka.

Rozważmy dwa typy populacji. W każdej z nich jednostka może z równym prawdopodobieństwem mieć jednego lub dwóch potomków. Różnica między populacjami polega na tym, że w pierwszej z nich (typ 1) liczba potomków jest

[4] W artykule (Mehra i Prescott, 1988) ci sami autorzy spróbowali przedstawić rozwiązanie tej zagadki w klasycznym modelu rynków finansowych, zakładając możliwość ekstremalnych kryzysów.

[5] Patrz na przykład (Lengwiler, 2004, rozdz. 7.2), gdzie analizuje się te wartości w modelu dwumianowym oraz w modelu równowagi ogólnej typu Radnera. W obu przypadkach, aby uzasadnić taką premię za ryzyko, należałoby przyjąć niewiarygodne wartości parametrów modelu.

[6] Dwa główne proponowane rozwiązania są następujące. Pierwsze: jest to fenomen przede wszystkim amerykański. Dotyczy gospodarki, która w badanym okresie odnotowała spektakularny wzrost, a więc zwrot z inwestycji, nawet ryzykownych, też był wyższy. (Istotnie, w innych krajach premia za ryzyko jest niższa). Drugie wyjaśnienie zakłada, że możliwa jest pewna sytuacja katastrofalna („koniec świata" lub „armagedon"), która jest bardzo mało prawdopodobna i nigdy nie zaistniała. Możliwość takiej sytuacji zmienia ocenę ryzyka w sytuacjach bardziej normalnych.

losowana indywidualnie dla każdej jednostki. W drugiej populacji (typ 2) liczba potomków jest losowana dla całej populacji. Z prawdopodobieństwem 50-procentowym wszystkie jednostki w danym pokoleniu będą miały po jednym potomku, a z prawdopodobieństwem 50-procentowym – wszyscy w pokoleniu będą mieli po dwóch potomków. W populacji typu 1 wzrost liczebności wiąże się z ryzykiem idiosynkratycznym – sukces reprodukcyjny jednego osobnika nie jest związany z innymi. Natomiast w populacji typu 2 jest to ryzyko zagregowane. Liczebności obu typów populacji w pokoleniu t oznaczmy odpowiednio jako x_t i y_t. Wartości x_t i y_t są procesami stochastycznymi i, jak można wyliczyć, długookresowe stopy wzrostu liczebności tych populacji wynoszą odpowiednio $\ln\left(\frac{3}{2}\right) \approx 0,4$ i $\frac{1}{2}\ln(2) \approx 0,35$. Zatem w długim okresie pierwsza z populacji powiększa się szybciej.

Dla sprawdzenia, jak warunki zewnętrzne działają na oba typy populacji, załóżmy, że w obu populacjach prawdopodobieństwo posiadania dwóch potomków wynosi p, a prawdopodobieństwo jednego potomka to $1-p$. Tak jak poprzednio w populacji typu 1 losowanie odbywa się dla każdego osobnika osobno, a w populacji typu 2 wszystkie jednostki mają albo jednego, albo dwóch potomków. Jak można obliczyć, stopy wzrostu liczebności obu populacji w długim okresie wynoszą

$$\frac{\ln x_t}{t} \to \ln(p+1),$$

$$\frac{\ln y_t}{t} \to p\ln 2.$$

W tabeli 1 przedstawiono graniczne stopy wzrostu populacji dla różnych wartości parametru p (efektywności rozrodczej). Jak można zauważyć, w przypadku populacji typu 2 graniczna stopa wzrostu jest zawsze mniejsza. W kolumnie czwartej podano, ile musiałaby wynosić efektywność rozrodcza populacji typu 2, p_2', żeby graniczna stopa wzrostu liczebności była taka sama jak dla populacji typu 1. W ostatniej kolumnie porównano wymagane efektywności wzrostu obu typu populacji potrzebne do osiągnięcia tej samej stopy wzrostu. Jak widać, aby utrzymać ten sam wzrost, populacja typu 2 zawsze potrzebuje większej efektywności w każdym pokoleniu. Można też zauważyć, że przy mniejszych wartościach parametru p (który można interpretować jako ogólną „przyjazność" środowiska – możliwość uzyskania większej liczby potomstwa) efektywność populacji typu 2 powinna być znacznie większa.

