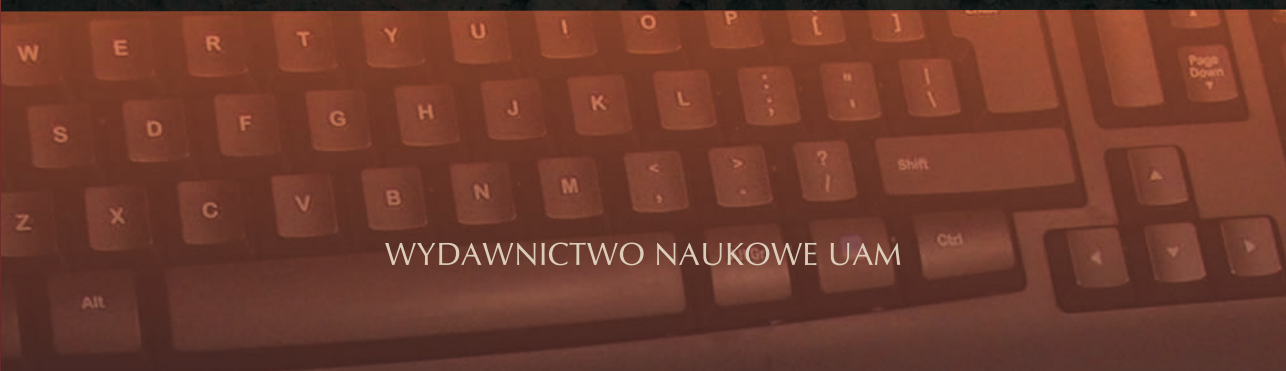


Dorota Lipowska

KOMPUTEROWE MODELOWANIE EWOLUCJI JĘZYKA



WYDAWNICTWO NAUKOWE UAM

KOMPUTEROWE
MODELOWANIE
EWOLUCJI JĘZYKA

UNIwersytet IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
SERIA BADANIA INTERDYSCYPLINARNE NR 45

DOROTA LIPOWSKA

**KOMPUTEROWE
MODELOWANIE
EWOLUCJI JEZYKA**



POZNAŃ 2016

ABSTRACT: Lipowska Dorota, *Komputerowe modelowanie ewolucji języka*. [Computational modelling of language evolution]. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu (Adam Mickiewicz University Press). Poznań 2016. Seria Badania Interdyscyplinarne nr 45. Pp. 295. Tab 1, 38 Figs. ISBN 978-83-232-3107-3. ISSN 1895-376X. Text in Polish with a summary in English.

The present monograph belongs to the interdisciplinary scientific field of language evolution. It is mainly concerned with the application of computational modelling to study the origin and change of language. Computer simulations of models called language games, implemented as multi-agent systems, enable us to examine how a population of individuals can reach a consensus on some linguistic conventions, for example, names. This process, fundamental for the emergence of language, is spontaneous and takes place without any external control or steering. The emergence of language is thus a global consequence of local interactions between individuals. Computational modelling turns out to be research tool extremely well-suited to studying some aspects of language structure and processes, such as diversification of languages and their extinction. It might even shed some light on the intricate influence of our language on the biological evolution of humans.

KEYWORDS: language evolution; evolutionary linguistics; computer modelling; language games; naming game; agent models

Dorota Lipowska, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Neofilologii, Zakład Logiki Stosowanej, al. Niepodległości 4, 61-874 Poznań, Poland

Recenzent: dr hab. Przemysław Żywiczyński, prof. UMK

Publikacja dofinansowana przez
Rektora Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
Wydział Neofilologii oraz Instytut Językoznawstwa UAM

© Dorota Lipowska 2016

This edition © Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2016

Projekt okładki: K. & S. Szurpit
Zdjęcie na okładce: Karolina Sypniewska-Wida (z wyprawy „Afryka Nowaka”)
Redakcja: Małgorzata Szkudlarska
Łamanie komputerowe: Łukasz Pańkowski, Dorota Lipowska
Redakcja techniczna: Elżbieta Rygielska

ISBN 978-83-232-3107-3
ISSN 1895-376X

WYDAWNICTWO NAUKOWE UNIwersYTETU IM. AdAMA MICKIEWICZA W POZNAŃU
61-701 POZNAŃ, UL. A. FREDRY 10
www.press.amu.edu.pl
Sekretariat: tel. 61 829 46 46, faks 61 829 46 47, e-mail: wyd nauk@amu.edu.pl
Wydanie I. Ark. wyd. 20,00. Ark. druk. 18,50
DRUK I OPRAWA: EXPOL, WŁOCŁAWEK, UL. BRZESKA 4

Najbliższym

Spis treści

Wstęp	1
1. Wprowadzenie	13
1.1. Lingwistyka ewolucyjna	14
1.2. Ewolucja języka	19
1.3. Złożoność i emergencja	35
1.4. Dlaczego symulacje	42
1.5. Jakie symulacje	53
2. Gry językowe	79
2.1. Ogólna charakterystyka	80
2.2. Gry językowe Wittgensteina	82
2.3. Cykl semiotyczny	86
2.4. Problemy konwencjonalizacji	97
2.5. Strategie	104
2.6. Wybrane modele	116
3. Ewolucyjny model gry w nazywanie	135
3.1. Podejście hybrydowe	136
3.2. Charakterystyka modelu	138
3.3. Przejście biolingwistyczne	144
3.4. Dynamika modelu	152
3.5. Efekt Baldwina	155
3.6. Wnioski	169
4. Wieloobiektowa gra w nazywanie	173
4.1. Synonimia i homonimia	174
4.2. Charakterystyka modelu	190
4.3. Obliczenia numeryczne	197

4.4. Synonimy i homonimy w modelu	203
4.5. Szumy a dystrybucja słów	209
4.6. Wnioski	213
5. Model na adaptatywnej sieci ważonej	219
5.1. Model na sieci złożonej	220
5.2. Charakterystyka modelu	222
5.3. Symulacje komputerowe	226
5.4. Tryb jednojęzykowy	229
5.5. Tryb wielojęzykowy	237
5.6. Wnioski	245
Podsumowanie	251
Bibliografia	259
Computational modelling of language evolution	
(Summary)	285

Wstęp

*Science is what we understand well enough
to explain to a computer.
Art is everything else we do [...].
Science advances whenever an Art becomes a Science.
And the state of the Art advances too,
because people always leap into new territory
once they have understood more about the old.*

Donald E. Knuth

Język jest fundamentalnym aspektem i istotnym wyznacznikiem człowieczeństwa. Zdolność posługiwania się językiem odróżnia nas zasadniczo od innych gatunków. Nic więc dziwnego, że zagadka jego powstania i rozwoju zawsze nas fascynowała. Refleksje na ten temat uprawiano niemalże od zarania naszej cywilizacji, najpierw na gruncie mitologii i religii, później scholastyki i filozofii, wreszcie w nurcie bardziej naturalistycznym, czyli w oparciu o prawa przyrody – aczkolwiek nadal jedynie spekulatywnie. Język to dar bogów, to wynik umowy społecznej, wytwór cywilizacji, cecha wrodzona, uboczny efekt rozwoju mózgu, język wywodzi się ze śpiewu, z gestów, ze zwierzęcych odgłosów – pojawiały się coraz to nowe objaśnienia, mające chyba tylko jedną wspólną cechę: brak im było jakichkolwiek empirycznych podstaw. W XIX wieku powstało już tyle wyimaginowanych, a niesprawdzalnych koncepcji na ten temat, że towarzystwa filologiczne paryskie (Société Linguistique de Paris w roku 1866) i londyńskie (Philological Society of London w roku 1872) oficjalnie uznały zajmowanie się tą tematyką za zajęcie niepoważne i odmówiły przyjmowania dotyczących jej komunikatów [Corballis 2009; Cohen 2013].

Kolejne stulecie to, jak wiemy, okres niebywałego postępu nauk empirycznych, który umożliwił wreszcie – właściwie dopiero pod koniec XX wieku – podjęcie zgodnych z rygorami naukowymi badań, których celem jest próba znalezienia odpowiedzi na to odwieczne pytanie: jak powstał język i jak dalej kształtowała się jego forma. Próbuje się szukać rozwiązania tego problemu z wielu możliwych kierunków, proponuje się różnego typu podejścia, stosuje się rozmaite metody i techniki badawcze – ale co do jednego osiągnięto już, jak się wydaje, jedno-myślność: odpowiedzi na pytanie o genezę języka i jego struktury należy szukać w ramach paradygmatu ewolucyjnego. Najpierw w toku ewolucji biologicznej musiały pojawić się u człowieka pewne szczególne preadaptacje, czy to anatomiczne, czy kognitywne, jako warunki wstępne, niezbędne dla wykształcenia się naszych zdolności językowych. Kiedy już zaczęliśmy się tymi zdolnościami posługiwać, cały proces znacznie przyspieszył za sprawą ewolucji kulturowej, w trakcie której (proto)języki rozwijały się w coraz bardziej złożone struktury. W dodatku przekaz kulturowy stymulował nasz coraz szybszy rozwój społeczny i cywilizacyjny, co z kolei sprzyjało zapewne dalszej ewolucji języków.

Próba odtworzenia procesów i warunków, które do tego doprowadziły, nie jest zadaniem łatwym, gdyż wyjątkowo trudno tu o świadectwa empiryczne. Powstanie języka jest zdarzeniem tak odległym w czasie, że brak jakichkolwiek jego konkretnych śladów (jak to się często ujmuje: ewolucja języka nie zostawiła skamielin). Zjawisko to nie powtarza się, toteż nie podlega naszej bezpośredniej obserwacji, nie da się też przeprowadzać w tym zakresie eksperymentów. Skoro brakuje twardych „dowodów rzeczowych”, trzeba korzystać z informacji pośrednich, w dodatku często pochodzących z wielu zróżnicowanych dyscyplin. Jak obrazowo twierdzi James Hurford [2003a, s. 57], jeden z najbardziej szanowanych autorytetów i weteranów tej dziedziny badań: „Language evolution research must continue to feed, voraciously and eclectically, on the results from a very wide range of disciplines”. Także Morten Christiansen i Simon Kirby w swoim często cytowanym artykule przeglądowym [2003a] uznają konieczność interdyscyplinarnej współpracy naukowej za jedną z trzech zasadniczych kwestii niebudzących wątpliwości ani kontrowersji wśród badaczy ewolucji języka (przy czym dwie pozostałe to potrzeba ustalenia zestawu preadaptacji nie-

zbędnych dla pojawienia się języka oraz celowość stosowania modelowania komputerowego w tej dziedzinie; zwłaszcza ta ostatnia kwestia warta jest podkreślenia w kontekście niniejszej monografii). Skomplikowanej sytuacji niewątpliwie nie ułatwia też niebywała złożoność tego wielopłaszczyznowego zjawiska, jakim jest język, i to nie tylko pod względem jego struktury jako systemu, czyli w aspekcie lingwistycznym, ale też właściwie w każdym innym – filogenetycznym, historycznym, ontogenetycznym, psychologicznym, funkcjonalnym, kulturowym czy społecznym. Nic dziwnego, że przez całe stulecia można było jedynie snuć domysły na temat powstania języka. Obecnie, starając się naukowo wyjaśnić jego genezę i ewolucję, powinniśmy robić to kompleksowo i na wszystkich wymienionych poziomach eksplanacyjnych, przy czym zasoby różnorodnych danych pozyskiwanych z całej palety dziedzin pokrewnych winny być wykorzystywane do określania założeń i warunków początkowych, jak też koniecznych do spełnienia wymogów i ograniczeń dla prowadzonych tu rozważań teoretycznych.

Systematyczny postęp, dokonujący się w różnych dyscyplinach naukowych związanych przede wszystkim z badaniami człowieka, ale także i innych gatunków, jak również systemów nieożywionych (czyli między innymi genetyki, neuronauk, antropologii, archeologii, biologii, prymatologii, psychologii ewolucyjnej, psycholingwistyki, socjolingwistyki, biolingwistyki, lingwistyki formalnej i komputerowej, kognitywistyki, informatyki, robotyki, sztucznego życia i sztucznej inteligencji, a nawet mechaniki statystycznej), doprowadził w rezultacie do takiej kumulacji wiedzy oraz do rozwoju takich technik i metod badawczych, że powstała w efekcie tego zupełnie nowa jakość badań otworzyła przed nami nieznane dotąd możliwości eksploracji problemu powstania języka, teraz już w ściśle naukowym reżimie. Nie bez znaczenia jest też fakt, że obecnie, głównie dzięki rozwojowi Internetu, wymiana informacji naukowej, w tym również pomiędzy różnymi dyscyplinami, jest prosta i szybka; badacze dysponują nie tylko efektywnymi środkami komunikacji, ale i łatwym dostępem do olbrzymich baz danych oraz do wyników najnowszych badań. To wszystko pozwala naukowcom z wielu odrębnych dziedzin na wzajemne wzbogacanie repertuaru stosowanych metod i narzędzi badawczych oraz na przyswajanie i integrację wielu różnych typów danych uzyskanych w ramach poszczególnych dyscyplin.

Kolejnym istotnym czynnikiem rozwoju badań dotyczących genezy i ewolucji języka był postęp komputeryzacji umożliwiający przeprowadzanie ekstensywnych symulacji komputerowych, tworzenie masywnych baz danych oraz przetwarzanie i analizowanie ogromnych ilości danych. Niektórzy autorzy uważają nawet, że komputerowe badania ewolucji języka są (obok genetyki) drugą najważniejszą specjalnością, jaka dołączyła w ostatnich latach do grona dyscyplin wnoszących swój wkład do tej tematyki [Wang *et al.* 2004]. Żeby zrozumieć, jak wyewoluowały nasze zdolności językowe i jak rozwijały się języki, trzeba badać nie tylko ich materialne (anatomiczne, genetyczne, neuronowe itd.) podłoże, czy też zachowania językowe ludzi (procesy akwizycji, kreolizacji, gramatyzacji i in.), jak również powiązane zjawiska u zwierząt – co mieści się w zakresie badań empirycznych – ale trzeba także analizować dynamikę populacyjną czy ewolucji kulturowej [Hurford 2003a, s. 40]. W tym ostatnim wypadku, wobec niedostatku danych empirycznych i niewykonalności rzeczywistych eksperymentów, bez symulacji komputerowych pozostałyby nam jedynie rozważania czysto teoretyczne i eksperymenty myślowe. W dodatku język wyłaniający się w populacji należy traktować jako złożony system adaptacyjny (*complex adaptive system*), a tego rodzaju systemów raczej nie udaje się opisać analitycznie, natomiast wygodnym narzędziem badania ich zachowania pozostaje właśnie modelowanie komputerowe. Symulacje rozmaitych modeli, choć pewnie nie wskażą jednoznacznie, jaki był ten „prawdziwy” scenariusz wyłonienia się języka, który faktycznie się zrealizował w naszej przeszłości, to jednak pozwalają przynajmniej ocenić, które z rozważanych koncepcji są bardziej prawdopodobne od innych, a które trzeba w ogóle odrzucić.

Podsumowując, należy zupełnie poważnie skonstatować, że na początku obecnego wieku ugruntował się już naukowy status dziedziny badawczej zajmującej się problemem powstania i rozwoju języka, a więc tematyką zaliczaną niegdyś wyłącznie do sfery czystych spekulacji i fantazji; lub, jak Willem Hollmann [2008], można to ująć bardziej żartobliwie: „Evolution, for a long time, was a dirty word in linguistics. However, since about a decade and a half evolutionary linguistics is sexy again”. Ta nowa dyscyplina, nazywana ewolucją języka (ang. *language evolution*), obejmuje interdyscyplinarne badania wszelkich (i biologicznych, i innego rodzaju) mechanizmów powstania

języka, to znaczy wyłonienia się w naszej flogenezie tej typowo ludzkiej zdolności do nabywania i używania języka. Dziedzinę tę niekiedy określa się też mianem lingwistyki ewolucyjnej, głównie jednak termin ten stosuje się w odniesieniu do badań typowo językoznawczych (mniej interdyscyplinarnych), a przede wszystkim do badań rozwoju języków jako struktur w wyniku działania mechanizmów ewolucji kulturowej [Żywiczyński, Wacewicz 2015, s. 130].

Świadectwem ugruntowania się tej nowej dyscypliny naukowej jest także, notowany w ostatnim ćwierćwieczu, lawinowy przyrost liczby publikowanych artykułów, ukazywanie się licznych monografii i podręczników, jak też cyklicznie odbywające się konferencje (najważniejsze to EVOLANG i Protolang). Jako że cechą charakterystyczną tej dziedziny jest jej multi- i interdyscyplinarność, to artykuły z jej zakresu znaleźć można w czasopismach z przeróżnych obszarów nauki: od „Science” i „Nature”, „PLoS” i „PNAS”, przez „Behavioral and Brain Sciences” i „Cognition”, „Journal of Theoretical Biology” i „Journal of Human Evolution”, „Lingua” i „Language Sciences”, po „Physical Review E” i „Physica A”, „Journal of Agents and Multi-Agent Systems” i „Advances in Complex Systems”, „Artificial Life” i wiele innych. Dopiero od bieżącego roku zaczyna się ukazywać czasopismo poświęcone wyłącznie tematyce ewolucji języka, a mianowicie „Journal of Language Evolution”, które ma ambicje stać się wspólnym forum wymiany informacji i poglądów dla badaczy wywodzących się z rozmaitych dyscyplin naukowych. Dotychczas taką funkcję, oprócz Internetu oczywiście, pełniły jedynie spotkania konferencyjne (których znaczenie jest i pozostanie zapewne niebagatelne).

*

Tematyka ewolucji języka, odpowiednio do jej interdyscyplinarnego charakteru, jest niezwykle bogata i rzecz jasna trudno byłoby ją tu przedstawić wyczerpująco we wszystkich jej istotnych aspektach. Zamierzenie autorki jest znacznie skromniejsze. Dwa podstawowe nurty badawcze w tej dziedzinie tworzą z jednej strony badania tego, jak w trakcie ewolucji biologicznej poprzez mechanizmy selekcji, doboru i adaptacji wykształciły się nasze unikatowe zdolności językowe (zdolności do nabywania i używania języka), zaś z drugiej to studia nad

tym, jak języki i ich struktury się rozwijały poprzez mechanizmy indywidualnego uczenia się i społecznego ich przekazu, czyli podlegając ewolucji kulturowej. Niniejsza monografia referuje autorskie badania prowadzone wyłącznie w ramach tego drugiego nurtu, czyli lingwistyki ewolucyjnej (*evolutionary linguistics*). Należy zaznaczyć, że badania te nie należą do językoznawstwa historycznego (diachronicznego), nie dotyczą bowiem zmian językowych zachodzących w poszczególnych językach etnicznych wraz z upływem czasu ani stopnia pokrewieństwa tych języków czy rekonstrukcji nieistniejących już prajęzyków.