Tabela 1. Wzrost liczebności populacji typu 1 i typu 2

p	Typ 1 (w %)	Typ 2 (w %)	p'_2	p'_2 / p
0,1	10	7	0,14	1,38
0,2	18	14	0,26	1,32
0,3	26	21	0,38	1,26
0,4	34	28	0,49	1,21
0,5	41	35	0,58	1,17
0,6	47	42	0,68	1,13
0,7	53	49	0,77	1,09
0,8	59	55	0,85	1,06
0,9	64	62	0,93	1,03

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z tą analizą jednostki, mając do wyboru ryzyko w populacji typu 1 lub typu 2, powinny wybierać raczej typ 1. Ryzyko zagregowane jest z ewolucyjnego punktu widzenia „bardziej ryzykowne" niż ryzyko idiosynkratyczne, nawet jeżeli indywidualnie poziom ryzyka jest taki sam (w obu populacja dla jednostki prawdopodobieństwo pozostawienia mniejszej liczby potomstwa wynosi $1-p$). Awersja wobec ryzyka zagregowanego powinna być zatem większa niż wobec ryzyka indywidualnego, a różnica powinna być większa przy wyższym poziomie ogólnego ryzyka.

Wnioski te prowadzą do możliwego rozwiązania zagadki nadmiernej premii za ryzyko. Inwestowanie w akcje, nawet na rozwiniętym rynku kapitałowym, jest ryzykiem zagregowanym. W dłuższej perspektywie stopa zwrotu z takich inwestycji jest rynkową stopą zwrotu (mierzoną indeksami giełdowymi). Premia za podejmowanie takiego ryzyka musi być większa niż premia za ryzyko podejmowane indywidualnie (na przykład w grach losowych). Wyniki z tabeli 1 sugerują również, że różnica między premią za ryzyko indywidualne i ryzyko zagregowane powinna być większa przy wyższym poziomie ogólnego ryzyka (mniejsze wartości p – prawdopodobieństwa otrzymania lepszego wyniku). W środowisku bardziej niestabilnym bardziej opłacalne jest uprawianie hazardu indywidualnie niż podejmowanie działań ryzykownych grupowo. Przez „działania ryzykowne grupowo" należy rozumieć inwestycje, których powodzenie lub niepowodzenie będzie takie samo dla całej grupy osób. Przykładowo gra w kasynie jest ryzykiem podejmowanym indywidualnie (wygram lub przegram). Inwestycje w akcje lub podejmowanie działalności w spółkach jest ryzykiem grupowym. Jeżeli ceny akcji spadną – wszyscy inwestorzy stracą pieniądze. Jeżeli przedsięwzięcie się nie powiedzie – wszyscy wspólnicy poniosą koszty. W skrajnym przypadku – dla inwestycji na giełdzie: jeżeli zdarzy się załamanie podobne do „czarnego

czwartku”[7], to wszyscy (także osoby niezwiązane bezpośrednio z giełdą, ale na przykład utrzymujące oszczędności w funduszach inwestycyjnych), zostaną tym dotknięci.

Ewolucja strategii inwestycyjnych

Drugi typ literatury wiążącej finanse z teorią ewolucji to prace, w których system finansowy traktuje się jak ekosystem, w którym biotopem jest systemowa organizacja rynku (regulacje, instytucje, struktury i powszechnie przyjęte reguły działania), a biocenozą – różne strategie inwestycyjne lub różni inwestorzy wybierający strategie inwestowania.

Gra mniejszości

„Gra mniejszości” (*minority game*)[8] jest oparta na pewnym klasycznym zagadnieniu z teorii gier znanym jako „problem baru El Farol”. Klasyczne problemy z teorii gier zwykle wiążą się z jakąś historią. Dla tego zagadnienia historia jest następująca (sformułowana w Arthur, 1994). W Santa Fe jest tylko jeden bar (i to bardzo mały): El Farol. Jest to też jedyna rozrywka w mieście, ale odpocząć można tylko wtedy, gdy bar nie jest zbyt zatłoczony (bar jest, jak powiedziano mały, więc przy dużej liczbie gości może być za ciasno). W najprostszej postaci – w mieście są tylko trzy osoby, które chętnie wybrałyby się do baru. Pozostanie w domu nie daje im żadnej przyjemności, co oznacza użyteczność na poziomie 0. Gdyby wszystkie trzy osoby wybrały się do baru, to ze względu na zatłoczenie osiągana przez nie przyjemność również byłaby na poziomie 0. Korzyść z pobytu w barze dla każdej z nich wynosi 2, jeżeli bar nie jest zatłoczony (są w nim najwyżej dwie osoby). Wyjście do baru wiąże się z kosztem równym 1.