Celem lingwistyki ewolucyjnej jest wyjaśnienie, jak struktury językowe mogły ewoluować z prostszych form w następstwie ich kulturowej transmisji. Obecnie coraz częściej wykorzystywanym do tego celu narzędziem jest modelowanie komputerowe. W ten właśnie sposób mogą być badane procesy rozwoju elementów języka z różnych poziomów – od fonologicznych, przez leksykalne, do syntaktycznych czy semantycznych. Do dyspozycji mamy także rozmaite techniki modelowania, na przykład za pomocą systemów wieloagentowych, sieci neuronowych, algorytmów genetycznych i innych. Za ich pomocą można realizować różnorodne typy modeli, z których dwa najpopularniejsze to modele gier językowych oraz modele iterowanego uczenia się [Steels 2002] (o innych wspomnimy jeszcze w rozdziale 1).

Niniejsza książka, zgodnie ze swoim tytułem, dotyczy właśnie modelowania komputerowego stosowanego w dziedzinie ewolucji języka. Do przeprowadzenia swoich badań autorka z wymienionych wyżej opcji wybrała modele z kategorii gier językowych, implementowane jako systemy wieloagentowe. Wszystkie przedstawione w tej monografii autorskie modele realizują różne warianty najbardziej reprezentatywnej z gier językowych, którą jest gra w nazywanie (*naming game*). Model ten odzwierciedla proces, dzięki któremu populacja odrębnych osobników (zwanym tu agentami), wyposażonych w określone własności czy umiejętności, lecz niedysponujących jeszcze wspólnym językiem, wyłącznie poprzez wzajemne interakcje komunikacyjne jest w stanie zbiorowo się zestroić i osiągnąć konsensus co do stosowanego w całej populacji zestawu lingwistycznych konwencji, dotyczących użycia określonych form językowych (na przykład fonemów lub słów czy też konstrukcji gramatycznych). Inaczej mówiąc, mimo wyłącznie lokalnego charakteru oddziaływań między agentami oraz bez żadnej ze-

wewnętrznej kontroli czy sterowania, finalnie może się w tym procesie wyłonić rezultat globalny w postaci zsynchronizowanej lingwistycznie zbiorowości, w której wszystkie jednostki posługują się tym samym językiem. W konstruowanych przez autorkę modelach agenty negocjują wyłącznie użycie form wyrazowych odnoszących się do określonych obiektów, czyli próbują zsynchronizować swoje leksykony. (Na wszelki wypadek wyjaśnijmy od razu, że nieosobowa forma „agenty” jest stosowana w tego typu kontekstach dla podkreślenia faktu, że odnosi się ona do fragmentów programu komputerowego, a nie do ludzi.)

Rozdział 1 wprowadza Czytelnika ogólnie w problematykę ewolucji języka, a zwłaszcza lingwistyki ewolucyjnej, eksponując przede wszystkim tematykę zastosowania modelowania komputerowego w tej dziedzinie. Po wskazaniu pewnych przykładów wykorzystania pojęć i metod biologii ewolucyjnej w badaniach językoznawczych, dyskutowane są kwestie związane z selekcyjnym ujęciem ewolucji języka, jak również potrzeba szerszych badań z zakresu jego ewolucji kulturowej. Przedstawiona jest w nim też koncepcja języka jako złożonego systemu adaptacyjnego, podlegającego zasadom selekcji i samoorganizacji. W dalszej kolejności uzasadniona zostaje nieodzowność korzystania z modelowania komputerowego jako wyjątkowego (a niekiedy nawet jedyne) narzędzia badawczego w omawianej dziedzinie. Na koniec zaprezentowane są podstawowe techniki i metody modelowania komputerowego stosowane w lingwistyce ewolucyjnej, ich klasyfikacje proponowane przez różnych autorów oraz przykłady implementacji.

Rozdział 2 poświęcony jest ważnej klasie modeli, jaką stanowią gry językowe, przeznaczone przede wszystkim do badania procesów negocjowania w populacji wspólnych konwencji językowych. Demonstrują one, jak globalny konsensus może spontanicznie wyłaniać się z lokalnych interakcji między poszczególnymi osobnikami (zwanymi tu agentami). Po krótkim odniesieniu do idei gier językowych Ludwiga Wittgensteina, przedstawiona jest charakterystyka modeli gier językowych w ujęciu twórcy tej koncepcji – Luca Steelsa. Omówione są podstawowe typy gier, wyróżnione tak ze względu na ich cel komunikacyjny, jak i na rozwiązywany w nich problem konwencjonalizacji. Zaprezentowane są rozmaite strategie rozwiązywania owych problemów, ze szczególnym uwzględnieniem strategii stosowanych w podstawowej grze językowej, jaką jest gra w nazywanie. Rozdział kończy dyskusja

kilku wybranych modeli gier językowych i uzyskanych dla nich wyników.

Kolejne trzy rozdziały przedstawiają wyczerpująco poszczególne autorskie modele gier językowych oraz wyniki ich komputerowych symulacji, realizowanych w formie systemów wieloagentowych. Omawiany tu materiał był już częściowo prezentowany w artykułach publikowanych w różnych czasopismach, głównie w języku angielskim (szczegółowe odnośniki do tych prac podane są w odpowiednich rozdziałach), został tu jednak rozszerzony i uzupełniony o pewne komentarze, jak też bardziej dokładne naświetlenie niektórych zagadnień (na przykład efektu Baldwina i jego recepcji w dziedzinie ewolucji języka w rozdziale 3, zjawiska homonimii i synonimii w rozdziale 4, czy modeli procesów kontaktowych oraz rozróżnienia dynamiki gry i dynamiki sieci w rozdziale 5). Dodane też zostały pewne nowe diagramy, a część pozostałych została na nowo zaadaptowana. Zawarte w rozdziale 1 wprowadzenie do tematyki modelowania komputerowego ewolucji języka oraz przedstawiona w rozdziale 2 charakterystyka klasy modeli gier językowych pozwalają ukazać modele własne autorki zreferowane w kolejnych rozdziałach w nieco szerszej perspektywie i na tle dotychczasowych osiągnięć w tej dziedzinie.

Rozdział 3 prezentuje niestandardowy, bo ewolucyjny, model gry w nazywanie, uwzględniający wszystkie trzy typy procesów niezbędnych w ewolucji języka: uczenie się, przekaz kulturowy i ewolucję biologiczną. Agenty nie tylko próbują we wzajemnych interakcjach ustalić wspólny słownik, jak zawsze w grze w nazywanie, ale ponadto także rozmnażają się, mutują i umierają. Cechą podlegającą selekcji i adaptacji jest ich zdolność uczenia się języka. Jak się okazuje, w tym modelu procesy ewolucyjne i kulturowe wzajemnie na siebie wpływają. W wyniku tego ich sprzężenia następuje w systemie nagłe biolingwistyczne przejście, w którym dokonania językowe agentów, jak i ich zdolności uczenia się gwałtownie wzrastają. Zauważony tu wpływ procesu uczenia się języka na genetyczne nabywanie zdolności uczenia się może być przejawem tak zwanego efektu Baldwina. Ponadto, jak pokazuje model, także tempo i charakter zachodzenia zmian kulturowych mogą stanowić kolejny czynnik wpływający na przebieg ewolucji języka. Niewykluczone, że w pewnym okresie naszej prahistorii występowało takie właśnie silne sprzężenie procesów lingwistycznych, kogni-

tywnych i ewolucyjnych, które mogło istotnie wpłynąć na dalszy rozwój języka, dynamizując go i modyfikując jego przebieg oraz charakter.

Rozdział 4 przedstawia pewną wieloobiektołą wersję modelu gry w nazywanie. Także w tym przypadku następuje samoorganizacja układu umożliwiająca agentom efektywną komunikację. Podczas symulacji tego modelu badana była także struktura wyłaniającego się języka, a w szczególności zjawiska homonimii i synonimii. W trakcie rozwoju układu synonimia praktycznie zanika, natomiast homonimia, choć na niskim poziomie, jednak pozostaje, wydając się być trwałą cechą języka. Oba te efekty są zasadniczo zgodne z obserwacjami poczynionymi dla języków naturalnych. W prezentowanym modelu zagadkowa asymetria między rzadką synonimią i częstą homonimią wyłania się w zupełnie naturalny sposób i całkowicie spontanicznie dzięki samoorganizacji systemu. Dodatkowo badany jest też tutaj wpływ szumu komunikacyjnego na kształtowanie się języka. Jak się okazuje, choć bezpośrednio obniża on efektywność komunikacji, to jednak w dłuższej perspektywie może odgrywać pozytywną rolę w rozwoju języka, przyczyniając się do różnicowania form wyrazowych oraz redukcji homonimii i synonimii, co z kolei prowadzi z jednej strony do usprawnienia komunikacji, zaś z drugiej do optymalizacji języka.

Rozdział 5 opisuje model gry w nazywanie na adaptatywnej sieci ważonej, w którym agenty preferują kontakty z partnerami, z którymi w dotychczasowej komunikacji odnosiły więcej sukcesów. Zachowanie modelu nie jest jednostajne, jak w innych wariantach gry w nazywanie, lecz zróżnicowane w zależności od poziomu owej preferencji. Gdy nie jest ona zbyt silna, model zachowuje się podobnie jak model gry w nazywanie na grafie pełnym, to znaczy bardzo szybko osiąga stan całkowitej lingwistycznej synchronizacji, w którym wszystkie agenty używają tego samego języka. Natomiast zupełnie inne zachowanie modelu można zaobserwować w przypadku, gdy owe preferencje wyboru partnerów interakcji są silniejsze. Układ nie osiąga wówczas pełnej synchronizacji, lecz stabilizuje się w stanie wielojęzycznym, choć o stosunkowo niewielkiej liczbie języków, wśród których jeden jest językiem dominującym. Taki rezultat jest właściwie niespotykany w grach w nazywanie, a o tyle interesujący, że rozpatrując ewentualne scenariusze dalszego przebiegu ewolucji języka (a właściwie spekulując na ten te-

mat), należałoby chyba raczej opowiedzieć się właśnie za scenariuszem wielojęzycznym. Należy też podkreślić, że ten proces, w którym z początkowo jednorodnej sieci stopniowo wyłaniają się odrębne klaster, odpowiadające osobnym wspólnotom komunikacyjnym, przebiega zupełnie samoistnie, będąc efektem wyłącznie samych tylko interakcji agentów – inaczej mówiąc, mamy tu znów do czynienia z ciekawym efektem samoorganizacji systemu.

W **Podsumowaniu** przywołana jest między innymi koncepcja Rudiego Kellera języka jako zjawiska trzeciego rodzaju (spontanicznego porządku podlegającego kulturowej ewolucji) oraz trzy typy kulturowego ewolucjonizmu według Tima Lewensa (z wnioskiem, że modele gier językowych realizują kombinację podejścia selekcyjnego z kinetycznym). Wspomniane są też trzy metodologie aktualnie stosowane w badaniach kulturowej ewolucji języka, natomiast najobszerniej dyskutowana jest ostatnia z nich, czyli modelowanie. Raz jeszcze pokrótce wskazano zalety i ograniczenia tego podejścia badawczego, cennego zwłaszcza w zastosowaniu do adaptacyjnych systemów złożonych, do jakich zaliczyć należy także język. Sformułowano też podstawowe wnioski płynące z komputerowych symulacji gier językowych, uwypuklając znaczenie tej ważnej klasy modeli, na której skoncentrowane były badania autorki.

Reasumując, przedstawione w tej publikacji badania autorki należą, ogólnie rzecz biorąc, do stosunkowo nowej dyscypliny zwanej lingwistyką ewolucyjną, a bardziej to precyzując, ich przedmiotem są różne warianty modelu gry w nazywanie, który służy do analizy procesu wyłaniania się dzięki mechanizmowi transmisji kulturowej wspólnego dla danej populacji zasobu jednostek językowych. Jeśli chodzi o prace polskich autorów na ten temat, to jak dotąd pojawiło się jedynie kilka artykułów dotyczących gry w nazywanie, na przykład [Lorkiewicz *et al.* 2012; Lorkiewicz, Katarzyniak 2014], w których autorzy (afilowani przy Politechnice Wrocławskiej) badają dynamikę synchronizacji w przypadku interakcji z wieloma mówcami lub wieloma słuchaczami. Z kolei Czytelnika zainteresowanego odmiennymi, w szczególności biologicznymi czy kognitywnymi aspektami ewolucji języka, należy odsłać do innych pozycji bibliograficznych z tego zakresu, w większości w języku angielskim. Jeśli bowiem chodzi o artykuły polskojęzyczne, to jak stwierdza Sławomir Wacewicz [2013, s. 2], nie tylko są one nie-

liczne, ale w dodatku zawierają też często nieścisłości lub opierają się na nieaktualnych już danych.

Na szczęście w ubiegłym roku ukazała się wreszcie publikacja wypełniająca tę dotkliwą lukę. Mowa tu o pierwszej polskiej książce z tej dziedziny pt. *Ewolucja języka. W stronę hipotez gesturalnych* Przemysław Żywczyński i Sławomira Wacewicza [2015]. Jest to znakomite i wyczerpujące kompendium wiedzy z zakresu tej tematyki. Oprócz bardzo obszernej i dogłębnej rekonstrukcji rozwoju koncepcji i poglądów na kwestię powstania języka, jak również współczesnego programu badawczego tej dziedziny naukowej, monografia ta zawiera także przegląd postulowanych preadaptacji, czyli anatomicznych i kognitywnych dyspozycji, których uprzednie wyłonienie się umożliwiło później powstanie języka, i wreszcie szczegółową analizę jednej z hipotez powstania języka, a mianowicie hipotezy gesturalnej. Autorzy tej publikacji są założycielami chyba jedyne (instytucjonalnego) ośrodka w Polsce, w którym prowadzone są badania z zakresu ewolucji języka, a mianowicie Centrum Badań nad Ewolucją Języka (przy Wydziale Filologicznym Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu), działającego od 2012 roku. Są oni także twórcami cyklu konferencji *Ways to Protolanguage* (Protolang), organizowanych od 2009 roku, a dotyczących najwcześniejszych etapów rozwoju języka w filogenetycznej historii człowieka. Konferencje te zdobyły już międzynarodowe uznanie i po trzech polskich edycjach (dwa razy w Toruniu i raz we Wrocławiu) kolejna odbyła się w Rzymie. Natomiast najważniejszy w dziedzinie ewolucji języka cykl konferencji, czyli *Evolution of Language International Conferences* (EVOLANG), będzie miał swoją następną edycję (w roku 2018) właśnie w Toruniu.

*

Pragnę podziękować wszystkim, którzy umożliwili mi ukończenie niniejszej monografii, przede wszystkim moim opiekunom naukowym i zwierzchnikom za ich pomoc, cierpliwość i wyrozumiałość, oraz koleżankom i kolegom za życzliwe wspieranie mnie. Szczególne wyrazy wdzięczności chciałabym złożyć prof. dr. hab. Adamowi Lipowskiemu z Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu za jego wieloletnią już ze mną współpracę i wspólną realizację różnych projektów, w tym miejscu oczywiście – przede wszystkim tych

związanych z problematyką ewolucji języka. Dziękuję za inspirowanie i wskazywanie drogi, za wsparcie merytoryczne i techniczne. Chciałabym podkreślić, że za wszelkie błędy i niedociągnięcia tej pracy ponoszę wyłączną odpowiedzialność.

Niniejsza monografia powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr. H2011/01/B/HS2/01293, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

1.

Wprowadzenie

*[...] the unique value of simulation
as a third way of doing science,
in contrast to both induction and deduction*

Robert Axelrod

Rozdział ten prezentuje ogólną charakterystykę dziedziny ewolucji języka wraz z przykładami wykorzystania w niej pojęć i metod biologii ewolucyjnej. Bardziej szczegółowo omówiono selekcyjnistyczne ujęcie ewolucji języka i różne proponowane w jego ramach scenariusze. Wskazano argumenty przeciw tak zwanej mocnej hipotezie natywistycznej, jak również te przemawiające za rozwinięciem badań z zakresu ewolucji kulturowej. Przedstawiono koncepcję języka jako złożonego systemu adaptacyjnego, który podlega zasadom selekcji i samoorganizacji, po czym wykazano potrzebę i zasadność stosowania modelowania komputerowego w tej dziedzinie nauki, zwłaszcza w świetle powyższego stanowiska. Następnie w oparciu o klasyfikacje proponowane przez różnych autorów zaprezentowane zostały podstawowe techniki i metody modelowania stosowane w lingwistyce ewolucyjnej.

1.1. Lingwistyka ewolucyjna

Od wieków szukamy odpowiedzi na pytania, dlaczego tylko ludzie posługują się językiem, jak język powstał i dalej się przekształcał, dlaczego wreszcie przyjął taką, a nie inną formę. I przez prawie cały ten czas były to dość jałowe rozważania i dywagacje, z konieczności czysto teoretyczne i wysoce spekulatywne – nieweryfikowalne i niefalsyfikowalne opowieści. Dopiero w XX wieku nauka zgromadziła dostateczne siły i środki, żeby zmierzyć się z tym doniosłym problemem. W ostatnim ćwierćwieczu także w naukach humanistycznych i społecznych zaczęto stosować nową metodologię, zaczerpniętą z biologicznej teorii ewolucji, która od czasów Darwina bardzo mocno się już rozwinęła, okrzepła i ugruntowała swoją pozycję na podstawie wypracowanych ściśle naukowych metod i procedur. Założenie, że nasze poznanie, język i kultura w ogólności, czy też ich poszczególne składowe, wyłoniły się w wyniku działania procesów ewolucyjnych, prowadzi do pojawienia się nowych interdyscyplinarnych dziedzin badawczych, takich jak: psychologia ewolucyjna, socjobiologia, ewolucyjna antropologia, ekonomia ewolucyjna i innych, w których bada się problemy psychologii, socjologii, antropologii itd., stosując aparat pojęciowy oraz mechanizmy i procesy znane z teorii ewolucji biologicznej. Prace badawcze dotyczące języka również można i należy prowadzić (między innymi) w ramach paradygmatu ewolucyjnego, i właśnie dzięki jego zastosowaniu jesteśmy ostatnio świadkami tak szybkiego postępu w badaniach nad powstaniem i rozwojem języka.

To nowe pole badawcze niektórzy autorzy określają mianem lingwistyki ewolucyjnej, inni zaś rezerwują ten termin dla pewnego istotnego nurtu nowej dziedziny, zwanej wówczas ogólnie **ewolucją języka** [Żywczyński, Wacewicz 2015, s. 130]. W badaniach nad pochodzeniem i rozwojem języka wyróżnić możemy bowiem dwie podstawowe płaszczyzny, na których są one prowadzone. Po pierwsze, dotyczą one naszej biologicznej zdolności językowej, czyli zdolności do nabywania i używania języka, co obejmuje zarówno funkcje odpowiednich organów anatomicznych, jak i funkcje kognitywne niezbędne dla przetwarzania języka. Nie tylko studiuje się tu rozwój mózgu czy narządów mowy, jak też genom człowieka, ale rozważa się także kwestie, czy i dlaczego, albo do jakiego stopnia, zdolność językowa jest unikatowa dla człowieka, jak się

rozwijająca w naszym gatunku (w szczególności w porównaniu do innych naczelnych), czy ta zdolność wyłoniła się jako specyficznie językowa czy też wywodzi się z innych, bardziej ogólnych umiejętności kognitywnych (i powstała na przykład jako egzaptacja, czyli w ewolucyjnym procesie przysposabiania istniejących struktur do nowych funkcji), a także jaka była rola czynników funkcjonalnych w kształtowaniu mechanizmów przetwarzania języka. W związku z tym do podstawowych celów tych badań należy ustalenie: wyjściowego potencjału kognitywnego człowiekowatych, możliwych stadiów rozwoju ich zdolności językowej, prawdopodobnych scenariuszy ewolucyjnych, presji selekcyjnych i ewentualnych (funkcjonalnych czy fizycznych) ograniczeń kształtujących rozwój tejże zdolności [Waciewicz 2013, s. 12]. Aby uniknąć, czy też możliwie maksymalnie ograniczyć, spekulatywny charakter udzielanych odpowiedzi, trzeba tu przyjąć multiinterdyscyplinarną perspektywę i wykorzystywać empiryczne wyniki z rozmaitych innych niż lingwistyka dziedzin: anatomii, zoologii, biologii ewolucyjnej, genetyki, archeologii, paleoantropologii, psychologii ewolucyjnej, kognitywistyki czy neuronauk.

Po drugie natomiast, omawiane badania dotyczą języka jako systemu i procesu wyłaniania się jego struktury – i do takich właśnie będziemy dalej odnosić termin **lingwistyka ewolucyjna** (odnotowując jeszcze, że stosowany jest tu także termin „ewolucja języków”, który wydaje się co prawda adekwatny, ale słabo odróżnialny od „ewolucji języka”). Najogólniej biorąc, lingwistyka ewolucyjna zajmuje się językami indywidualnymi (idiolektami, czyli językami swoistymi dla użytkowników) oraz językami wspólnotowymi (językami wspólnot komunikacyjnych: socjolektami, etnolektami, ewolektami), które powstają w wyniku wzajemnego oddziaływania indywidualnych zachowań językowych członków danej populacji. Język wspólnoty to jakby ekstrapolacja poszczególnych idiolektów, mająca za podstawę to, co ich użytkownicy są na ogół w stanie z powodzeniem zakomunikować pozostałym członkom wspólnoty; jest to, można powiedzieć, konsensus idiolektów wyłaniający się z ich użycia w populacji, zaś idiolekty tworzą się na podstawie tego języka wspólnotowego, do którego mają dostęp indywidualni użytkownicy (naturalnie w oparciu o wrodzoną im zdolność językową) [Gong *et al.* 2014a, s. 244]. Lingwistyka ewolucyjna zajmuje się więc na przykład zagadnieniem kontaktu (między)językowego

i jego efektów, czyli interferencji i wzajemnych wpływów języków (indywidualnych lub wspólnotowych), w sytuacji gdy różne wspólnoty komunikacyjne pozostają ze sobą w jakiejś dłuższej styczności; ponadto zajmuje się też transmisją kulturową języka, czyli procesem, w którym zachowania językowe w danej populacji utrzymują się z biegiem czasu dzięki przekazywaniu ich pomiędzy użytkownikami języka za pomocą mechanizmów indywidualnego uczenia się i użycia języka; i wreszcie zajmuje się strukturą i własnościami języków w kontekście ich ewolucyjnego wyłaniania się (badając na przykład, jak i dlaczego pojawiły się takie cechy języka, jak kompozycyjność, regularność czy uniwersalia językowe). Możemy więc ogólnie powiedzieć, że w lingwistyce ewolucyjnej studiuje się mechanizmy kulturowej ewolucji kodu komunikacyjnego, rozważając zarówno problem powstania języka (czyli procesu przejścia od prelingwistycznego systemu komunikacji do lingwistycznego, z językami w znanej nam formie), jak również kwestię dalszego jego rozwoju (co wymaga analizy dynamiki ewolucji języków i możliwych trajektorii zmian językowych oraz wpływu różnych czynników na przebieg tej ewolucji). Choć lingwistyka ewolucyjna korzysta z wyników innych lingwistycznych dyscyplin (językoznawstwa historycznego, porównawczego, typologii języków, socjolingwistyki czy psycholingwistyki), należy ją od nich zdecydowanie odróżnić; na pewno nie jest to nauka o charakterze opisowym (idiograficznym), a w swoich rozważaniach przyjmuje znacznie dłuższą (ewolucyjną) perspektywę czasową niż na przykład językoznawstwo diachroniczne, które wprawdzie też bada zmiany w języku, ale tylko te o charakterze nieewolucyjnym (historycznym) i w oparciu o faktyczne dane językowe dotyczące konkretnych języków czy ich rodzin – podczas gdy hipotezy i teorie rozważane w lingwistyce ewolucyjnej, czy w ogóle w dziedzinie ewolucji języka, mają znacznie ogólniejszy charakter i opierają się na syntezie danych z innych dyscyplin [Wacewicz 2013, s. 11].

Omówimy teraz (za [Croft 2008]) kilka przykładów pokazujących, jak można kluczowe pojęcia i metody biologii ewolucyjnej wykorzystać w lingwistyce, a konkretnie w badaniach dotyczących zagadnienia zmian językowych oraz rekonstrukcji drzew filogenetycznych rodzin językowych (pomijając tutaj kwestię powstania języka). Roger Lass czy Juliette Blevins odwołują się w swoich teoriach do pewnych analogii czy metafor ewolucyjnych. Lass używa w ramach językoznawstwa hi-

storycznego koncepcji egzaptacji, zmodyfikowanej tak, że odnosi się do struktur lingwistycznych, które przestały pełnić swoją zasadniczą funkcję, ale znalazły inne zastosowanie. Blevins zaś w swojej teorii ewolucyjnej fonologii wykorzystuje pojęcia dziedziczenia (poprzez uczenie się przez dziecko języka dorosłych), zmienności (w wyniku błędów w „odtwarzaniu” przez słuchacza tego, co usłyszał od mówcy) i wreszcie naturalnej selekcji (na skutek różnic w prawdopodobieństwie zachodzenia różnych zmian fonetycznych w określonych kontekstach). Blevins sama jednak przyznaje, że ewolucyjność w zaproponowanym przez nią ujęciu zmian fonetycznych może być rozumiana jedynie metaforycznie. Inni lingwiści z lepszym skutkiem stosują aparat pojęciowy uogólnionego darwinizmu w wersji Richarda Dawkinsa czy Davida L. Hulla. Przyjmuje się tu, że zmiany ewolucyjne następują w procesie dwuetapowym: najpierw w wyniku replikacji generowane są zróżnicowane warianty, które następnie podlegają selekcji. Pojęcie replikatora (jednostki kopiowanej), takiej jak gen w biologii, może zostać uogólnione i zastosowane w innych dziedzinach – na przykład w ewolucji kulturowej byłby to zaproponowany przez Dawkinsa [1976] mem. Podobnie jak organizm traktowany jest jako zaledwie nosiciel genów, tak umysł (albo mózg) jest nosicielem memów. W tym modelu geny/memy porównuje się do pasożytów, które wykorzystują swojego gospodarza do replikacji. I właśnie w duchu memetyki Nikolaus Ritt proponuje swój model „samolubnych dźwięków” (analogia do samolubnych genów Dawkinsa). Fonemy, morfemy, wzorce fonotaktyczne itp., a ściślej ich pojęciowe reprezentacje, to memy, które mówiąc, replikujemy (imitujemy), a ich warianty pojawiają się w wyniku błędnego ich odtwarzania (imitacji). Ritt proponuje też kilka możliwych wersji mechanizmu odpowiedzialnego za selekcję wariantów, czyli presji selekcyjnej.

Z kolei David L. Hull traktuje organizm jako interaktora, czyli jednostkę, która wchodzi w interakcje ze środowiskiem, a przez to wpływa na selekcję – a więc nie jest to tylko bierny nosiciel genów, lecz aktywny uczestnik procesu. Notabene, interesująca jest prezentowana przez Hulla interpretacja rozwoju nauki jako procesu ewolucyjnego, w którym replikatorami są naukowe pojęcia i teorie, a interaktorami naukowcy, mogący wpływać na ich replikację i selekcję poprzez publikowanie czy wykładanie. Tego rodzaju model został zaadaptowany w lingwistyce przez Williama Crofta. Wprowadza on pojęcie lingwemu (jako

replikatora), czyli elementu struktury lingwistycznej w wypowiedziach produkowanych przez mówców, pełniących tu rolę interaktorów – powielających lingwemy w mowie, a generujących warianty w produkcji i rozumieniu wypowiedzi. W modelu Crofta struktury lingwistyczne ewoluują więc nie poprzez nabywanie języka, lecz przez jego użycie. Z kolei Salikoko S. Mufwene traktuje języki jako gatunki, a w swoim modelu koncentruje się na pojęciu ekologii i zależnościach środowiskowych. Pozwala mu to na przykład wyjaśnić powstawanie kreoli albo też wyłanianie się języków romańskich z łaciny jako rezultat selekcji w określonych społeczno-ekonomiczno-językowych środowiskach. Croft podsumowuje te i inne ewolucyjne teorie zmian językowych jako najpoważniejszą konkurencję dla modeli opartych na gramatyce wrodzonej, tworzonych przez zwolenników teorii Chomsky’ego, takich jak na przykład David W. Lightfoot.

Metody znane z biologii ewolucyjnej, a w szczególności tak zwaną rekonstrukcję filogenetyczną, można też stosować w ramach lingwistyki historyczno-porównawczej, a ściślej **lingwistyki genetycznej**. Dotyczy to wykorzystania odpowiednich kwantytatywnych technik do konstruowania rodzin językowych i ich dalszej klasyfikacji na podgrupy, podobnie jak czyni się w kladystyce (gdzie kład to zbiór organizmów mających wspólnego przodka). Joseph H. Greenberg i Roger Lass wskazują na istotne podobieństwa metody porównawczej stosowanej dotychczas przez lingwistów oraz metody rekonstrukcji filogenetycznej (między innymi w obu przypadkach klasyfikacja jest w formie „drzewa rozrodu”, choć dopuszcza się też lokalnie struktury sieciowe, na przykład, gdy w grę wchodzi mieszanie się dialektów lub hybrydyzacja blisko spokrewnionych gatunków; ponadto w obu sytuacjach ważną rolę diagnostyczną odgrywają innowacje wspólne dla porównywanych taksonów). Te i inne korespondujące cechy sprawiają, że oczywiście po niezbędnych modyfikacjach, algorytmy używane w biologicznej rekonstrukcji filogenetycznej mogą być stosowane również do tworzenia drzew pokrewieństwa języków, z tą tylko różnicą, że zamiast porównywania genów i analizowania sekwencji zachodzących w nich mutacji bada się zestawy kognatów (wyrazów pokrewnych z różnych języków) i śledzi się zmiany zachodzące w nich z upływem czasu. Jedną z zaadaptowanych z biologii technik jest na przykład metoda dopasowania sekwencji (w badaniach genetycznych – nukleotydów czy aminokwa-

sów, zaś w lingwistycznych – fonemów), których elementy mogą podlegać usuwaniu, wstawianiu, zamianie, czy też innym zmianom w rodzaju dołączania „afiksów”. Najprostsze techniki polegają tu na minimalizacji odległości Levenshteina, jako analogu odległości genetycznej [Serva, Petroni 2008], bardziej złożone wykorzystują na przykład tak zwane ukryte modele Markowa. Natomiast w odniesieniu do samej filogenezy stosować można metody oparte na ogólnej odległości językowej (leksykostatystyczne) lub na cechach. Te ostatnie są ściślej związane z kladystyką, gdzie używa się algorytmów największej parsymonii, kompatybilności, bootstrapu czy bayesowskich. Przykładowo, jedną z najnowszych konstrukcji drzewa pokrewieństwa języków świata, obejmującego ich aż około sześciu tysięcy, opracowaną tego rodzaju metodami, prezentują Gerhard Jäger i Søren Wichmann [2016]. Natomiast w referowanej pracy [Croft 2008, s. 229–230] autor omawia jeszcze wiele innych ciekawych tego typu wyników, przedstawiając więcej szczegółowych danych uzyskanych zwłaszcza dla rodzin indoeuropejskiej, bantu i austronezyjskiej, oraz wskazuje na możliwość ich wykorzystania w badaniach prehistorycznej demografii człowieka.

1.2. Ewolucja języka

W następnych podrozdziałach przedstawione są bardziej szczegółowe zagadnienia z zakresu lingwistyki ewolucyjnej, a ściślej rzecz biorąc, modelowania komputerowego w tejże dziedzinie. Przedtem jednak wypada tu jeszcze omówić, z konieczności skrótowo i wybiórczo, problematykę ewolucji języka na płaszczyźnie biologicznej, a w szczególności jej ujęcie **selekcjonistyczne** (głównie w oparciu o krytyczne opracowanie Nathalie Gontier [2012]). Przyjmując w jakiejś dyscyplinie, na przykład w ewolucji języka, metodologię zaczerpniętą z biologicznej teorii ewolucji, zakłada się, że dany problem badawczy można wyjaśnić jako wynik działania procesów ewolucyjnych i przy użyciu specyficznych dla teorii ewolucji pojęć, zasad, koncepcji i mechanizmów. Podejście neodarwinowskie, czy inaczej współczesna synteza ewolucyjna, opiera się – jak wiadomo – na procesie selekcji naturalnej. Badacze ewolucji języka inspirowani tym podejściem przyjmują więc za punkt wyjścia swoich badań założenie, że język wyewoluował właśnie dzięki doborowi natu-

ralnemu. Znając już wówczas zasadniczy mechanizm ewolucji języka, nie stawiają jako główny problem badawczy pytania: jak język ewoluował, lecz raczej: dlaczego, jakie były tego przyczyny, jakie impulsy i czynniki do tego doprowadziły, co napędzało mechanizm ewolucyjny. Identyfikując funkcjonalne i adaptacyjne korzyści, jakie zapewnia język, próbują określić, jakiego rodzaju naciskom selekcyjnym poddawała nas ewolucja, a więc ustalić właśnie, jakie były źródła ewolucji języka.

Przyjmuje się zwykle, że ewolucja języka jako samodzielna dziedzina badawcza wyłoniła się w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku, a za publikację, która zapoczątkowała ten proces, uważa się słynny artykuł Stevena Pinkera i Paula Blooma [1990] pt. *Natural language and natural selection*. Autorzy ci jako pierwsi wyrazili pogląd, że tylko podejście ewolucyjne może nas doprowadzić do wyjaśnienia kwestii powstania i rozwoju języka, a badania nad tym problemem winny być prowadzone w ramach paradygmatu neodarwinowskiego, czyli selekcjonistycznego. Ich podejście pozostaje więc w opozycji nie tylko do klasycznych, to jest synchronicznych i diachronicznych (historycznych) badań języka, ale także do stanowisk biolingwistów czy behawiorystów.

Pinker i Bloom odrzucają (popieraną z kolei przez Noama Chomsky'ego) hipotezę paleontologa Stephena J. Goulda, że język jest przykładem **egzaptacji**, czyli jakby produktem ubocznym ewolucji, pojawiającym się przy okazji selekcjonistycznego wykształcenia się odmiennych funkcjonalnie, złożonych form, które dopiero następnie stopniowo przysposobiły się do pełnienia nowych funkcji [Gould 1987]. Zjawisko to różni się od procesu **adaptacji**, w którym nowy narząd czy funkcjonalność wykształcają się bezpośrednio jako przystosowanie do środowiska. Z kolei według biologa ewolucyjnego Richarda Dawkinsa [1976; 1986] pochodzenie złożonych mechanizmów naturalnych można wyjaśnić jedynie poprzez procesy adaptacji i selekcji. Niewątpliwie język wykazuje cechy złożoności, stąd Pinker i Bloom przyjmują, że nasza zdolność językowa jest wrodzona, a odpowiada za nią specyficzny moduł mózgowy, który wyłonił się właśnie jako cecha adaptatywna. Cechy adaptatywne muszą być korzystne dla przeżycia lub reprodukcji organizmu. Jakie więc korzyści język zapewnia jego użytkownikom? Odpowiedź na to pytanie pomogłaby określić, jakiego rodzaju naciski

selekcyjne doprowadziły do powstania i rozwoju języka; inaczej mówiąc, próbuje się tu ustalić, dlaczego język wyewoluował.

Proponuje się różne możliwości rozwiązania tego problemu. Najczęściej przyjmuje się, że nasza biologiczna zdolność do nabywania i uczenia się języka (ang. *faculty of language*), albo też nasz nabywany i wewnętrznie reprezentowany system wiedzy językowej (tak zwany język wewnętrzny – *I-language* w ujęciu Chomsky’ego) wyewoluował jako **system komunikacji**, zapewniający członkom wspólnot komunikatywnych lepsze porozumienie i transfer informacji. Inaczej mówiąc, uznaje się, że to udoskonalone umiejętności komunikacyjne są (czy były) korzystne dla przeżycia i/lub reprodukcji ludzi (czy hominidów). Lingwiści ewolucyjni, podkreślając biologiczne i filogenetyczne źródła rozwoju języka, różnią się w tym punkcie zarówno od tych językoznawców, którzy uważają język za abstrakcyjny system, będący środkiem wyrażania sądów, jak też od behawiorystów, dla których język jest jedynie efektem kulturowego wyuczenia i wychowania społecznego.

Niemniej lingwiści ewolucyjni badają również rozwój języków na poziomie kulturowym, próbując stosować pojęcia i mechanizmy ewolucyjne do analizy zmian wewnątrzjęzykowych, jak też geodemograficznego i historycznego zróżnicowania i rozprzestrzeniania się języków (por. podrozdział 1.1); tak samo badany może być również tak zwany język zewnętrzny – *E-language* w terminologii Chomsky’ego. Niektórzy badacze odwołują się w tym celu do formułowanej już w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku hipotezy koewolucji biologicznej i kulturowej, wykorzystując pojęcie memu (wprowadzone przez Dawkinsa [1976]) jako kulturowego analogu genu, ewentualnie proponując nowe, jak na przykład lingwem [Croft 2000], czy też podobne odpowiedniki replikatorów, interaktorów itd. Do lingwistów historycznych, którzy w ramach podejścia selekcyjnego i adaptacyjnego starają się modelować społeczno-kulturowy rozwój języków, zaliczyć można między innymi wspomnianego już Williama Crofta, Nikolausa Ritta czy Saliko S. Mufwene. Jak jednak zauważa Gontier [2012, s. 70], poszukiwanie kulturowych analogów genów czy innych ewolucyjnych konceptów nie jest reprezentatywnym nurtem badań w dziedzinie ewolucji języka.