Przedstawioną sytuację można opisać jako grę, w której każdy z trzech graczy ma dwie strategie: pozostać w domu (D) lub pójść do baru (B). Wypłata z zastosowania strategii D wynosi 0, natomiast przy wyborze strategii B wypłata może wynieść 1 (jeżeli co najwyżej jeden z pozostałych graczy poszedł do baru) lub –1 (jeżeli obaj pozostali gracze postanowili odwiedzić bar). W teorii gier jako „rozwiązanie” wskazuje się równowagę Nasha, czyli taki wybór profilu strategii

[7] Czwartek 24 października 1929 roku – dzień rekordowych spadków na giełdzie nowojorskiej, który był początkiem wielkiego kryzysu.

[8] Systematyczny opis i analizę różnych form tej gry można znaleźć w książce (Challet i in., 2005).)

(układu strategii dla każdego gracza), w których żadnemu z graczy nie opłaca się zmienić jego własnej strategii. Jak łatwo zauważyć, w tym przykładzie równowagą Nasha jest każdy układ strategii, w którym dwie osoby wybierają wyjście do baru, a jedna – pozostanie w domu. Są trzy takie równowagi: BBD, BDB i DBB. Jak w wielu problemach teoriogrowych, kłopot polega na koordynacji strategii: kto powinien zostać w domu, a kto pójść do baru?

Uogólnienie tej gry w kontekście rynków finansowych sformułowano w artykułach (Challet i Zhang, 1997; Challet i in., 2000). Klasyczna definicja gry mniejszości jest następująca. Rozważamy zbiorowość składającą się z N osób (inwestorów), gdzie N jest liczbą nieparzystą. W każdej rundzie gry każdy z graczy decyduje się, czy kupować (K), czy sprzedawać (S). Gdy jest więcej kupujących, cena akcji wzrasta i zyskują kupujący. Gdy więcej inwestorów jest zdecydowanych sprzedawać, cena spada z korzyścią dla kupujących. W każdej rundzie gry zwycięzcami są gracze, którzy wybrali mniej popularną strategię (mniejszość inwestorów)[9]. Inwestorzy przy wyborze swojej decyzji w następnej turze mogą brać pod uwagę rezultaty z poprzednich tur. Na podstawie tego, które strategie w ostatnich M turach były wygrywające, podejmują decyzję o inwestycji w obecnej turze. Tabela 2 przedstawia przykład takiej strategii przy pamięci inwestora obejmującej dwie ostatnie tury ($M = 2$).

Tabela 2. Przykładowa strategia w grze mniejszości

Tura –2	Tura –1	Decyzja
K	K	K
K	S	S
S	K	S
S	S	K

Źródło: opracowanie własne.

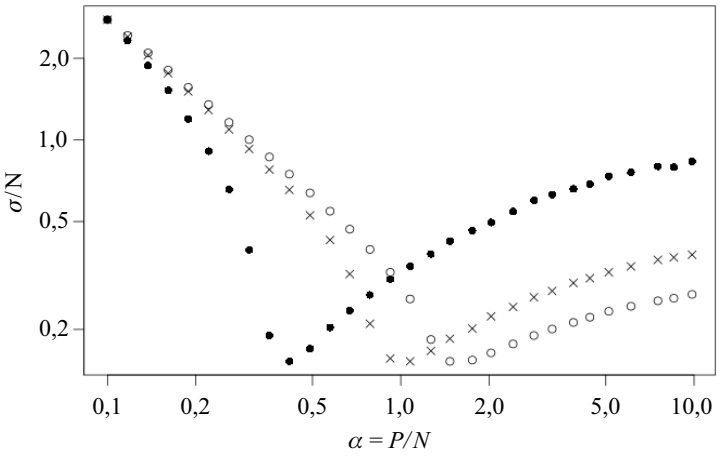
Strategie oparte na wynikach z przeszłości łatwo jest opisać liczbowo, na przykład kodując wybór K jako 1, a wybór S jako 0. Strategię przedstawioną w tabeli 2 można wówczas opisać jako cztery ciągi cyfr: 111, 100, 010, 001. Interpretując te ciągi jako liczby w zapisie dwójkowym, strategia składa się z ciągu liczb 7, 4, 2, 1[10]. Kodując w ten sposób strategie inwestorów, łatwo można

[9] W oryginalnej wersji gry wypłaty były równe 1 (dla mniejszości) lub –1 (dla graczy, którzy wybrali strategię większości). Istnieją też modyfikacje, w których wysokość wypłaty zależy od tego, jak duży jest stosunek liczby graczy mniejszościowych do większościowych. Zasadniczo nie zmienia to jednak własności gry.

[10] Faktycznie każdą strategię można zapisać za pomocą jednej liczby, ponieważ strategia musi uwzględniać odpowiedź na każdą możliwą historię ostatnich M tur. Zatem ustalając schematy historii, wystarczy zapisać możliwe odpowiedzi na nie. W naszym przykładzie strategia w zapisie dwójkowym miałaby postać 1001, co odpowiada liczbie 9 w zapisie dziesiętnym.

przeprowadzać komputerowe symulacje rynku. Symulacje wyglądają następująco. Mamy *N* agentów (inwestorów) i zakładamy, że każdy z nich, dokonując wyboru w każdej turze, bierze pod uwagę wyniki ostatnich *M* tur. Dla każdego agenta dobieramy strategię, losując odpowiedni ciąg liczb (lub przy innym kodowaniu – jedną liczbę). Następnie pozwalamy agentom działać na rynku zgodnie w ich strategiami. Rozwijając tę symulację, możemy pozwolić każdemu agentowi na wybór spośród *S* losowo wybranych strategii. Jeżeli któraś z nich okaże się zwycięska, będzie częściej wybierana w następnych turach.

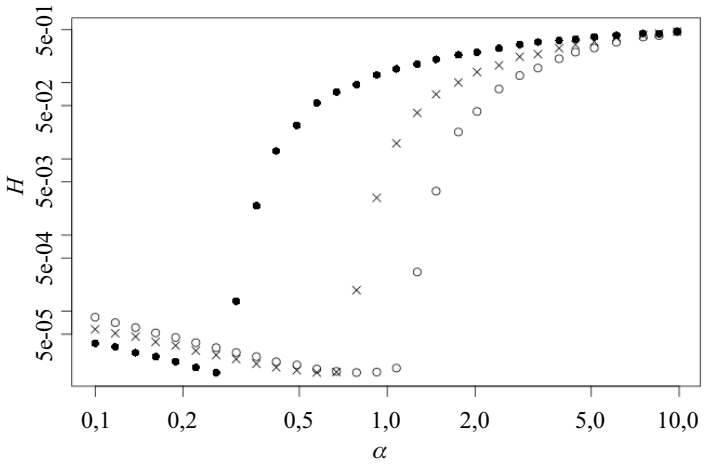
Gra jest skonstruowana w taki sposób, że nie ma „stanu stabilnego". Jeżeli jakaś strategia staje się zbyt popularna, opłacalne jest zmienienie jej na inną, „mniejszościową". Wyniki symulacji pokazują, że dynamika w takiej grze jest skomplikowana – dla parametrów gry istnieją punkty krytyczne, po których przekroczeniu zagregowane statystyki gry gwałtownie się zmieniają. Rysunki 1 i 2 przedstawiają zmienność rynku (σ^2 / N, definiowaną jako wariancję wyborów strategii w danej turze) oraz efektywność informacyjną rynku *H* w zależności od parametru $\alpha = P / N$, gdzie $P = 2^M$ jest liczbą możliwych strategii. Symulacje przeprowadzono dla trzech różnych zestawów strategii dla każdego agenta (agent mógł wybierać, odpowiednio, spośród 3, 4 lub 5 dostępnych dla niego strategii).



Rysunek 1. Zmienność w zależności od parametru α – możliwych strategii na agenta

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie symulacji można wyciągnąć następujące wnioski. Istnieją pewne punkty krytyczne dla parametru α (stosunku pamięci agentów do ich liczby). Zmienność na rynku rośnie, gdy liczba graczy jest zbyt mała lub zbyt duża (co odpowiada losowości przy mało płynnym rynku i efektowi „podążania



Rysunek 2. Efektywność informacyjna rynku w zależności od parametru α

Źródło: opracowanie własne.

za stadem" na dużych rynkach). Efektywność informacyjna rynku wzrasta, gdy parametr α przekracza określoną wartość (co jest związane z mniejszą liczbą graczy lub dłuższą pamięcią każdego z graczy)[11].