Z kolei lingwiści ewolucyjni wykorzystujący modelowanie komputerowe w większości przyjmują, że języki to **złożone systemy adaptacyjne** (na przykład [Steels 2000a; Cangelosi, Parisi 2002b; Ellis,

Larsen-Freeman 2009; Kirby 2012]; zob. też podrozdział 1.3). Zatem, inaczej niż Pinker i Bloom, nie traktują selekcji naturalnej jako jedynego motoru ewolucji języka, lecz dodatkowo uwzględniają podejście teorisystemowe, zgodnie z którym języki, stanowiąc układy otwarte, dynamiczne i adaptacyjne, same ewoluują jako systemy i podlegają selekcji niezależnej od biologicznej.

Niektórzy badacze polemizują jednak z podejściem selekcyonistycznym i adaptacyjnym. Za głównego przeciwnika tych teorii uważa się Noama Chomsky'ego – od [Chomsky 1968] po [Bolhuis *et al.* 2014] – a popierają go między innymi lingwiści Massimo Piattelli-Palmarini, Robert C. Berwick czy Cedric Boeckx, a także ewolucjonista Stephen J. Gould i zoopsycholog David Premack. Chomsky, a wraz z nim pozostali **biolingwiści**, uważają język za jedną z naszych genetycznie dziedziczonych zdolności poznawczych o neuronowym substracie, której podstawowe własności i zasady wynikają w pewien sposób z samych praw natury, zaś program jej ontogenetycznego rozwoju mamy zakodowany w genach. Zdolność językowa to specyficzny abstrakcyjny system obliczeniowy, realizowany przez wyspecjalizowany moduł mózgowy, czyli organ językowy. Jednakże według Chomsky'ego organ ten nie wyewoluował jako adaptacja, a więc nie jest efektem działania selekcji naturalnej, lecz innych mechanizmów ewolucyjnych; jest być może egzaptacją, a mógł się pojawić choćby jako skutek uboczny wzrostu wielkości mózgu, czy jako konsekwencja działania jeszcze nieznanых nam praw dotyczących rozwoju takich złożonych struktur. Ponadto język człowieka tak dalece różni się jakościowo od systemów komunikacji zwierząt, że na pewno nie stanowi ich naturalnej kontynuacji rozwojowej; w toku ewolucji musiał pojawić się nagle, być może w wyniku jednej, wyjątkowo korzystnej makromutacji – jak kryształ wytrącający się gwałtownie w przesyconym roztworze, gdy tylko znajdzie się w nim jakiś zarodek krystalizacji (a mogłaby nim stać się pojawiająca się raptem zdolność do wykonywania operacji Merge) [Chomsky 2005]. Chomsky nie jest więc zwolennikiem gradualizmu, zgodnie z którym zmiany ewolucyjne postępują powoli i stopniowo, lecz saltacjonizmu, który postuluje ich skokowy charakter.

A jednak w opublikowanym w „Science” artykule, autorstwa Marca Hausera, Noama Chomsky'ego i W. Tecumseha Fitcha [2002], to antyadaptacyjne stanowisko zostaje wyraźnie stonowane. Autorzy wpro-

wadzają tu bowiem rozróżnienie na szeroko i wąsko rozumianą zdolność językową. **Szeroko rozumiana zdolność językowa** obejmuje wszelkie układy powiązane z językiem, a więc oprócz języka w wąskim sensie także niezbędny system sensomotoryczny i system pojęciowo-intencyjny. Elementy tych dwóch systemów występują już u niektórych zwierząt, a ich powstanie i rozwój dają się wyjaśnić na gruncie biologii ewolucyjnej, psychologii ewolucyjnej i neuronauk. Natomiast **wąsko rozumiana zdolność językowa** to jest nasze językowe „centrum obliczeniowe”, pozwalające na łączenie prostszych elementów w większe, hierarchicznie ustrukturyzowane, złożone składniki. Zdolność językowa w wąskim sensie, czyli nasz „procesor składniowy”, obejmuje ten najważniejszy komponent, który zdaniem autorów odróżnia język ludzi od systemów komunikacyjnych zwierząt i który sprawia, że nasz język jest tak wyjątkowy i jedyny w swoim rodzaju – a mianowicie **rekursję**. To właśnie ten mechanizm nadaje językowi tę jego unikalną cechę „dyskretnej nieskończoności”, czyli możliwość nieograniczonego łączenia dyskretnych elementów w większe całości, zapewniając nam w ten sposób produktywność języka. I to właśnie rekursja, inaczej niż pozostałe elementy naszej szeroko rozumianej zdolności językowej, rozwinęła się według autorów w sposób nioselekcjonistyczny. Zatem Chomsky, przynajmniej do pewnego stopnia, rewiduje tu swoje wcześniejsze twierdzenia o zupełnym braku ciągłości między językiem naturalnym a komunikacją zwierząt.

Prowadzone wciąż jeszcze badania z perspektywy biolingwistycznej nie należą jednak do głównego nurtu lingwistyki ewolucyjnej, w którym dominują zwolennicy adaptacyjnego charakteru języka. W ramach tego podejścia, a więc przy założeniu, że język ewoluował w wyniku selekcji naturalnej, szuka się przede wszystkim potencjalnych **nacisków selekcyjnych**, które mogły tę ewolucję wywołać i ukierunkować. W tym celu próbuje się ustalić, „po co” język się rozwinął, a więc jakie zapewniał nam korzyści dla przeżycia i reprodukcji. Odpowiedź na to pytanie wymaga badania języka pod kątem funkcji, jakie może on pełnić, stąd podejście selekcjonistyczne określa się także jako podejście **funkcjonalne**. Dodajmy, że rozważania te prowadzi się przy założeniu uniformitarianizmu, czyli hipotezy, że w przeszłości działały te same czynniki i prawa, które znamy obecnie, co pozwala na podstawie współczesnych obserwacji odtwarzać przebieg dawnych procesów. Zakładając więc, że

niegdyś język pełnił te same funkcje, które mu obecnie przypisujemy, staramy się zrekonstruować proces powstania takiego właśnie wyniku, a w szczególności presję selekcyjną, działającą na naszych dalekich przodków, która mogła do tego prowadzić. Sformułowano już wiele różnych hipotez na temat możliwych źródeł owych nacisków selekcyjnych, a tym samym ewentualnych przyczyn, które mogły spowodować wyłonienie się i dalszy rozwój języka. Nathalie Gontier [2012, s. 73] wyróżnia wśród tych rozmaitych propozycji pięć ich głównych kategorii, odpowiadających odmiennym typom presji selekcyjnej, zwanym przez nią: (naciskiem) politycznym, makiawelicznym, społecznym, kulturowym i symbolicznym. Poszczególne hipotezy odwołują się do odmiennych aspektów i funkcji języka, podkreślając w różnym stopniu ich wagę i rolę, jaką mogły pełnić w procesie powstania i ewolucji języka. Często przyjmuje się jednak, że tak jak język ma różnorodne cechy i pełni rozmaite funkcje, tak i w jego powstaniu i rozwoju prawdopodobnie nie odgrywał głównej roli tylko jeden z wyżej wymienionych czynników, lecz była to raczej jakaś ich kombinacja.

Rozważania dotyczące powstania języka odwołują się między innymi do wyników badań archeologicznych i paleoantropologicznych, związanych z rozwojem gatunku ludzkiego, a w szczególności dotyczących kształtowania się jego współczesnej anatomii (na przykład kwestii obniżenia krtani, rozwoju mózgu itd.) oraz behawioru i kultury (wytwarzanie narzędzi, osiadły tryb życia, formowanie się struktur społecznych). Rezultaty tych badań są świadectwem pojawienia się pewnych specyficznych, kognitywnych i symbolicznych możliwości, wykształcających się stopniowo w toku rozwoju hominidów w ogólności oraz człowieka w szczególności. Tego rodzaju informacje mogą też pośrednio świadczyć o występowaniu (lub nie) pewnych choćby elementów zdolności językowej. Zdaniem niektórych badaczy wytwarzanie narzędzi zapoczątkowało procesy podziału pracy, hierarchizacji i formowania się coraz bardziej złożonych struktur społecznych. Sprawne funkcjonowanie tych zróżnicowanych grup i efektywne współdziałanie ich członków wymagało efektywnej komunikacji. Tego rodzaju rozważania prowadzą do hipotez dotyczących nacisków selekcyjnych, które Gontier określa jako **polityczne**, włączając zarazem do tejże kategorii także koncepcje wiążące rozwój naszej zdolności językowej z rozwinięciem się zdolności neurologicznych i kognitywnych, niezbędnych do wytwarzania narzędzi

(szersze omówienie argumentów za i przeciw takim tezom znajdziemy u Gontier [2012, s. 73–76]).

Pewnego rodzaju struktury społeczne mogą się wyłaniać między innymi w wyniku stosowania tak zwanych strategii **makiawelicznych** (obserwowanych także u szympanсів i bonobo), których użycie wymaga monitorowania statusu własnego oraz innych osobników, jak też aktywnego działania na rzecz owego statusu (na przykład poprzez zawieranie koalicji czy wzajemną wymianę usług). Tego rodzaju aktywność z kolei wymaga dysponowania tak zwaną teorią umysłu (ang. *Theory of Mind*), czyli zdolnością rozumienia tego, że inni również posiadają pewną wiedzę, uczucia czy intencje. Badania nad szympanсами i bonobo wskazują, że można im przypisać intencjonalność trzeciego rzędu (wiedzą, że ktoś wie, że one coś wiedzą), podczas gdy ludziom – rzędu piątego. Teorię umysłu i strategię makiaweliczną niektórzy autorzy uważają za ważne preadaptacje niezbędne do rozwoju języka, albo nawet za główny stymulator tego procesu.

Z kolei **społeczną** presję selekcyjną na rozwój języka wywierać mogły wszelkiego rodzaju strategie stosowane przez jednostki żyjące gromadnie, takie jak dzielenie się (lub nie) pożywieniem, udział w zespołowych polowaniach, wzajemne iskanie, walka o dominację, a w szczególności strategie altruistyczne, pozwalające według niektórych badaczy lepiej funkcjonować w coraz większych i bardziej złożonych grupach, co z kolei mogło być źródłem nacisku selekcyjnego w kierunku rozwoju efektywniejszych strategii komunikacyjnych. Zauważmy, że sprawna wymiana informacji wymaga od nadawcy altruistycznego dzielenia się posiadaną wiedzą, a od odbiorcy – zaufania i wiary w prawdziwość przekazywanych mu danych. Przykładowo, Robin Dunbar [2009] uważa, że to właśnie rosnące naciski społeczne, wynikające z życia w coraz większych grupach o złożonej strukturze, wywołały przejście od iskania „ręcznego” do „wokalnego”. Iskanie natomiast, obok na przykład zabawy czy okazywania troski i współczucia, to jedna z form kontaktów interpersonalnych, będących u hominidów narzędziem budowania sojuszy, jak też mechanizmem łagodzenia agresji. Oczywiście także i to wyjaśnienie ma odpowiedzieć na pytanie, „po co” język wyewoluował, a nie w jaki sposób to nastąpiło. W każdym razie w tym przypadku rozwój umiejętności językowych wiąże się z takimi zmianami w życiu stadnym, które przekształciły stopniowo niszę ekologiczną w niszę

społeczną, do której adaptacja niejako wymusiła i pociągnęła za sobą ewolucję języka.

Inny jeszcze rodzaj branych pod uwagę nacisków selekcyjnych związany jest z **kulturowym** funkcjonowaniem wspólnot. Jako ewentualne źródła presji selekcyjnej wymienia się tu między innymi strategie uczenia się, wywołujące na przykład tak zwany efekt zapadki [Tomasello 2002], efekt Baldwina [Deacon 1997], procesy imitacji [Arbib 2002] czy mimezy (rozumianej jako zdolność niesymbolicznej komunikacji umożliwiającej społeczne współdziałanie) [Donald 2005], albo nawet rytuały [Knight 1998]. Z kolei opierając się na koncepcjach memetyki, bada się mechanizmy wiarygodnej transmisji kulturowej (tu w szczególności przekazu języka), zwłaszcza poprzez imitację. W tym kontekście szeroko dyskutuje się kwestię tak zwanych neuronów lustrzanych i ich działania, które być może zapewnia nie tylko samą imitację, ale także empatię i dalej mimezę (jako niejęzykowe reprezentowanie znaczeń za pomocą własnego ciała – a zarazem rozumienie, że inni również to robią), co wreszcie toruje drogę tak produkcji, jak i świadomemu odbiorowi symboli. Wciąż jednak dyskusyjnym pozostaje, czy to rozwój kulturowy pociągał za sobą rozwój języka, czy też działo się raczej odwrotnie, czy może jednak była to symultaniczna koewolucja obu procesów (co wydaje się chyba najtrafniejszą propozycją).

Ostatnia z wyżej wymienionych kategorii możliwych nacisków selekcyjnych to naciski **symboliczne**, czyli związane z ogólną zdolnością do symbolizowania oraz rosnącą liczbą stosowanych symboli. Charakterystyczne dla języka jest użycie arbitralnych, wyuczonych symboli oraz rekursywnej, kompozycjonalnej syntaksy. Wielu badaczy opowiada się za ewolucyjną ciągłością pomiędzy używaniem symboli przez ludzi, a wokalnymi lub gesturalnymi aktami komunikacji innych naczelnych (z czym z kolei nie zgadza się na przykład Derek Bickerton [2007]). Są wśród nich zwolennicy hipotez zarówno o wokalnej, jak i o gesturalnej modalności, w której wyłonił się nasz język. Wyczerpujące omówienie tej tematyki znajdziemy w książce Żywiczyńskiego i Wacewicza [2015], w której proponowana jest także perspektywa multimodalna, czyli jednoczesnego udziału obu modalności w ewolucji języka; z kolei w kontekście modelowania komputerowego multimodalność jest dyskutowana przez Grifoni *et al.* [2016]. Dalej, według jednych koncepcji słownik języka i jego gramatyka koewoluowały [Fitch 2000], zaś we-

dług innych protojęzyk był pozbawionym syntaksy zbiorem symboli, czyli właściwie protoleksykonem. Przejście od niego do pełnego języka mogło następować kompozycyjnie (syntetycznie) albo segmentacyjnie (analitycznie). W ujęciu pierwszym elementami protoleksykonu były słowa, oznaczające na przykład obiekty lub czynności, które stopniowo były rozmaicie ze sobą zestawiane w większe struktury i w ten oddolny sposób sukcesywnie wyłaniała się syntaksa [Bickerton 2000]. Natomiast według drugiego podejścia, zwanego też holistycznym, protojęzyk zawierał raczej holofrazy, wyrażające kompletne komunikaty (na przykład rozkazy, groźby, ostrzeżenia itp.), które dopiero z czasem ulegały dekompozycji na mniejsze elementy, przez co syntaksa wyłaniała się odgórnie [Wray 1998].

Z kolei koncepcje Terrence'a Deacona [1997] łączą naciski społeczne i symboliczne. Według niego powstanie języka wymagało **podwójnego dziedziczenia** – i biologicznego, i kulturowego. Z jednej strony bowiem potrzebny był do tego odpowiedni stopień rozwoju kory mózgowej (kory nowej, a przede wszystkim przedczołowej), który pozwolił na wykształcenie się naszych umiejętności symbolicznych. Z drugiej zaś strony niezbędna też była transmisja kulturowa, pozwalająca na wiarygodny przekaz arbitralnych symboli poprzez mechanizm uczenia się. Umiejętność tworzenia i posługiwania się symbolami, charakterystyczna dla naszego gatunku (*Homo symbolicus*, według określenia Deacona), leży u podstaw naszej kultury i umożliwia jej rozwój. Ewolucja kulturowa z kolei może wpływać na biologiczną poprzez tak zwany efekt Baldwina (por. podrozdział 3.5), czyli w wyniku wytwarzania specyficznej niszy ekologicznej, ukierunkowującej asymilację genetyczną.

Każda z wyżej wymienionych hipotez dotyczących różnego rodzaju nacisków selekcyjnych ma swoje mocne, jak również słabe punkty; wydaje się też, że żadna z nich samodzielnie nie wystarcza dla wyjaśnienia kwestii powstania i ewolucji języka, a w każdym razie nie tłumaczy wyłonienia się jako adaptacji tych wszystkich różnorodnych elementów istotnych dla ukształtowania się zdolności językowej człowieka (wliczając wspomniane tu wcześniej, choć zapewne nie jedyne niezbędne, czynniki, takie jak: intencjonalność, teoria umysłu, altruizm odwzajemniony, inteligencja makiaweliczna, imitacja, uczenie się wokalne i gesturalne, konceptualizacja, symbolizacja). Oczywiście na-

leży brać pod uwagę jeszcze inną opcję, a mianowicie połączenie tych wszystkich hipotez w jedną. Jednak, jak twierdzi Gontier [2012, s. 84], teza, że to kombinacja wszystkich możliwych kategorii nacisków selekcyjnych doprowadziła do powstania języka, również nie stanowi właściwego rozwiązania, gdyż przynajmniej pewne aspekty wielu z wyżej wymienionych niezbędnych składowych wykryto już także u pozostałych naczelnych, a nawet innych gatunków. Nawet taka ogólna wersja hipotezy selekcyjnej nie wystarczy więc, aby wyjaśnić, dlaczego język rozwinął się tylko u jednego jedyne gatunku, łącząc w sobie rozmaite elementy (rozwinęte do pewnego stopnia także u innych gatunków) w tak złożony i niepowtarzalny, biologiczno-kulturowy kompleks. Język nie jest homogeniczną strukturą, która wyewoluowała „w celu” przekazywania informacji, zwłaszcza że ich charakter też może być ogromnie zróżnicowany, a niekoniecznie tylko wąsko specjalistyczny. Wydaje się więc bardzo mało prawdopodobne, aby tak różnorodne komponenty języka ewoluowały łącznie pod wpływem tej samej presji selekcyjnej. Należy raczej przyjąć, że owe elementy pojawiały się w toku ewolucji niezależnie i przypuszczalnie w wyniku działania odrębnych rodzajów nacisków. Natomiast pozostaje jeszcze do wyjaśnienia, jak następnie te różne składowe się zintegrowały, tworząc finalnie tak wyjątkowy system.

Zresztą nawet zakładając, że wymienione (czy ewentualnie jeszcze jakieś inne) rodzaje nacisków selekcyjnych wystarczają, aby ustalić, co i dlaczego ewoluowało, to wciąż nie pozwalają one ukazać, jak ten proces przebiegał, co powinno być głównym celem tego rodzaju badań [Gontier 2006a]. Nie wystarcza wskazać funkcji i zadań, które mógł realizować język, czy też ról, które pełnić mogły jego poszczególne komponenty. Niezbędne jest przede wszystkim wyeksplikowanie, w jaki sposób selekcja naturalna (lub być może inny mechanizm ewolucyjny, taki jak dryft genetyczny czy procesy epigenetyczne) działa na dane cechy funkcjonalne, faworyzując te o najwyższej wartości adaptacyjnej. Potrzebne jest objaśnienie konkretnych procesów (opis ich przebiegu i kierujących nimi mechanizmów), w wyniku których poszczególne cechy anatomiczne, neurologiczne czy kognitywne, nieodzowne dla funkcjonowania języka, wyłoniły się w toku ewolucji. Nie można więc przestać na dyskusji, jakie funkcje może pełnić język (czy inaczej, w wyniku jakiego rodzaju presji się wykształcił). Wszystkie te funk-

cje muszą ostatecznie być redukowalne do konkretnych mechanizmów biologicznych (mutacji, rekombinacji, plastyczności fenotypowej itd.).

Odwołując się do aktualnych polemik toczących się tak wśród samych ewolucjonistów, jak i epistemologów ewolucyjnych, Gontier [2012, s. 86] zwraca przede wszystkim uwagę na potrzebę ustalenia konkretnego rodzaju jednostek, na które działa selekcja, oraz kwestię ich (koniecznej?) replikowalności, a także określenia poziomów (takich jak genetyczny, fenotypiczny, środowiskowy), na których może działać ten mechanizm. Ponadto obecnie oprócz selekcji naturalnej wskazuje się na inne jeszcze mechanizmy ewolucyjne, takie jak: dryft genetyczny, transmisja horyzontalna, procesy epigenetyczne, wpływ środowiska na ekspresję genów, złożone sieci powiązań między genami (regulujące wzajemnie ich ekspresję), rozwojowa i fenotypiczna plastyczność, tworzenie nisz, efekt Baldwina, rozwojowa teoria systemów, samoorganizacja systemów, ewolucja neutralna czy genowo-kulturowa koewolucja. Ogólnie rzecz biorąc, w tych nowych podejściach do ewolucji uwzględnia się w znacznie większym stopniu wzajemne powiązania między genami a środowiskiem [Dediu, Christiansen 2016]. Bardziej szczegółową dyskusję owego postulatu, aby na gruncie ewolucji języka zaadaptować wspomniane wyżej koncepcje, a przede wszystkim określić możliwe jednostki, na które na odpowiednich poziomach mogą potencjalnie działać różnego rodzaju mechanizmy ewolucyjne, prezentuje Gontier [2010a; 2010b]. Epistemolożka podkreśla, że obecnie najwyższym priorytetem dla lingwistów ewolucyjnych jest implementowanie tego typu refleksji na gruncie ewolucji języka (przykładowo potrzebna jest dyskusja, czy w tym kontekście formy kulturowe lub językowe muszą być replikowalne). Do wciąż jeszcze nielicznej grupy badaczy realizujących to pierwszorzędne zadanie Gontier zalicza autorów takich, jak na przykład: Deacon [1997], Croft [2000], Szathmáry [2000], Kirby [2012] i Steels [2000a] (autorka chciałaby tu zwrócić uwagę zwłaszcza na dwa ostatnie nazwiska, czyli naukowców, których głównym narzędziem badawczym są symulacje komputerowe; ponadto modele, które są przedstawione w kolejnych rozdziałach niniejszej monografii, należą do kategorii gier językowych, zaproponowanej właśnie przez Luca Steelsa). Wobec szybkich postępów badań w dziedzinie ewolucji oraz wchodzenia do obiegu naukowego nowych koncepcji i hipotez z tej dyscypliny nie ma już ani potrzeby, ani takiej konieczności, aby powstanie i rozwój wszyst-

kich komponentów ludzkiej zdolności językowej tłumaczyć wyłącznie poprzez mechanizmy adaptacji i selekcji.

Podsumowując powyższe rozważania, możemy stwierdzić, że w dotychczasowych badaniach w dziedzinie ewolucji języka główny nacisk kładziono na poszukiwanie takich presji selekcyjnych, które mogły doprowadzić do powstania języka. Powszechnie przyjmowanym przy tym założeniem było, że język wyewoluował jako **narzędzie komunikacji**, umożliwiające przekaz różnego rodzaju informacji (społecznych, kulturowych, politycznych etc.), co wspomagało tworzenie się różnego rodzaju więzi między członkami populacji, wzmacniając społeczno-kulturową spójność wspólnot komunikacyjnych. Tego rodzaju korzyści mogły pozytywnie wpływać na przeżywalność, co czyniło język cechą adaptatywną, która mogła wyewoluować dzięki selekcji naturalnej.

Takie podejście rodzi jednak pewne problemy. Po pierwsze, jeśli źródeł presji selekcyjnej szukamy w (jakkolwiek rozumianej) użyteczności języka, to można kontrargumentować, że choć posługiwanie się językiem zapewne przynosi korzyści członkom wspólnoty, to jednak tylko komunikacyjnej, czyli takiej, w której ta forma porozumiewania się już się wykształciła (zatem znów nie tłumaczy to, jak do tego doszło). Zdolność językowa faktycznie będzie cechą adaptatywną w populacji, w której język już istnieje (na przykład ze względu na korzyści, jakie przynosi międzyosobnicze i międzypokoleniowe przekazywanie wiedzy). Uzasadnia to więc dobrze jej dalszy rozwój, natomiast nadal nie pozwala to wyjaśnić, jak doszło do pojawienia się naszej zdolności językowej. Podobnie zresztą ewentualna przewaga jakiejś grupy używającej języka nad innymi, którym brak jeszcze takiego narzędzia komunikacji, wciąż nie rozwiązuje zagadki jego powstania.

Ponadto porozumiewanie się w grupie może być użyteczne, gdy będzie miało charakter **kooperatywny**. Istnieją tymczasem różne badania wskazujące na to, że taka współpraca komunikacyjna niekoniecznie jest strategią ewolucyjnie stabilną. Inaczej mówiąc, jest bardzo prawdopodobne, że może być wypierana przez strategie konkurencyjne. Otóż współpraca w tym kontekście wymaga uczciwego przekazywania prawdziwych informacji (a więc altruistycznego dzielenia się z innymi pewnymi swoimi zasobami), jak też zaufania ze strony odbiorcy i jego wiary w prawdziwość pozyskanych wiadomości (i w szczerą intencję nadawcy). Jednakże w większych grupach niespokrewnionych osobni-

ków funkcjonowanie altruizmu krewniaczego lub odwzajemnionego jest mocno ograniczone, co może prowadzić do zaniku uczciwej komunikacji, bowiem najskuteczniejsza wówczas okazuje się egoistyczna strategia oszustów, którzy sami wykorzystują przekazane im informacje, jednak nie odwzajemniają się partnerom, od których je uzyskali, czyli nie dzielą się z nimi uczciwie swoją wiedzą, albo nawet ich okłamują. W tej sytuacji należy więc szukać jeszcze jakichś dalszych mechanizmów ewolucyjnie stabilizujących kooperację i uczciwą wymianę komunikatów, jako czynników najwyraźniej niezbędnych dla rozwoju języka [Wacewicz 2008].

Inny jeszcze problem stanowi to, że konstruując te rozmaite scenariusze ewolucyjne, oparte na różnych hipotetycznych wariantach presji selekcyjnej, próbuje się zarazem określić, co właściwie wyewoluowało i dlaczego (a więc definiuje się, czym jest język i jakie spełnia funkcje). Wpada się tym samym w błędne koło, twierdząc, że język, zdefiniowany jako narzędzie komunikacji, wyewoluował dla zapewnienia nam... właśnie sprawnej komunikacji. W dodatku takie ujęcie wydaje się mieć perspektywę teleologiczną, a ewolucja nie działa przecież celowo (por. jeszcze uwagi na s. 33).

Nawiasem mówiąc, z szerszą dyskusją na temat tego, „co wyewoluowało, czyli czym właściwie jest język” możemy się zapoznać w podrzdziale 3.3 *Ewolucji języka* [Żywczyński, Wacewicz 2015, s. 163], zatytułowanym *Ewolucja – ale czego? Taksonomia „języka”*. Autorzy omawiają w nim również następujący obecnie odwrót od ścisłego **internalizmu**, w ramach którego język opisywany jest wyłącznie w kategoriach biologicznej, wrodzonej zdolności, oraz powrót do myślenia o języku także w kategoriach ponadjednostkowych. Aktualnie w coraz większym stopniu uwzględnia się więc także jego aspekty wspólnotowe, czyli wspólne zasoby wiedzy, mechanizmy koordynacji i wspólnej uwagi, wspólne praktyki kulturowe, kooperację, wreszcie transmisję wiedzy i języka w procesie uczenia (się) [Żywczyński, Wacewicz 2015, s. 177]. Zwraca się uwagę także na wzajemne wpływy ewolucji biologicznej i kulturowej (koewolucja, nisze ekologiczne itd.) oraz na kulturową ewolucję samych języków jako systemów (ich rozwój na poziomie glottogenezy).

Niektóre aktualne badania wręcz podważają **mocną hipotezę natywistyczną** (o całkowitej wrodzoności języka), pokazując, że nasza

zdolność do kulturowego przekazu wiedzy, przy jednoczesnej niezmiernej plastyczności osobniczej, również może skutkować wyłanianiem się na poziomie populacyjnym pewnych kognitywnych i językowych uniwersaliów [Thompson *et al.* 2016; Kirby *et al.* 2014]. Chater *et al.* [2009] i Christiansen *et al.* [2009] twierdzą nawet, że język jest przede wszystkim produktem ewolucji kulturowej, a nie adaptacji biologicznej. Opierając się na wynikach swoich symulacji, wykluczają możliwość genetycznego zakodowania wrodzonej nam wiedzy językowej (gramatyki uniwersalnej) i uważają, że to nie organ językowy czy LAD (*Language Acquisition Device* [Chomsky 1986]) ani też instynkt językowy [Pinker 1994] umożliwiają nam tak łatwe nabywanie języka, lecz fakt, że w istocie to języki wyewoluowały kulturowo w taki właśnie sposób, że są przez nas łatwo przyswajane i przetwarzane. Zamiast mówić o adaptacji biologicznej człowieka, zapewniającej mu umiejętność używania języka, należy więc raczej mówić o adaptacji języków, dostosowującej je do zdolności kognitywnych człowieka [Christiansen, Chater 2008]. Zatem teoria powstania i ewolucji języka najwyraźniej powinna ujmować te procesy z trzech różnych perspektyw: nie tylko biologicznej, ale też społecznej i kulturowej [Steels 2012c].

Na kolejny jeszcze problem ze wspomnianymi wyżej scenariuszami ewolucji języka wskazują niektórzy autorzy kwestionujący nawet to ich podstawowe założenie, że język wyewoluował przede wszystkim jako system komunikacji. Anne Reboul, na przykład, rozróżnia systemy komunikacji w mocnym sensie (takie, które wyewoluowały właśnie jako system komunikacji) i w słabym sensie (takie, które tylko są używane w komunikacji, ale nie wyewoluowały jako tego rodzaju system) [Reboul 2015]. Zdaniem Reboul nie da się obronić stanowiska, że język ludzki jest systemem komunikacji w mocnym sensie. Posiada on unikatowe cechy, niespotykane w żadnym innym systemie (między innymi semantyczność, dyskretną nieskończoność czy przemieszczenie czasowo-przestrzenne), których ewolucyjny rozwój z jakiegokolwiek zwierzęcego systemu komunikacji wydaje się niemożliwy. Reboul omawia szczegółowo dwa rozwijane ostatnio modele systemów komunikacji, to jest model kodowy [Millikan 2005] oraz model ostensywny [Scott-Phillips 2014], wskazując na kłopotliwe pytania dotyczące ewolucji języka, na które na razie żaden z tych modeli nie daje satysfakcjonujących odpowiedzi (w pierwszym przypadku wiążą się one głównie z kwestią uczciwości

i altruizmu, a w drugim z teorią umysłu i czytaniem w myślach, czyli mentalizacją). Reboul proponuje uznać język za system komunikacyjny w słabym sensie, który wyewoluował przede wszystkim jako mechanizm kognitywny, służący – zgodnie z hipotezą Jerry’ego Fodora [2008] – jako język myśli (*Language of Thought Hypothesis*), a dopiero później w procesie egzaptacji uległ eksternalizacji i zaczął funkcjonować jako narzędzie przekazywania informacji. Wspomniane zaś unikatowe cechy języka, podobnie zresztą jak syntaksa, stanowiły cechy strukturalne myśli i zostały po nich „odziedziczone”, a nie „wynalezione” dla wyłaniającej się komunikacji językowej. Oczywiście, pozostaje wtedy jeszcze do wyjaśnienia kwestia tego, jak doszło do wykształcenia się tych szczególnych zdolności kognitywnych człowieka, bezprecedensowych i niepowtarzalnych w świecie zwierzęcym. Jak przyznaje Reboul, na ten temat możemy na razie tylko spekulować. Stanowisko, że język nie wyewoluował ze zwierzęcej komunikacji, lecz ze zwierzęcych zdolności poznawczych, nie jest zresztą nowe. Prezentował je na przykład już (często cytowany w tym kontekście) Ib Ulbaek [1998, s. 33], który konkludował swoje rozważania następująco: „Language grew out of cognitive systems already in existence and working: it formed a communicative bridge between already-cognitive animals”.

Wracając jeszcze do omawianej przez Gontier [2012] kwestii tego, co i dlaczego (po co) ewoluowało, to epistemolożka wskazuje z naciskiem na to, że podstawowym zadaniem nauki (a przynajmniej nauk ścisłych – *science*) jest dociekanie, *jak* dany przedmiot badań powstał i/lub się rozwijał, to znaczy, jakie w danym przypadku działały mechanizmy i jaki był przebieg owego procesu. Wykształcone w toku ewolucji biologicznej złożone organy, cechy czy zdolności realizują specyficzne dla nich funkcje, stąd nasze wrażenie, że wyewoluowały faktycznie po to, żeby pełnić takie właśnie role. Przykładowo, jako narząd wzroku czy słuchu traktuje się organ, który zapewnia organizmowi zdolność widzenia czy słyszenia, po czym automatycznie przyjmuje się, że wyewoluował on dokładnie w tym celu, żeby umożliwić widzenie lub słyszenie. Jednakże ewolucja nie działa „po coś” ani „z zamiarem”, nie dąży do osiągnięcia żadnego celu ani nie realizuje jakiegokolwiek planu. Żłudne wrażenie jej celowości powstaje po prostu jako efekt adaptacji organizmów, zachodzącej dzięki działaniu selekcji naturalnej i innych mechanizmów ewolucyjnych, w wyniku czego pojawiają się

cechy i struktury w widoczny sposób dostosowane do funkcji, które realizują. Podstawowym pytaniem dla badaczy ewolucyjnych – biologów, antropologów, psychologów, lingwistów wreszcie – nie powinno więc być pytanie „po co?” (jak to jest w przedstawionym powyżej ujęciu funkcjonalnym), ale raczej „jak?” lub „w jaki sposób?”. Odpowiedź na nie wymaga natomiast ustalenia mechanizmów powodujących zmiany, jednostek (obiektów i ich cech), na które te mechanizmy wpływają, oraz poziomu czy miejsca działania owych procesów (czy jest to na przykład genom, fenotyp czy środowisko).

Nie wystarczy zatem skupić się na tym, jaka jest adaptacyjna wartość języka (określając zarazem, czym jest język i jakie funkcje pełni), gdyż nie dostarczy nam to jeszcze pełnej odpowiedzi na zasadnicze pytanie, jak język powstał i dalej się rozwijał. Zdecydowanie do badań nad ewolucją języka powinno się jeszcze włączyć i poddać systematycznej analizie wyżej wymienione kwestie mechanizmów, jednostek i poziomów. Należy szczególnie prześledzić, poprzez które mechanizmy ewolucyjne (być może inne niż selekcja naturalna) ewoluowały poszczególne komponenty języka. Za adekwatne i interesujące z tego punktu widzenia, a jednocześnie idące we właściwym kierunku badania Gontier uznaje na przykład prace Tomasello (efekt zapadki), Deacona (efekt Baldwina; por. podrozdział 3.5), Dora i Jablonki (fenotypyczna plastyczność i zjawiska epigenetyczne) oraz prace wykorzystujące symulacje komputerowe (na przykład modeli opartych na koncepcjach teorii systemów, podwójnego dziedziczenia czy koewolucji). „[They] are already investigating the how, what, and where of evolution. These promising research agendas should come to the foreground of evolutionary linguistics research” [Gontier 2012, s. 88]. Gontier dobitnie podkreśla, że skoro obecnie w biologii ewolucyjnej intensywnie rozwijana jest już tak zwana rozszerzona synteza (*Extended Evolutionary Synthesis*) [Pigliucci, Müller 2010; Łastowski 2014], to lingwiści ewolucyjni nie mogą nadal ograniczać się wyłącznie do podejścia selekcyjnego i adaptacyjnego, lecz powinni oni rozważać też i analizować w kontekście ewolucji języka jeszcze inne możliwe mechanizmy ewolucyjne [Gontier 2006b, 2008]. Znamienne jest tutaj także akcentowanie doniosłej roli, jaką mogą w badaniach ewolucji języka spełniać symulacje komputerowe (co autorka stara się też zademonstrować w kolejnych rozdziałach niniejszej monografii).

1.3. Złożoność i emergencja

Wielu badaczy jest zgodnych co do tego, że język należy traktować jako złożony system adaptacyjny (*complex adaptive system*) [Keller 1994; Steels 2000a; Deacon 2003b,a; Ellis, Larsen-Freeman 2009; Kirby 2012]. Za to trudniej jest chyba uzgodnić, czym jest **system złożony**, gdyż właściwie nie ma jednej, ogólnie przyjętej, precyzyjnej definicji. Zwykle określa się go jako układ składający się z wielu komponentów, często ustrukturyzowanych hierarchicznie, powiązanych ze sobą licznymi, silnymi i skomplikowanymi zależnościami w taki sposób, że zachowanie każdego zależy od zachowań pozostałych. Komponenty systemu złożonego same także mogą być systemami złożonymi. O całym zaś takim układzie zwykle mówi się, że jest czymś więcej niż sumą swoich części, w tym sensie, że znajomość własności tych składników i reguł ich wzajemnych oddziaływań nie wystarcza, żeby efektywnie i jednoznacznie wyznaczyć zachowanie i własności całego systemu [Simon 1962]. Systemy złożone są układami dynamicznymi, co oznacza, że ich stan podlega zmianom i ewoluuje. Dynamika systemów złożonych jest nieliniowa, a ich działanie jest bardzo wrażliwe na zakłócenia oraz warunki początkowe, tak że nawet drobne ich zaburzenia mogą znacząco zmienić funkcjonowanie i rozwój systemu, nierzadko w sposób niemożliwy do przewidzenia (jest to tak zwane zachowanie chaotyczne, popularnie określane jako efekt motyla). Tego rodzaju układy bardzo trudno jest opisywać matematycznie i często jedynym sposobem ich badania pozostają symulacje komputerowe.