Przetrwanie najlepiej dostosowanych (strategii)

W takich badaniach gra mniejszości lub symulacje sztucznych rynków (na przykład rynek Santa Fe Institute) przyjmują podejście empiryczne. Przeprowadza się symulacje, a następnie na podstawie zgromadzonych danych wyciąga się wnioski. Możliwe jest także inne, bardziej teoretyczne podejście, w którym stara się odpowiedzieć na pytanie, jakie własności powinna mieć „zwycięska" strategia inwestycyjna.

Takie modele są oparte na teorii gier powtarzanych. Strategia inwestycyjna to reguła lub przepis, który na podstawie dotychczasowej historii rynku podaje, w jakich proporcjach należy ulokować pieniądze. W przeciwieństwie do modeli symulacyjnych, historia rynku może tu być dowolnie długa – w strategii

[11] Jednym z najważniejszych rozwinięć modeli opartych na takich symulacjach jak gra mniejszości jest symulacyjny rynek akcji Santa Fe Institute. Jego opis można znaleźć w (Ehrentreich, 2008). Strategie inwestycyjne były opisywane liczbami binarnymi, a dobór strategii przeprowadzano za pomocą algorytmów genetycznych (z uwzględnieniem możliwości wymiany części kodu genetycznego i mutacji). Bardzo złożony system symulacyjny, wykorzystujący wiele „stylizowanych faktów" na temat rynków finansowych, jest przedstawiony w książce Dowlinga (2005).

inwestycyjnej można brać pod uwagę cały okres od momentu 0, czyli powstania rynku. Przykładem takiej strategii jest zasada „inwestuj w akcje różnych spółek proporcjonalnie do sumy dywidend wypłaconych od początku istnienia spółki". W pracach (Amir i in., 2005; Amir i in., 2021; Evstigneev i in., 2016) rozważano tego typu modele w sytuacji, gdy inwestorzy mogą lokować w akcje spółek wypłacających losowe dywidendy, przy czym wielkość dywidend jest opisana łańcuchem Markowa. W każdym okresie istnieje populacja różnych strategii, a ceny na rynku kształtują się tak, aby zrównoważyć popyt z podażą. Rozważano własności, jakimi powinny cechować się różne klasy strategii, przy czym miarą „dopasowania" strategii jest jej udział w całkowitej kapitalizacji rynku. „Strategie przeżywające" to takie, których udział w całości rynku pozostaje w długim okresie niezerowy. „Pojedynczy przeżywający" (*single survivor*) to strategia, której udział w rynku ostatecznie cechuje się dążeniem do 100%. Autorzy tych prac utożsamiają to ze „strategią stabilną ewolucyjnie" – strategią, która ostatecznie wyeliminuje wszystkich konkurentów. Z twierdzeń udowodnionych w tych artykułach wynika, że taką strategią wygrywającą jest strategia inwestowania w wartość (*value investing*), którą można opisać następująco: „inwestuj proporcjonalnie do wartości oczekiwanej przyszłego strumienia dywidend spółki".

Schnetzer i Hens (2022) przeprowadzili empiryczną weryfikację tej zasady metodami symulacyjnymi. W ich badaniu rozważono symulację, w której inwestorzy mogli lokować pieniądze w inwestycje pozbawione ryzyka (obligacje rządu amerykańskiego), obligacje korporacyjne lub akcje notowane na giełdzie nowojorskiej. Rozważali różne typy strategii, na przykład inwestowanie pasywne lub inwestycje oparte na modelu CAPM[12]. Grupa strategii konkurowała ze sobą, a wzrost wartości każdej strategii wyznaczano na podstawie cen równowagi rynkowej. W większości symulacji najlepsza okazała się strategia oparta na inwestowaniu proporcjonalnie do stopy zwrotu, czyli realistyczny odpowiednik zwycięskiej strategii z modeli teoretycznych.