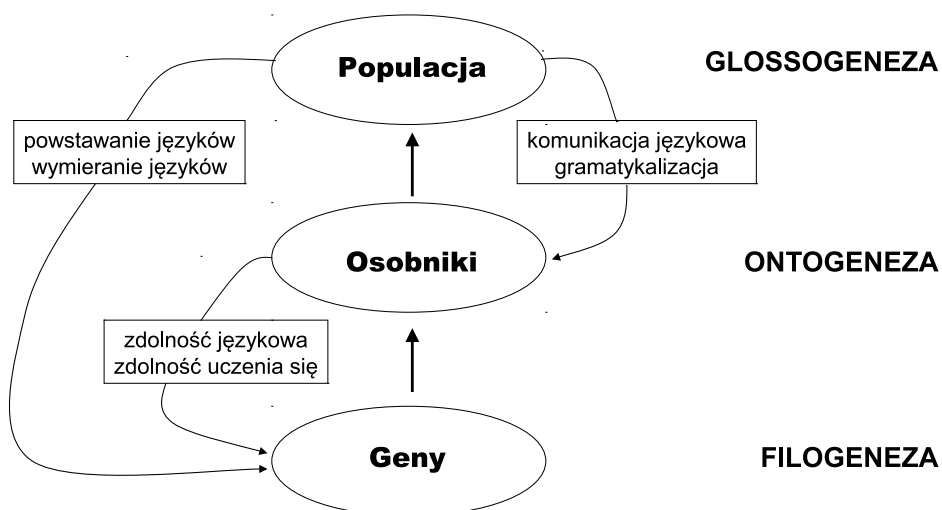
W zwykłych systemach ich składniki pozostają niezmiennie i obowiązują je stałe zasady, a na rozwój układu wpływają jedynie czynniki zewnętrzne, które mogą spowodować na przykład przejście ze stanu równowagi w chaotyczny, albo od chaosu do samoorganizacji. Ciekawą podklasę systemów złożonych stanowią natomiast **systemy adaptacyjne**, w których zarówno zachowania czy własności pojedynczych elementów, jak i interakcje między nimi, mogą się zmieniać w odpowiedzi na czynniki środowiskowe lub zmiany w pobliskim otoczeniu. Taka wewnętrzna wariacja w systemie powoduje wyłonienie się nowego rodzaju jego dynamiki (typowo w formie sprzężeń zwrotnych), nakładającej się na „zwykłą” złożoność systemu, co jeszcze bardziej komplikuje jego analizę. Zdolność adaptacyjna zwiększa odporność sys-

temu na zaburzenia, ułatwia jego samoorganizację i wyznacza kierunek jego ewolucji.

W związku z charakterem modeli przedstawionych w następnych rozdziałach adekwatne jest też określenie adaptacyjnych systemów złożonych jako systemów o dużej liczbie elementów, które wzajemnie ze sobą oddziałują oraz adaptują się lub uczą (takie elementy zwykle zwane są wówczas osobnikami albo agentami) [Holland 2006]. Naturalnie najwygodniejszym narzędziem badania takich układów są systemy wieloagentowe. Z kolei jako strukturę reprezentującą we właściwy sposób mnogość i niejednorodność interakcji między agentami stosować można tak zwane sieci złożone [Albert, Barabási 2002; Newman 2003], które również mogą być adaptatywne. W efekcie rozmaite układy złożone, w tym także społeczności, w których wyłania się język, mogą być modelowane jako systemy wieloagentowe, zwłaszcza te na (adaptatywnych) sieciach złożonych (por. rozdział 5).

Język niewątpliwie stanowi taki **złożony system adaptacyjny**, wyłaniający się w wyniku interakcji różnych dynamicznych układów [Beckner *et al.* 2009]. Wynika to ze współgrania trzech ściśle ze sobą powiązanych procesów: osobniczego uczenia się, międzyosobniczego przekazu kulturowego i gatunkowej ewolucji biologicznej – również stanowiących adaptacyjne systemy złożone, w których oddziaływanie rozmaitych czynników i części powoduje wyłanianie się nowych, często tak skomplikowanych własności, że sprawiają wręcz wrażenie zaprojektowanych. Najlepiej widać to w przypadku ewolucji biologicznej, która „tworzy” organizmy przystosowane do środowiska; uczenie się także modyfikuje mózgi, przystosowując je do nowych zadań; wreszcie transmisja kulturowa języków dopasowuje je do możliwości kognitywnych człowieka. Mimo że te trzy systemy zasadniczo działają w różnych skalach czasowych (ontogenetycznej, glossogenetycznej i filogenetycznej), wszystkie one oddziałują ze sobą i wzajemnie na siebie wpływają. Z jednej strony mechanizmy uczenia się języka są częścią naszego wyposażenia biologicznego i podlegają ewolucji biologicznej. Natomiast z drugiej strony, to na nich opiera się kulturowy proces transmisji języka między osobnikami i pokoleniami. Z kolei języki formowane w trakcie tej ewolucji kulturowej mogą w pewnym stopniu wpływać na biologiczne przystosowanie ich użytkowników i przekształcać ich niszę ekologiczną, a tym samym wyznaczać dalszą trajektorię ewolucyjną mechani-

zmu uczenia się języka. „Genes shape learning mechanisms – Learning mechanisms determine cultural dynamics – Emergent structure shifts selection pressures and affects fitness landscape” [Kirby 2007, s. 677; 2012, s. 591].



Rys. 1.1. Język jako złożony system adaptacyjny; dokładniejszy opis w tekście

Ilustrujący te skomplikowane współzależności schemat z rys. 1.1 zawiera oczywiście tylko nieliczne przykłady możliwych powiązań między zjawiskami zachodzącymi na trzech wspomnianych poziomach: osobniczym (jednostki nabywające i używające języka), populacyjnym (wspólnoty komunikacyjne wykształcające wspólny zestaw konwencji językowych, podlegający procesom kulturowym) i genetycznym (pula genowa zmieniająca się w toku ewolucji biologicznej). Procesy występujące na poszczególnych poziomach działają w różnych skalach czasowych. Najszybsze są oczywiście te dotyczące indywidualnych użytkowników języka (rzędu dziesiątek lat), wolniejsze są procesy kulturowe, zachodzące w obrębie ich zbiorowości (setki czy tysiące lat), a już w zupełnie innej skali działa ewolucja biologiczna (setki tysięcy czy miliony lat). Mimo tak zróżnicowanych skal czasowych te trzy systemy mogą na siebie wzajemnie oddziaływać; przykładowo, ewolucja biologiczna może wpłynąć na wykonanie językowe albo sposób akwizycji języka przez

jego użytkowników, co może rzutować na procesy transmisji języka we wspólnocie komunikacyjnej, które z kolei mogą przeorientować presję selekcyjną wywieraną w tym środowisku (choćby poprzez efekt Baldwina, omówiony dokładniej w podrozdziale 3.5), wpływając tym samym znów na adaptację biologiczną osobników. Choć w badaniach zwykle koncentrujemy się na zjawiskach z jednego tylko poziomu i opisujemy procesy zachodzące w odpowiedniej dla niego skali czasowej (na przykład ontogenetyczne przyswajanie języka albo diachroniczne zmiany językowe czy ewoluowanie aparatu mowy), to jednak próba wyjaśnienia powstania języka i jego dalszego rozwoju będzie musiała uwzględnić całą złożoność tego kompleksu powiązanych ze sobą i zmiennych w czasie systemów.

Symulacje z użyciem systemów wieloagentowych umacniają hipotezę, że język to **zjawisko emergentne** [Steels 1998b] (demonstrujemy to szerzej w następnych rozdziałach). Emergencję możemy tu rozumieć dwojako. Po pierwsze, jako zjawisko masowe, realizowane przez mnogość osobników pozostających ze sobą w licznych wzajemnych interakcjach. Żaden pojedynczy osobnik nie zna ani nie kontroluje języka jako całości. Język można by tu porównać do ławicy, której spójność utrzymywana jest wyłącznie dzięki indywidualnym zachowaniom poszczególnych ryb, reagujących na zachowanie innych (i wtedy do zasymulowania ruchu całej ławicy wystarczają bardzo proste reguły określające reakcję każdej ryby na zachowanie sąsiednich). W ten sposób, pomimo braku centralnego ośrodka decyzyjnego, tylko dzięki procesowi samoorganizacji, ławica jako całość przejawia złożone zachowania. Po drugie, zjawiska emergentne powstają w momencie osiągnięcia przez system pewnego progu złożoności, liczby powiązań czy stopnia organizacji (bo przecież kilka zaledwie ryb to jeszcze nie ławica). Język także mógłby wyłonić się spontanicznie, choć pozostaje wciąż do ustalenia, jakie są niezbędne ku temu do spełnienia warunki fizjologiczne, psychologiczne i społeczne. Niewątpliwie jednak jest to system złożony, a jak wynika z dotychczasowych badań tego rodzaju systemów, istotne dla ich powstania są procesy ewolucji, koewolucji, selekcji i samoorganizacji [Kauffman 1993].

Zjawisko **ewolucji** nie ogranicza się wyłącznie do ewolucji biologicznej. Może ono zachodzić w dowolnym systemie, w którym kreowane są różnorodne warianty jego elementów, o ile występuje wówczas

jakaś forma ich **selekcji**. Nie muszą to być koniecznie geny i działająca na nie selekcja naturalna. Wystarczy jakaś forma reprezentacji (przechowywania) informacji oraz mechanizm jej modyfikacji, generujący różnorodność (mnogość wariantów), a także pewien rodzaj sprzężenia pomiędzy określonymi reprezentacjami a ich „sukcesem” selekcyjnym; sukces taki może zależeć zarówno od samego nośnika informacji, jak i od całego środowiska, w którym on występuje.

Zatem właśnie w tym duchu możemy uważać język za wynik działania nie tylko ewolucji biologicznej, ale także **ewolucji kulturowej**. Jest on rezultatem zbiorowych działań dużej populacji rozproszonych agentów. Zachowanie każdego agenta wyznaczone jest przez zestaw jego reguł językowych („genów”). Warianty języka powstają, gdy agenty tworzą nowe reguły językowe lub modyfikują istniejące. Selekcja wariantów językowych może zachodzić według kryteriów zależnych od lingwistycznych czy komunikacyjnych efektów przyjętych reguł (może to być na przykład łatwość produkowania danej formy językowej, w tym minimalizacja wymaganej energii czy pamięci, albo zrozumiałość, czyli łatwość percepcji lub analizy itp.).

Z kolei **koewolucja** zachodzi, gdy oddziałujące na siebie gatunki (lub populacje) rozwijają się na zasadzie swoistego sprzężenia zwrotnego: zmiany ewolucyjne w jednym pociągają zmiany w drugim, do których dostosowuje się znów ten pierwszy i tak dalej; przykładem może być ewolucyjny „wyścig zbrojeń” między drapieżnikami a ofiarami. Koewolucja to swego rodzaju samonapędzająca się spirala, prowadząca do coraz większej złożoności układu. Jak wskazuje Steels [1998b], z podobnym efektem mamy do czynienia także w języku, na wielu jego poziomach. Pobudzana przez ich rozwijające się umiejętności językowe, rośnie złożoność interakcji pomiędzy osobnikami oraz pomiędzy nimi a środowiskiem, skutkując powstawaniem różnorodnych, coraz bardziej złożonych znaczeń, co wymusza rozbudowę leksykonu; z kolei potrzeba nowych słów wzmacnia presję na kreowanie odpowiedniego repertuaru fonemów; jednocześnie przekazywanie złożonych znaczeń wywołuje potrzebę budowania bardziej złożonych komunikatów, a w szczególności niezbędna staje się syntaksa – rośnie więc złożoność języka. „Language complexity feeds on itself and escalates” [Steels 1998b, s. 395].

Procesy ewolucyjne można badać, między innymi stosując **modele gier** [Maynard Smith 1982; Steels 2001a]. Grą może być dowolna

interakcja między agentami lub między agentem a środowiskiem. Wynik gry określa ewentualne zmiany stanu agenta. W przypadku gier językowych (modeli, które są szczegółowo przedstawione w rozdziale 2) będą to zmiany jego reguł językowych, przy czym w różnych typach gier występują różnego rodzaju reguły, a więc fonologiczne, leksykalne czy syntaktyczne. Gry mogą być także ze sobą powiązane, gdy wyniki jednych są danymi wejściowymi dla innych (na przykład wygenerowany w odpowiedniej grze zestaw fonemów może służyć jako baza dla gier leksykalnych). Obok ewolucji (w ramach gry) pojawia się wtedy także koewolucja (różnych gier). Występują wówczas bowiem dwa rodzaje presji selekcyjnej, przykładowo, fonemy mogą konkurować między sobą z jednej strony pod względem, dajmy na to, łatwości ich wygenerowania czy percepcji, ale z drugiej strony także co do stopnia wykorzystania ich w leksykonie – i tak zasób fonemów będzie koewoluował z zasobem leksykalnym (a ten drugi może zarazem koewoluować na przykład z zasobem pojęciowym).

Kolejne ważne zjawisko kształtujące język to **samoorganizacja**, czyli proces, w którym elementy układu złożonego ulegają spontanicznemu uporządkowaniu, tworząc zorganizowane struktury pod wpływem oddziaływań zachodzących pomiędzy elementami układu oraz między układem a jego otoczeniem. W szczególności dzięki temu zjawisku może nastąpić synchronizacja elementów układu. W ewoluującym systemie pojawiają się różnorodne warianty, z których część znika dzięki procesowi selekcji, zaś pozostałe są sobie „równoważne” z punktu widzenia kryteriów selekcyjnych. Jeśli jednak dzięki losowej fluktuacji jeden z nich ulegnie wzmocnieniu, to o ile będzie działało w tym układzie odpowiednie sprzężenie, może on zdominować ostatecznie cały układ, który stanie się w ten sposób koherentny. W układach fizycznych przykładem takiego efektu jest pojawienie się spontanicznego namagnesowania w układach ferromagnetycznych, co polega na zgodnym ukierunkowaniu momentów magnetycznych. Podobnie w przypadku języka ten właśnie mechanizm tłumaczy, jak populacja rozproszonych osobników może osiągnąć stan lingwistycznej synchronizacji, czyli posługiwać się wspólnymi regułami językowymi. W grach językowych dodatnie sprzężenie oparte jest na sukcesie odniesionym w grze: warianty językowe, które częściej wygrywają, są częściej używane w kolejnych grach – i wówczas jeszcze częściej wygrywają – i tak dalej. Z początko-

wego chaosu i mnogości wariantów generowanych przez agenty szybko wyłania się stan uporządkowany, jednowariantowy.

W ewolucji systemów biologicznych odnaleźć można jeszcze jedno zjawisko, mianowicie **hierarchizację**, czyli tworzenie struktur wielopoziomowych. Mamy z nim do czynienia, gdy początkowo niezależne jednostki wykształcają takie relacje (na przykład symbiotyczne), że stają się pewnego rodzaju jednością, tworząc w sumie nowy system, na innym poziomie organizacji i złożoności. Przykładowo, w taki właśnie sposób mitochondria włączyły się do naszych komórek. Jednostki z tego nowego poziomu mogą z kolei współtworzyć nowe struktury, konstytuując tym samym kolejny poziom organizacji systemów, i tak dalej. Natomiast w zastosowaniu do ewolucji języka można by oczekiwać, że tego typu zjawiska pozwolą wyjaśnić pojawienie się syntaksy. Gry językowe, na przykład, umożliwiają wyłonienie się repertuaru pewnych jednostek (takich jak fonemy czy słowa). Kolej teraz na eksperymenty badające, jak takie jednostki mogą się ze sobą łączyć, tworząc odpowiednio morfemy czy zdania. Kwestia, czy w grach językowych uda się odtworzyć ową zasadę dwoistości (dwupoziomowości) struktury języka, pozostaje jeszcze otwarta.

Kolejne rozdziały ogniskują się przede wszystkim wokół leksykalnych gier językowych, w trakcie których wyłania się wspólny dla populacji agentów leksykon. Poszczególne agenty modyfikują wyłącznie własne zasoby językowe, w oparciu o dostępne im lokalnie informacje, a jednak, jak się okazuje, system staje się globalnie koherentny. Jego rozwój następuje dzięki trzem procesom: osobniczej adaptacji, ewolucji kulturowej i samoorganizacji. Agenty adaptują swoje reguły językowe tak, aby w kolejnych grach osiągać sukcesy; w szczególności mogą zmieniać ich elementy decydujące o wyborze stosowanych jednostek leksykalnych. Działa wówczas proces selekcji, o charakterze zbliżonym do darwinowskiej selekcji naturalnej, jednak nieobejmujący kolejnych generacji osobników, a raczej sukcesywnie rozgrywane gry. Jednostki efektywniejsze (lepiej dostosowane), to znaczy gwarantujące więcej sukcesów, są wybierane częściej, a mniej efektywne rzadziej lub nawet wcale (i wtedy „nie przeżywają”). Ten proces ewolucji kulturowej (analogiczny jak badany w ramach memetyki [Dawkins 1976]) prowadzi do rozprzestrzenienia się w obrębie populacji agentów (czyli wspólnoty komunikacyjnej) tych najefektywniejszych jednostek leksy-

kalnych i eliminacji pozostałych, a możliwe, że finalnie nawet do stanu, w którym pozostaje już tylko jeden z wariantów językowych. W ten sposób następuje samoorganizacja systemu. Jak widać, wyłonienie się języka w procesie ewolucji kulturowej opiera się na takich samych mechanizmach, jak te działające w ewolucji biologicznej, czyli na selekcji i samoorganizacji. Natomiast najbardziej efektywną metodologią badania tego rodzaju procesów, proponowanych jako mechanizmy odgrywające fundamentalną rolę w powstaniu i rozwoju języka, okazuje się ich testowanie przy pomocy symulacji komputerowych; ta właśnie kwestia zostaje naświetlona w kolejnym podrozdziale.

1.4. Dlaczego symulacje

Jak już wspomniano we wstępie, Morten Christiansen i Simon Kirby w swoim zajmującym poczesne miejsce w literaturze przedmiotu artykule przeglądowym pt. *Language evolution: Consensus and controversies* omawiają między innymi doniosłą rolę, jaką ma do spełnienia modelowanie komputerowe w badaniach ewolucji języka, uznając ją za jedną z trzech zasadniczych kwestii niebudzących zastrzeżeń wśród badaczy z tej dziedziny (obok potrzeby interdyscyplinarności oraz konieczności identyfikacji preadaptacji językowych) [Christiansen, Kirby 2003a]. To właśnie modelowanie komputerowe, które w ostatnich latach staje się coraz ważniejszym narzędziem badania problemu powstania i rozwoju języka, w znacznym stopniu przyczyniło się do umocnienia naukowego statusu lingwistyki ewolucyjnej. Ze względu na niedostatek konkretnych świadectw rozwoju języka na etapach prehistorycznych (lingwiści ewolucyjni narzekają półzartem, że nie dysponują żadnymi skamielinami języka) oraz brak możliwości bezpośredniej obserwacji procesu powstawania języka wobec niepowtarzalności tego zjawiska, próbuje się niedobór danych choćby częściowo uzupełnić wynikami badań empirycznych dotyczących na przykład akwizycji języka, uczenia się drugiego języka, powstawania pidżynów, deficytów językowych albo systemów komunikacji zwierząt. Użyteczność tego typu podejść jest niestety ograniczona, gdyż występujące tu procesy są jednak inne niż te z etapu wyłaniania się języka. Ponadto należy sądzić, że języki współczesne różnią się fundamentalnie od protojęzyka (aczkolwiek nie jest

nam oczywiście znana żadna taka pierwotna forma komunikacji symbolicznej). Jak wobec tego zrekonstruować drogę, na której ewolucja biologiczna i ewolucja kulturowa doprowadziły do wyłonienia się protojęzyka, a potem do jego przekształcenia się we w pełni rozwinięte języki z rekursywną gramatyką i kompozycyjną semantyką? Kluczem do wyjaśnienia obecnej złożoności języka jest zrozumienie, jak to zjawisko wyewoluowało ze zjawisk o mniejszym stopniu złożoności. Zastosowanie symulacji komputerowych oferuje nam w tej sytuacji zupełnie nową perspektywę badawczą.

Na podstawie dostępnych nam świadectw empirycznych możemy próbować odtwarzać początki rozwoju języka, ale jedynie w sposób pośredni. Ze znalezionych przez archeologów narzędzi kamiennych wnioskujemy na przykład o sprawności motorycznej ich użytkowników, a nawet do pewnego stopnia o ich możliwościach kognitywnych i kompetencjach. Badając czaszki naszych przaprzodków, spekulujemy o ich umiejętności wokalizacji. Obserwacje zachowań komunikacyjnych innych gatunków, szczególnie tych najbliższych spokrewnionych z człowiekiem, pozwalają wysuwać hipotezy na temat sposobów komunikowania się naszych dalekich przodków, a także badać różnice między językiem ludzkim a systemami komunikacji zwierząt. Studiowanie budowy, rozwoju i funkcji różnych obszarów mózgu pomaga rozpoznawać ich ewentualne związki z naszymi zdolnościami językowymi i przetwarzaniem języka. Wyniki badań genetycznych naświetlają kwestię wpływu genów na nasze umiejętności językowe. Z biologii ewolucyjnej czerpie się zasady tworzenia sensownych scenariuszy ewolucyjnych, tłumaczących, jak (być może) doszło do wyłonienia się języka i jak mógł przebiegać jego dalszy rozwój. Przydatne mogą się okazać zarówno formalne modele języka, jak i analiza dynamiki populacji oraz transferu informacji w strukturach społecznych, ale też wnioski z badań nad sztuczną inteligencją. W dziedzinie ewolucji języka gromadzi się informacje i argumenty ze wszystkich dostępnych źródeł (o wyjątkowej interdyscyplinarności tej dziedziny badań była już mowa we wstępie i podrozdziale 1.1). Jednak są to zawsze świadectwa pośrednie, raczej poszlaki niż twarde dowody. I wciąż jeszcze jest ich za mało, żeby jednoznacznie nakreślić ciąg zdarzeń i okoliczności, który doprowadził do powstania języka, czy też precyzyjnie opisać sam proces jego wyłaniania się oraz dalszego rozwoju.

W sytuacji tego niedostatku bezpośrednich dowodów i empirycznych obserwacji warto odwołać się do symulacji komputerowych. Przy ich pomocy można próbować odtwarzać pewne zjawiska, choćby w ograniczonym zakresie. Mamy tu całą paletę możliwości, takich jak na przykład komputerowe modelowanie scenariuszy proponowanych jako objaśnienia początków języka. W trakcie symulacji takich modeli można by, załóżmy, obserwować, jak z jakiejś początkowej, prymitywnej jeszcze formy, język stopniowo się rozwija i komplikuje, podlegając już nie tylko ewolucji biologicznej, ale i kulturowej. Z kolei symulacje rozmaitych modeli pozwalają ocenić, które z rozważanych scenariuszy są bardziej prawdopodobne od innych, a które należy całkowicie wykluczyć. Inne opcje to na przykład badanie adaptacyjnych zalet różnych systemów komunikacji albo też sprawdzanie różnych wariantów warunków początkowych, faktycznie umożliwiających wyłonienie się komunikacji. Możliwe jest śledzenie i porównywanie zmian językowych w różnych liniach rozwojowych językowego modelu filogenetycznego, a przy tym ewentualnie identyfikowanie uniwersaliów językowych [Dunn *et al.* 2011]. Rozwija się nawet komputerową neuroprymatologię porównawczą, badając rozwój ewolucyjny oraz funkcjonalności mózgow ssaków naczelnych i ich antenatów [Arbib 2016]. Symuluje się też ich możliwości artykulacyjne i działanie narządów mowy [Badin *et al.* 2014]. Natomiast wychodząc poza izolowane osobniki, modeluje się całe złożone z nich społeczności, tworząc specyficzne dla nich (kulturowe) nisze ekologiczne (w tym przypadku świetnie sprawdza się modelowanie wieloagentowe). Zdaniem cytowanych już wcześniej Christiansena i Kirby’ego, modelowanie komputerowe niewątpliwie przyczyni się do lepszego zrozumienia skomplikowanej relacji między adaptacją biologiczną a transmisją kulturową, z jaką niewątpliwie mamy do czynienia w ewolucji języka. Jednocześnie wydaje im się mniej prawdopodobne, aby przy pomocy modelowania udało się wyjaśnić zagadkę samego powstania języka – w tej kwestii ważniejsze okażą się zapewne świadectwa, jakich mogą nam dostarczyć inne dyscypliny, takie jak paleoarcheologia, neuronauki, w tym porównawcza neuroanatomia, prymatologia, psycholingwistyka czy kognitywistyka (przy czym oczywiście nie ma żadnej pewności, że w ogóle kiedykolwiek uda nam się tę zagadkę w pełni rozwikłać) [Christiansen, Kirby 2009, s. 325].

Ta nowa metodologia modelowania komputerowego jest istotna również z tego względu, że język należy traktować jako złożony system adaptacyjny (zagadnienie to zostało szczegółowo omówione w podrozdziale 1.3). Takie złożone i dynamiczne systemy, których rozwój podlega zasadom selekcji i samoorganizacji, które nieustannie się zmieniają i komplikują, trudno lub wręcz niemożliwe jest opisywać modelami analitycznymi (co odpowiada strategii odgórnej – *top-down*). Możemy natomiast próbować badać ich ewolucję i kierujące nią mechanizmy w sposób syntetyczny, czyli stosować **podejście oddolne** (*bottom-up*), do czego wygodnym narzędziem są właśnie symulacje komputerowe. W klasycznym w nauce ujęciu odgórnym każdy problem próbuje się rozłożyć na składowe i prowadzić badania na kolejnych poziomach o coraz większym stopniu szczegółowości; na przykład organizm można badać jako całość, potem jego poszczególne organy, tworzące je tkanki i tak dalej, aż do możliwie najniższego poziomu, powiedzmy molekularnego. Można też próbować formułować ogólny model całego zjawiska, z którego powinny wynikać bardziej szczegółowe wnioski dotyczące jego własności czy zachowania. Natomiast stosując podejście oddolne, postępuje się odwrotnie, to znaczy nie analizuje się danego zjawiska czy systemu, lecz je syntetyzuje, czyli rekonstruuje. Zatem najpierw ustala się podstawowe elementy systemu i ich własności, określa ich możliwe zachowania i reguły ich interakcji, ewentualnie charakteryzuje też środowisko, w którym są umieszczone i definiuje zasady ich oddziaływania z tym środowiskiem. Zaimplementowanie tych niezbędnych komponentów pozwala odtworzyć zachowanie systemu jako całości, przy czym powstaje ono jako rezultat licznych lokalnych oddziaływań jego indywidualnych składników. Można też wtedy oczekiwać, że ujawnią się w tej sytuacji nowe globalne własności takiego dynamicznego układu i wystąpią w nim zjawiska, które nie były bezpośrednio zaprogramowane ani określone. Inaczej mówiąc, w systemie następuje proces emergencji, czyli wyłaniania się nowych atrybutów systemu w wyniku interakcji jego elementów, które same takich atrybutów nie posiadają. Występowanie zjawisk i własności emergentnych jest typowe dla systemów złożonych. Niejako przy okazji ich pojawienie się w trakcie symulacji modelu może zarazem być testem poprawności jego założeń dotyczących podstawowych elementów systemu, ich własności i relacji między nimi czy interakcji ze środowiskiem. Błędne, niekompletne lub

nieadekwatne przesłanki nie doprowadzą do pożądaných rezultatów; nie wyłonią się żadne interesujące własności emergentne, bądź też nie okażą się zgodne z jakimikolwiek realnymi zjawiskami.

Modele komputerowe są idealnym narzędziem do badania systemów złożonych. Dzięki symulacjom nie musimy poprzestawać jedynie na rozważaniach teoretycznych i eksperymentach myślowych, które ze względu na stopień komplikacji tych zagadnień musiałyby być nie tylko bardzo zawile i trudne do analizy, ale w dodatku obarczone też dużą dozą niepewności (o ile w ogóle byłyby możliwe do prowadzenia). Stosując modelowanie komputerowe, pracujemy jakby w **wirtualnym laboratorium**, konstruując w nim nowe byty i odtwarzając zjawiska, aby móc przeprowadzać na nich dalej **eksperymenty**, które nie byłyby możliwe w realnym świecie. Eksperymenty te możemy dowolnie wiele razy powtarzać, możemy w nich swobodnie manipulować wszystkimi parametrami, oceniając wpływ poszczególnych czynników na badane procesy oraz analizując zarówno ich kolektywne efekty, jak i role pełnione przez każdy z osobna. Możemy symulować poszczególne izolowane komponenty systemu, albo większą ich liczbę, analizując zarazem ich wzajemne powiązania i wpływy. Taka precyzyjna kontrola różnych warunków, w jakich może działać badany system, a która jest niezbędna dla analizy systemów złożonych, jest praktycznie niemożliwa do osiągnięcia w warunkach rzeczywistych.

Dodatkową zaletą symulacji komputerowych jest to, że są obiektywne i **reprodukowalne**. Można je wielokrotnie powtarzać, uzyskując odpowiednią liczbę danych dla wyznaczenia dobrych statystyk, można przeprowadzać je dla różnych danych wejściowych, a także modyfikować w nich różne parametry czy reguły działania, sprawdzając ich niezawodność, adekwatność i rzetelność. Także inni autorzy mogą je reimplementować, kontrolując prawidłowość uzyskanych wyników i poprawność modelu. Już sam proces implementacji modelu jest korzystny dla analizy danego zagadnienia, gdyż automatycznie wymusza absolutną precyzję w formułowaniu problemu.

Teorie naukowe na ogół artykułowane są werbalnie (z wyjątkiem nielicznych teorii formalnych wyrażanych w sposób symboliczny). Niestety niekiedy formułowane są w tak ogólnikowy sposób, że trudno jest nawet skonkretyzować jakiegokolwiek ich szczegółowe przewidywania w formie testowalnych hipotez, dających się empirycznie zweryfikować.

A przecież teorie nie tylko mają pełnić funkcję deskrypcyjną, opisując (jakościowo) jakiś fragment rzeczywistości, ale winny też generować pewne (najlepiej ilościowe) przewidywania, które następnie można porównywać z obserwacjami świata realnego (**funkcja predykcyjna**). Z jednej strony bowiem tylko taka konfrontacja z danymi empirycznymi pozwala teorię skutecznie sfalsyfikować, a z drugiej oczywiście może też pomóc ją bardziej uwierzytelnić. Niektórzy badacze traktują modelowanie komputerowe właśnie jako nowy, z natury rzeczy klarowny i transparentny sposób wyrażania teorii naukowych [Cangelosi, Parisi 2002a; Vogt, de Boer 2010; Gong *et al.* 2014b]. Model komputerowy zawiera w sobie bowiem założenia danej teorii dotyczące przyczyn, mechanizmów i procesów związanych z symulowanymi zjawiskami, zaś wyniki jego działania (uzyskane w efekcie jego symulacji) prezentują przewidywania generowane przez daną teorię. Należy tu chyba jednak zastrzec, że modele komputerowe raczej nie reprezentują w wyczerpujący sposób kompletnych, ogólnych teorii, a zwykle tylko pewne ich fragmenty, czy konkretne, wywiedzione z nich hipotezy. Model z konieczności jest zawsze pewną **idealizacją** badanego zjawiska, jest uproszczeniem, które pozwala skupić się na jakimś specyficznym jego aspekcie. Można chyba powiedzieć, że modele są abstrakcjami teorii, które z kolei same stanowią pewien abstrakcyjny opis rzeczywistości, oparty na danych empirycznych.

Co do wyników symulacji, to zdarza się niekiedy, że są to rezultaty zupełnie **nieoczekiwane** dla autorów teorii czy modelu komputerowego; konsekwencje nawet prostych założeń i interakcji realizowanych wielkoskalowo bywają czasem zaskakujące. Z uwagi na dużą liczbę symulowanych składników systemu wchodzących ze sobą równolegle w rozmaite interakcje, których efekty wpływają na dalszy rozwój systemu, rozprzestrzeniając się po całym układzie i jednocześnie interferując z pozostałymi, i wobec multum różnych czynników, które potencjalnie mogą wpływać na przebieg całego symulowanego procesu, intuicje twórców dotyczące działania ich modelu nierzadko po prostu ich zawiodą. Zdarza się więc, że symulacje przynoszą zaskakujące wyniki, trudne do przewidzenia z góry ze względu na jednoczesne nakładanie się na siebie i „splątanie” wielu wzajemnych oddziaływań. Jednakże uzyskanie takich niespodziewanych rezultatów symulacji także jest cenne, gdyż pozwala lepiej zrozumieć naturę i działanie danego modelu,

ujawniając jakieś jego nowe, wcześniej nieuwzględnione lub niedocenione aspekty. To właśnie dokładnie wtedy, gdy wiele procesów toczy się jednocześnie, modelowanie komputerowe staje się użytecznym, a zwykle nawet koniecznym narzędziem badawczym.

Specjaliści od modelowania komputerowego z zakresu nauk społecznych, Andrzej Nowak, Agnieszka Rychwalska i Wojciech Borkowski [2013], na podstawie doświadczeń własnych i współpracowników utrzymują, że główną korzyścią z symulacji, jaką odnosi prowadzący je badacz (oprócz uzyskanych końcowych wyników rzecz jasna), jest wytworzenie sobie w trakcie ich przeprowadzania modelu mentalnego abstrakcyjnych procesów, które były symulowane. Autorzy odwołują się do wprowadzonego w kognitywistyce przez Philipa N. Johnsona-Lairda pojęcia **modelu mentalnego**. Z kolei wypracowanie takiego modelu prowadzi do głębszego zrozumienia danego zjawiska oraz nabycia umiejętności przewidywania zarówno zachowania systemu, jak i jego reakcji na zmiany parametrów czy inne zaburzenia. Można powiedzieć, że symulacje silnie rozwijają czy nawet racjonalizują intuicje badacza co do przedmiotu badań. Niemniej autorzy jednocześnie przestrzegają, że internalizacja symulacji komputerowych jako modelu mentalnego może też oznaczać (nieświadomą) internalizację ograniczeń czy uproszczeń obecnych w tych konkretnych symulacjach, co może grozić (podświadomym) uwzględnianiem ich w rozważaniach dotyczących danego modelu i zniekształceniem jego interpretacji. Do „zabawy” w symulacje, jak to określają autorzy, należy więc podchodzić z dużą dozą krytycyzmu, ostrożności i autokontroli. Generalnie jednak wspomniani badacze uważają symulacje komputerowe za jedno z najmocniejszych narzędzi w nauce, a prezentując liczne zalety modelowania komputerowego, cytują między innymi Joshuę M. Epsteina [2008], który wymienił aż siedemnaście (!) różnych celów (nie zamykając ich listy), do jakich może ono służyć naukowcom. Listę tę można uzupełnić jeszcze o trzy – niewymienione przez Epsteina – cele, wyróżnione z kolei przez lingwistów ewolucyjnych Christiansena i Kirby’ego: ewaluacja (istniejącej teorii), eksploracja (nowych obszarów badawczych) i egzemplifikacja („ucieleśnienie” teorii pozwalające „na żywo” obserwować jej działanie) [Christiansen, Kirby 2009, s. 323].

Modelowanie komputerowe jest korzystne także z tego względu, że wymusza na badaczach większą precyzję w formułowaniu hipotez,

a zarazem umożliwia ich testowanie w warunkach wirtualnych eksperymentów. Z jednej więc strony dla zaimplementowania teorii w formie programu wymagane jest, aby była ona wyrażona w pełni eksplicytnie, szczegółowo i precyzyjnie, a przede wszystkim, co oczywiste, niesprzecznie – inaczej program nie będzie działał. Sama już próba implementacji może okazać się użyteczna, pozwalając zidentyfikować ewentualne kłopotliwe fragmenty, niespójne z innymi czy niekompletne. Z drugiej zaś strony, gdy model zostanie już pomyślnie zaimplementowany, to pozwala nam badać dane zjawisko w rozmaitych i zawsze w pełni kontrolowanych warunkach: można zmieniać warunki początkowe i wartości dowolnych parametrów lub wypróbować różne warianty reguł działania, monitorując na bieżąco konsekwencje takich zmian. Ponadto symulacje dostarczają dużych ilości konkretnych i szczegółowych danych (których tak brakuje zwłaszcza w dziedzinie ewolucji języka), tworząc bazę do dalszej empirycznej weryfikacji teorii, a być może nawet stymulując poszukiwania nowych faktów umożliwiających ową weryfikację. I wreszcie generalnie cenne jest to, że symulacje komputerowe stanowią narzędzie badawcze o **charakterze ilościowym**, typowym dla nauk ścisłych, co być może pozwoli na podobnie intensywny rozwój także tych innych dyscyplin, których dotychczas nie cechował ów dynamiczny związek teorii z eksperymentem, tak charakterystyczny dla nauk przyrodniczych.