Inny rodzaj modeli teoretycznych zastosowali Lux i Marchessi (1999), Lo (2004) oraz Scholl i in. (2021). W stosowanych przez nich modelach wyróżnia się kilka typów inwestorów obecnych na rynku: na przykład „fundamentalistów" (inwestujących w wartość spółki), „podążających za trendem" lub „inwestorów naiwnych" (*noise traders*). W tych badaniach istotnie jest nie tyle wyłonienie strategii wygrywającej, ile sprawdzenie, jak interakcja między różnymi typami inwestorów wpływa na dynamikę cen. Stopy zwrotu cen akcji w takich modelach wykazują własności obserwowane na rzeczywistych rynkach: grupowanie zmienności, grube ogony i rozkłady potęgowe ogonów (*power law*). W artykule (Lux i Schornstein, 2005) otrzymano podobne wyniki dla modelu kursu

[12] *Capital asset pricing model* (model wyceny aktywów kapitałowych) – standardowy w finansach model wyceny, w którym bierze się pod uwagę możliwą zyskowność i ryzyko inwestycji.

wymiany walut, opartego na prostym modelu nakładających się pokoleń (*overlapping populations*).

Ewolucja kulturowa a finanse

W modelach, w których rozważa się konkurencję między różnymi strategiami inwestycyjnymi, jako „miarę dopasowania" przyjmuje się najczęściej stopę zwrotu z inwestycji lub długookresowy udział inwestycji dokonywanych przy pomocy danej strategii w ogólnej kapitalizacji rynku. Kryterium dopasowania jest więc czysto finansowe. Jednak inwestorzy w świecie rzeczywistym kierują się różnymi kryteriami. Działania na rynku finansowym są elementem życia społecznego. Inwestorzy wymieniają się informacjami i przekazują sobie wskazówki lub doświadczenia. Innymi słowy, inwestowanie jest pewną częścią kultury.

Istnieje stosunkowo świeży nurt w finansach ewolucyjnych, w którym bierze się to pod uwagę. W tym podejściu strategie inwestycyjne traktuje się jako pewnego rodzaju „schematy" rozprzestrzeniające się w społeczności, które można oceniać według dwóch kryteriów: finansowego oraz łatwości przekazu w społeczności. Kryterium finansowe jest łatwo mierzalne ilościowo – na przykład za pomocą stopy zwrotu z inwestycji. Kryterium „społeczne" to łatwość, z jaką dana strategia jest przyjmowana przez innych. Niektóre idee rozprzestrzeniają się łatwiej, ponieważ są prostsze do zrozumienia lub bardziej interesujące[13].

Shiller (2017) przedstawił to za pomocą „narracji ekonomicznych". W jego ujęciu „narracja" to prosta historia przedstawiająca łatwe wyjaśnienia zdarzeń ekonomicznych, historia, którą można posłużyć się w codziennej rozmowie. Przykładami takich narracji mogą być proste porady dotyczące inwestycji („kupuj, kiedy inni sprzedają", „idź za trendem"), wyjaśnienia pewnych zdarzeń gospodarczych (na przykład narracje dotyczące Wielkiej Depresji) lub historie osób, które zarobiły duże pieniądze, stosując pewne strategie („zainwestował w bitcoina i jest teraz bogaty"). Shiller przedstawia dane ilościowe dotyczące rozpowszechniania się takich narracji: według ankiet przeciętny inwestor przed podjęciem decyzji radzi się około 20 osób, a tylko 23% inwestorów podejmuje decyzje samodzielnie. Również analiza występowania pewnych słów kluczowych na podstawie danych z Google pokazuje, że rozpowszechnianie się narracji pasuje do klasycznego modelu rozpowszechniania się epidemii.

Lane w wraz ze współautorami (Lane i in., 2022) wykorzystali analizę komunikatów wymienianych między profesjonalistami działającymi na rynku finanso-

[13] W inwestowaniu najlepszym przykładem jest chyba analiza techniczna. Nie ma przekonujących dowodów, że jej stosowanie daje w długim okresie wyższe zyski, ale systematyka różnych „formacji" zmian cen jest sama w sobie fascynująca.

wym oraz historie ich transakcji. Na podstawie 1 mln wiadomości wysyłanych przez komunikatory internatowe oraz historii 2 mln transakcji zawieranych przez inwestorów prowadzących transakcje *intraday* (transakcje krótkookresowe, w których pozycja jest otwierana i zamykana w trakcie jednego dnia) dostrzegli pewne wzorce. Inwestorzy chętniej informowali o sukcesach niż o porażkach, zwłaszcza w komunikatach wysyłanych do bliższych znajomych. Z drugiej strony osoby, które otrzymywały te komunikaty, wykorzystywały w swoich transakcjach raczej informacje o niepowodzeniach (które otrzymywały rzadziej).

Akçay i Hirshleifer (2021) przedstawili propozycję podejścia opartego na „finansach społecznych", które miałoby być uogólnieniem finansów ewolucyjnych na ewolucję kulturową. Ich zdaniem uwzględnienie tego aspektu – jak „podejścia" (*traits*) są przekazywane między ludźmi na poziomie kultury – może pozwolić wyjaśnić niektóre ewenementy obserwowane w finansach, które są niezgodne z klasyczną teorią finansów. Do zjawisk takich należą na przykład kaskady informacyjne, przenoszenie kryzysów, bańki spekulacyjne lub nagłe załamania rynków. Zdaniem Akçaya i Hirshleifera wynikają one z tego, że pewne strategie niekoniecznie muszą być najlepiej dostosowane, jeżeli mierzyć to faktycznymi wynikami finansowymi, ale są lepiej dostosowane do rozpowszechniania się w głowach inwestorów.

Podsumowanie

W rozdziale został przedstawiony subiektywny przegląd propozycji dotyczących zastosowania metod ewolucyjnych w teorii finansów. W niektórych z tych podejść stosuje się metody empiryczne, oparte na „twardych" faktach, w innych przyjmuje się bardziej teoretyczny punkt widzenia, związany z modelami abstrakcyjnymi. Najciekawsze wydaje się podejście trzecie, w którym dynamika zjawisk finansowych jest traktowana jako pewna część dynamiki kultury. Strategie inwestycyjne w takim podejściu są podobne do tego, co Dawkins (2007) nazwał „memami" – elementarnymi cząstkami zjawisk kulturowych lub odpowiednikami genów w świecie społecznym. Problemem w tym podejściu jest to, że ewolucja kultury wydaje się czymś bardzo trudnym do modelowania. Na przełomie XX i XXI wieku „memetyka" była dość modnym podejściem. W latach 1997–2005 wydawany był nawet *Journal of Memetics* poświęcony wyłącznie tego typu rozważaniom. Jednak dość nieprzypadkowo artykuł w ostatnim wydaniu tego czasopisma (Edmonds, 2005) miał tytuł „Dlaczego memetyka zawiodła". Podejście było ambitne, ale ograniczało się do opisu zjawisk innym językiem. Nie dostarczyło nowego zrozumienia zjawisk. Dlatego „mem" obecnie oznacza śmieszny rysunek w internecie, a nie skomplikowane

pojęcie teoretyczne, jak było w zamiarach. Przed trzecim podejściem w finansach ewolucyjnych stoi więc duże wyzwanie.

Bibliografia

Akçay, E. i Hirshleifer, D. (2021). Social finance as cultural evolution, transmission bias, and market dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, *118*(26), 1-9. https://doi.org/10.1073/pnas.2015568118

Amir, R., Evstigneev, I. V., Hens, T., Potapova, V. i Schenk-Hoppe, K. R. (2021). Evolution in pecunia. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, *118*(26), 1–8. https://doi.org/10.1073/pnas.2016514118

Amir, R., Evstigneev, I. V., Hens, T. i Schenk–Hoppe, K. R. (2005). Market selection and survival of investment strategies. *Journal of Mathematical Economics 41*(1–2), 105–122.

Arthur, W. B. (1994). Inductive reasoning and bounded rationality: the El Farol problem. *American Economic Association Papers and Proceedings, 84*(2), 406–411.

Bateson, M. i Kacelnik, A. (1996). Rate currencies and the foraging starling: the fallacy of the averages revisited. *Behavioural Ecology, 7*(3), 341–52.

Challet, D., Chessa, A., Marsili, M. i Zhang, Y.-C. (2000). From minority games to real markets. *Quantitative Finance, 1*(1), 168–176.

Challet, D., Marsili, M. i Zhang, Y.-C. (2005). *Minority games*. Oxford University Press.

Challet, D. i Zhang, Y.-C. (1997). Emergence of cooperation and organization in an evolutionary game. *Physica A, 246*(3), 407–418.

Cole, H. L., Mailath, G. i Postlewaite, A. (1992). Social norms, savings behavior, and growth. *Journal of Political Econnomy, 100*(6), 1092–125.

Cooper, W. S. i Kaplan R. H. (1982). Adaptive "coin-flipping": a decision-theoretic examination of natural selection for random individual variation. *Journal of Theoretical Biology, 94*(1), 135–151.

Dawkins, R. (2007). *Samolubny gen.* Prószyński i S-ka.

Dowling, B. F. (2005). *Evolutionary finance*. Palgrave Macmillan.

Edmonds, B. (2005). The revealed poverty of the gene-meme analogy – why memetics per se has failed to produce substantive results. *Journal of Memetics, 9*. http://cfpm.org/jom-emit/2005/vol9/edmonds_b.html

Ehrentreich, N. (2008). *Agent-based modeling. The Santa Fe Institute artificial stock market model revisited*. Springer Verlag.

Evstigneev, I., Hens, T. i Schenk-Hoppe, K. R. (2016). Evolutionary behavioral finance. W: E. Haven (red.), *The handbook of post crisis financial modeling* (s. 214–234). Palgrave Macmillan.

Friedman, M. i Savage, L. J. (1948). The utility analysis of choices involving risk. *Journal of Political Economy, 56*, 279–304.

Graeber, D. (2014). *Debt: The first 5,000 years*. Melville House.

Graeber, D. i Wengrow, D. (2022). *Narodziny wszystkiego. Nowa historia ludzkości*. Zysk i S-ka.

Holtfort, T. (2019). From standard to evolutionary finance: a literature survey. *Management Review Quarterly, 69*(2), 207–232.

Kahneman, D. (2012). *Pułapki myślenia. O myśleniu szybkim i wolnym*. Media Rodzina.

Kahneman, D. i Tversky, A. (1979). Prospect theory: an analysis of decision under risk. *Econometrica*, *47*(2), 263–292.

Lane, J. N., Lim, S. S. i Uzzi, B. (2022). *Biased information transmission in investor social networks: evidence from professional traders.* SSRN Working Paper. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3956040

Lengwiler, Y. (2004). *Microfundations of financial economics*. Princeton University Press.

Lo, A.W. (2004). The adaptive market hypothesis: market efficiency from an evolutionary perspective. *Journal of Portfolio Management*, *30*(5), 15–29.

Loewenstein, G. i Prelec, D. (1992). Anomalies in intertemporal choice: evidence and an interpretation. *Quarterly Journal of Economics, 107*(2), 573–597.

Lux, T. i Marchessi, M. (1999). Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market. *Nature, 397*, 498–500.

Lux, T. i Schornstein, S. (2005). Genetic learning as an explanation of stylized facts of foreign exchange markets. *Journal of Mathematical Economics 41*(1–2), 169–196.

Mehra, R. i Prescott, E. C. (1985). The equity premium: a puzzle. *Journal of Monetary Economics, 15*(2), 145–161.

Mehra, R. i Prescott, E. C. (1988). The equity premium: a solution?. *Journal of Monetary Economics, 22*,(1), 133–136.

Polowczyk, J. (2021). A synthesis of evolutionary and behavioural economics. *Economics and Business Review, 7*(3), 16–34.

Robson, A. J. (2001). The biological basis of economic behavior. *Journal of Economic Literature*, *39*(1), 11–33.

Robson, A. J. i Kaplan, H. S. (2006). Viewpoint: The economics of hunter-gatherer societies and the evolution of human characteristics. *Canadian Journal of Economics*, *39*(2), 375–398.

Robson A. J. i Orr H. A. (2021). Evolved attitudes to risk and the demand for equity. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, *118*(26), 1–8. https://doi.org/10.1073/pnas.2015569118

Robson A. J. i Samuelson L. (2009). The evolution of time preference with aggregate uncertainty. *American Economic Review, 99*(5), 1925–1953.

Schnetzer, M. i Hens, T. (2022). Evolutionary finance for multi-asset investors. *Financial Analysts Journal, 78*(3), 115–127.

Scholl, M. P., Calinescu, A. i Farmer, J. D. (2021). How market ecology explains market malfunction. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 118*(26), 1–9. https://doi.org/10.1073/pnas.2015574118

Shiller, R. J. (2017). Narrative economics. *American Economic Review, 107*(4), 967–1004.

Smith, A. (2012). *Badania nad naturą i przyczynami bogactwa narodów*. Wydawnictwo Naukowe PWN.