Oczywiście obok licznych zalet i użytecznych zastosowań, modelowanie komputerowe ma też swoje ograniczenia i wady [Cangelosi, Parisi 2002a, s. 12–15]. Zaliczyć do nich można na przykład konieczność abstrahowania i pomijania pewnych (zbyt złożonych lub mniej istotnych) aspektów danego problemu, a więc upraszczania, nieraz być może nadmiernego, symulowanych modeli, co często wynika z czysto praktycznych względów i technicznych barier, jakie napotyka ich realna implementacja. Takie wysoce wyidealizowane, niekiedy wręcz trywialne modele określa się mianem *toy models*, modeli-zabawek czy miniaterek. Ich zadaniem jest ujęcie tylko jednej lub kilku najistotniejszych charakterystyk modelowanego zjawiska, przy pominięciu wielu innych jego właściwości czy mniej istotnych czynników i procesów. Taki model nie ma (i nie może) odtwarzać pełnej złożoności rzeczywistego zjawiska, a tylko wybrane jego aspekty i mechanizmy, wytypowane tak, aby ułatwić jego zrozumienie. Z kolei ograniczona wielkość symulowane-

go modelu rodzi dodatkowo jeszcze pytanie o jego skalowalność: czy w wielkiej skali, przy odpowiednio zwielokrotnionych rozmiarach układu (na przykład tak, aby liczba agentów odpowiadała liczebności rzeczywistych populacji ludzi), jego działanie pozostałoby niezmienione? Odpowiedź na to pytanie nie zawsze jest jasna i oczywista.

Zwraca się też uwagę na pewną subiektywność i arbitralność dokonywanych abstrakcji i przyjmowanych założeń, jak też konkretnych szczegółów realizacji modeli komputerowych, takich jak na przykład wielkość modelu, wartości używanych parametrów, niuansy interakcji itp. Jako że mogą one wpływać na przebieg symulacji, powinny być *explicite* sformułowane i dobrze uzasadnione. Pomocne też może być systematyczne testowanie modelu w różnych wariantach i konfiguracjach, co pozwala zwykle dokładniej określić wpływ poszczególnych przyjętych założeń i parametrów na działanie modelu, umożliwiając jego bardziej obiektywną interpretację. Inny jeszcze niedostatek, na który wskazują niektórzy autorzy, to problem z zewnętrzną weryfikacją otrzymanych wyników. Analiza uzyskanych dużych ilości danych może być czasochłonna i trudna. Niekiedy bezpośrednie porównanie rezultatów symulacji z rzeczywistymi danymi w ogóle jest niemożliwe lub zbyt skomplikowane. Bez silniejszej integracji symulacji komputerowych z wynikami innych badań z powiązanych dyscyplin predykcyjny i eksplanacyjny potencjał modelowania komputerowego nie zostanie w pełni wykorzystany [Di Paolo *et al.* 2000]. Modelowanie komputerowe niewątpliwie ma do odegrania ważną rolę w badaniach ewolucji języka, ale powinno ją realizować, pozostając zawsze w ścisłym związku z rozważaniami teoretycznymi, eksperymentami, modelowaniem matematycznym czy gromadzeniem wszelkiego rodzaju przydatnych danych. Modelowanie nie może być wykorzystywane zamiast innych narzędzi badawczych, czy niezależnie od nich, ale zawsze – razem z nimi. Te różne taktyki poszukiwania rozwiązań problemów muszą współgrać i wzajemnie się inspirować. Wyniki symulacji mogą na przykład sugerować kolejne eksperymenty, poszukiwania dodatkowych danych czy nowe modele matematyczne – a same z kolei muszą się opierać na wynikach pozostałych badań [Christiansen, Kirby 2009, s. 323].

W każdym razie, jako jedyne w swoim rodzaju laboratorium do przeprowadzania wirtualnych eksperymentów, a zarazem jako efektywny sposób wyrażania skomplikowanych teorii i ich testowania oraz

wręcz nieodzowne narzędzie badania układów złożonych, modelowanie komputerowe staje się rzeczywiście powszechne, i to już nie tylko w dyscyplinach przyrodniczych. Lingwistyka ewolucyjna również nie uniknęła tej tendencji i nie ulega wątpliwości, że zastosowanie symulacji komputerowych do badania problemu powstania i ewolucji języka staje się coraz częściej stosowaną metodologią badawczą [Cangelosi, Parisi 2002b; Wagner *et al.* 2003; Vogt, de Boer 2010; Steels 2012a; Gong, Shuai 2013; Kirby *et al.* 2014; Grifoni *et al.* 2016]. Jak to ujął Andrew D.M. Smith [2014, s. 281]: „Computational simulations have been at the heart of the field of evolutionary linguistics for the past two decades”. Przykładowo, redaktorzy tomu zbiorowego pt. *Language Evolution* przyznają, że w ponad połowie rozdziałów z tej książki wykorzystane zostały w jakiś sposób wyniki symulacji komputerowych, i przewidują, że zainteresowanie nimi będzie w dalszym ciągu rosło [Christiansen, Kirby 2003b, s. 13]. W roku 2010 na ósmej konferencji z cyklu EVOLANG (najważniejszego w tej dziedzinie i zarazem najbardziej interdyscyplinarnego) około jedna trzecia wszystkich referatów opierała się, przynajmniej częściowo, na symulacjach [EvLing, b.r.]. Tao Gong *et al.* [2014b] mówią wręcz o „inwazji” modelowania komputerowego w lingwistyce ewolucyjnej.

Entuzjaści pomiarów naukometrycznych przedstawili na jedynastym EVOLANG-u wyniki swoich komputerowych analiz dotyczących tematyki poprzednich pięciu edycji tej konferencji [Bergmann, Dale 2016]. Używając metody zwanej *topic modeling*, automatycznie wyekstrahowali z kilkuset abstraktów referatów aż dwadzieścia różnych grup tematycznych, scharakteryzowanych przez zestawy wybranych terminów (niejako przy okazji znów potwierdzając multiinterdyscyplarność tej dziedziny, obejmującej rozmaite subdyscypliny podejmujące badania ewolucji języka na różnych płaszczyznach i z różnych perspektyw naukowych). Później na podstawie wyznaczonych korelacji utworzona została sieć powiązań między tematami, zaś algorytm analizujący jej strukturę modułową wyróżnił w niej trzy podstawowe moduły: pierwszy objął tematy, najogólniej rzecz biorąc, lingwistyczne, drugi badania porównawcze (ze światem zwierząt) oraz związane z muzyką lub gestami, i wreszcie trzeci zagadnienia ewolucji kulturowej. Trzeba przyznać, że wyniki uzyskane tu technikami naukometrycznymi wydają się adekwatne i intuicyjnie poprawne.

Następnie utworzona została jeszcze druga sieć, w której autorów referatów łączy relacja współautorstwa, a ponadto są też oznaczeni kolorem wskazującym, do którego z trzech modułów można zaliczyć ich badania (na przykład autorka niniejszej monografii również została uwzględniona w tym zestawieniu, a w owej sieci oznaczona jest na zielono, czyli została przypisana do modułu trzeciego). Pozwoliło to nie tylko zobaczyć, że istnieją różnej wielkości grupy mniej lub bardziej ściśle współpracujących ze sobą badaczy, ale w szczególności także to, że rzeczywiście kooperują ze sobą również autorzy z różnych modułów, czyli stosujący odmienne perspektywy badawcze – co jest bardzo cennym zjawiskiem w nauce w ogólności i bardzo charakterystycznym dla omawianej dziedziny w szczególności. Okazało się też, że największe *huby* tej sieci (tu: autorzy, a także ich grupy o największej liczbie powiązań z innymi) występują w module trzecim, czyli zajmują się problematyką ewolucji kulturowej (a jak sprawdzono bardziej szczegółowo, głównie zagadnieniem iterowanego uczenia się). Może warto tu zaznaczyć, że *huby* odgrywają w sieciach kluczową rolę, między innymi zapewniając w nich efektywny i szybki przepływ informacji.

Następnie dla poszczególnych węzłów tej sieci wyliczone zostały wartości parametrów sieciowych, takich jak centralność czy pośrednictwo. I znów, więcej autorów o dużej centralności lub pośrednictwie (to znaczy o ważnej czy wpływowej pozycji w sieci) znaleźć można w module trzecim. Statystycznie więc biorąc, to właśnie ten moduł dotyczący transmisji kulturowej języka okazuje się centralnym zestawem tematów badawczych poruszanych na EVOLANG-u; jest to więc taki *hub cluster*, w którym koncentruje się dużo istotnych badań (i wielu badaczy). Nawiasem mówiąc, pozwala to autorce z przyjemnością stwierdzić, że niniejsza jej praca plasuje się właśnie w tym ważnym nurcie badań w dziedzinie ewolucji języka. Autorskie modele i wyniki ich symulacji bardziej szczegółowo zostały omówione w rozdziałach 3, 4 i 5, przedtem jednak w podrozdziale 1.5. przedstawiony zostanie skrótowy przegląd i klasyfikacje różnych typów modeli stosowanych w lingwistyce ewolucyjnej.

1.5. Jakie symulacje

Za prekursora modelowania komputerowego w dziedzinie lingwistyki ewolucyjnej uważa się Jamesa Hurforda, który w artykule z roku 1989 przedstawił wyniki swoich pionierskich symulacji [Hurford 1989]. Ich celem było sprawdzenie, czy predyspozycja do tworzenia znaków saussure'owskich może być wrodzona (na przykład jako komponent LAD – *Language Acquisition Device* Chomsky'ego). Znak saussure'owski Hurford rozumiał tutaj jako dwukierunkową asocjację formy i znaczenia (przyporządkowanie wzajemnie jednoznaczne), stosowaną zarówno do produkcji sygnału, jak i jego interpretacji. Jak pokazała na prostym przykładzie, możliwa jest także skuteczna komunikacja oparta na dwóch odrębnych zestawach asocjacji jednokierunkowych (przyporządkowujących znaczenia formom i formy znaczeniom), stosowanych odpowiednio do produkcji i do interpretacji. W swoim modelu Hurford chciał więc zweryfikować tezę, że mechanizm konstruowania znaków saussure'owskich mógł wyewoluować ze względu na to, że ich stosowanie było korzystniejsze niż używanie innych (jednokierunkowych). Symulowana populacja podlegała ewolucji biologicznej, w której selekcionowane były osobniki najlepiej dostosowane, to jest o największych potencjałach komunikacyjnym i interpretacyjnym (gwarantujących w interakcjach z innymi osobnikami najwięcej sukcesów, polegających na byciu poprawnie zrozumianym przez innych oraz na właściwym zrozumieniu innych).

Wiedzę językową osobnika przedstawiają w modelu dwie macierze, jedna dla produkcji, druga dla interpretacji sygnałów. Macierze te określają odpowiednio prawdopodobieństwa, z jakimi dany osobnik produkuje poszczególne sygnały dla wyrażenia danego znaczenia albo też interpretuje dany sygnał jako wyrażający określone znaczenia. Można więc powiedzieć, że owe macierze reprezentują odpowiednie asocjacje jednokierunkowe (a ściślej – określają prawdopodobieństwo ich użycia). Kiedy odpowiadające sobie elementy obu macierzy, a_{ij} jednej oraz a_{ji} drugiej, są równe jedności, osobnik dysponuje w pełni wykształconą asocjacją dwukierunkową (a więc znakiem saussure'owskim), czyli do wyrażenia danego znaczenia używa zawsze tego samego sygnału, który sam interpretuje jako owo znaczenie. Jeśli zaś obie macierze są zero-jedynkowe oraz stanowią swoje transpozycje (czyli każdy element a_{ij} jed-

nej macierzy jest równy elementowi a_{ji} drugiej), to oznacza, że osobnik używa wyłącznie znaków saussure'owskich. Znajomość tych macierzy dla całej populacji pozwala na wyliczenie funkcji *fitness* każdego osobnika, czyli jego wspomnianych wyżej potencjałów – komunikacyjnego i interpretacyjnego.

Każda kolejna generacja nabywa wiedzę językową na podstawie prezentowanych im asocjacji z dwóch losowo wybranych zestawów próbek, pobieranych z językowych zasobów populacji. Zestaw produkcji zawiera po jednej (jednokierunkowej) asocjacji dla każdego znaczenia, a zestaw interpretacji – po jednej dla każdego sygnału, przy czym próbki te wybierane są z prawdopodobieństwami odzwierciedlającymi statystyczne tendencje w zachowaniu językowym populacji. Każdy osobnik stosuje przy ich przyswajaniu wrodzoną strategię nabywania języka, odziedziczoną po rodzicu. W modelu rozważane były trzy elementarne strategie uczenia się: imitacja, kalkulacja i saussure'owska; w populacji początkowej ich dystrybucja była równomierna. Strategia imitacji polega na skopiowaniu zaobserwowanych próbek produkcji i interpretacji odpowiednio do własnych macierzy produkcji i interpretacji (z zerowaniem pozostałych pól). Strategia kalkulacji wymaga obliczenia optymalnych własnych zachowań w oparciu o poznane próbki: prawdopodobieństwa poszczególnych interpretacji na podstawie obserwowanych produkcji, i odwrotnie – prawdopodobieństwa możliwych produkcji na podstawie obserwowanych interpretacji.

Zauważmy, że ani Imitator, ani Kalkulator nie próbują w żaden sposób dostosować swojej macierzy produkcji do macierzy interpretacji, a więc dany sygnał może być przez nich rozumiany jako pewne znaczenie, które jednocześnie sami wyrażają poprzez inny sygnał (czyli niekoniecznie używają znaków saussure'owskich). Zapewnia to jedynie strategia saussure'owska, polegająca na skopiowaniu obserwowanych produkcji jako własnych (jak przy imitacji), a następnie „odwróceniu” ich i zapisaniu jako interpretacji (podczas gdy próbki interpretacji są w przypadku tej strategii zupełnie ignorowane). Interesującą obserwacją jest fakt, że przy stosowaniu takiej strategii nigdy nie wygeneruje się synonimów (asocjacji różnych sygnałów z tym samym znaczeniem), natomiast mogą pojawić się homonimy (asocjacje tego samego sygnału z różnymi znaczeniami). Dzieje się tak, gdyż prezentowany zestaw produkcji obejmuje dla każdego znaczenia dokładnie po jednej

asocjacji, czyli po jednym sygnale, co wyklucza synonimię, natomiast sygnały te mogą się powtarzać, prowadząc do homonimii. Taka sytuacja jest analogiem zjawiska typowego dla języków naturalnych, w których absolutna synonimia jest wyjątkowo rzadka, podczas gdy homonimia jest powszechna (por. rozdział 4, w szczególności podrozdziały 4.1 i 4.4).

Kolejne generacje przechodzą więc zawsze taki sam cykl: narodziny, nabywanie zachowań komunikacyjnych w sposób wyznaczony przez wrodzone strategie, selekcja rodziców dla następnej generacji w oparciu o osobniczy potencjał komunikacyjny i interpretacyjny, reprodukcja i śmierć. Rozważane były rozmaite warunki początkowe, różniące się stopniem skorelowania w populacji indywidualnych systemów sygnalizacji. Przeprowadzone przez Hurforda symulacje wykazały, że ewolucja takich populacji prowadzi prawie we wszystkich tych przypadkach do zdominowania ich przez osobniki dysponujące strategią saussure'owską. Porównanie zaś dwóch pozostałych strategii pokazało, że strategia imitacji jest znacznie skuteczniejsza od kalkulacji. Co więcej, jednorodna populacja Kalkulatorów, nawet wyposażonych początkowo w identyczny system sygnalizacji, zapewniający im perfekcyjną komunikację (te same sygnały dla poszczególnych znaczeń), ewoluuje w taki sposób, że poziom sukcesów komunikacyjnych spada do zera. W przypadku Imitatorów, nawet startujących z losowymi macierzami, przy których początkowo brak sukcesów komunikacyjnych, z czasem następuje ich częściowe uzgodnienie i zwiększenie poziomu tych sukcesów. Natomiast Saussure'owcy w analogicznej sytuacji znów wypadają najlepiej, osiągając wyższy – niekiedy nawet maksymalny – poziom sukcesu komunikacyjnego (czyli dość dobrze lub nawet całkowicie uzgadniają swoje zachowania komunikacyjne). Hurford prezentuje oczywiście szczegółową dyskusję uzyskanych wyników, konkludując, że taka genetycznie przekazywana strategia nabywania prostego systemu komunikacyjnego, uwzględniająca dwukierunkowość znaków, jest znacznie korzystniejsza od innych możliwych strategii i właśnie tego rodzaju mechanizm mógł odegrać ważną rolę w początkowych etapach kształtowania się ludzkiej zdolności językowej. Notabene, niektóre z późniejszych prac (na przykład Ke *et al.* [2002b]) pokazały, że dla uzyskania znaków saussure'owskich (dwukierunkowych) nie jest konieczne stosowanie eksplicytnie zaprogramowanej strategii ich konstruowania, takiej

jak w modelu Hurforda, lecz mogą się one także wyłaniać spontanicznie w procesie samoorganizacji modelu agentowego.

W owym okresie jednak ten prekursorski i ważny artykuł Jamesa Hurforda, choć tak inspirujący, wcale nie pociągnął za sobą natychmiastowej lawiny komputerowych badań w dziedzinie lingwistyki ewolucyjnej. Kolejne ciekawe prace zaczęły się pojawiać dopiero około połowy lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Niezbędne były do tego, jak twierdzą niektórzy [Wang *et al.* 2004], jeszcze dalsze postępy w zakresie teorii gier, automatów komórkowych, sztucznych sieci neuronowych i ogólnie modelowania komputerowego, nie mówiąc już o rozwoju samej nauki o ewolucji języka, które dopiero mogły pobudzić i zintensyfikować badania tego rodzaju również w ramach lingwistyki ewolucyjnej. I rzeczywiście, dalej nabrały już one prawdziwego impetu, zwłaszcza po roku 2000. Poniżej przedstawionych jest kilka propozycji usystematyzowania tej mnogości istniejących już różnorodnych modeli komputerowych.

*

Jak już wiemy, głównym celem badawczym lingwistyki ewolucyjnej jest wyjaśnienie problemu wykształcenia się języka i jego struktury z prostszych form w procesie transmisji kulturowej. Opracowanych zostało już wiele różnego rodzaju modeli komputerowych ujmujących rozmaite aspekty tego zjawiska i symulowanych przy pomocy różnych technik. Według Barta de Boera większość tych technik można podzielić na trzy główne kategorie:

1. techniki optymalizacji,
2. algorytmy genetyczne,
3. systemy wieloagentowe,

przy czym niekiedy stosuje się również kombinacje tych technik (na przykład używa się algorytmów genetycznych dla zaimplementowania ewolucji agentów) [de Boer 2006].

1. Techniki optymalizacji. Stosując tego typu technikę, wyróżnia się pewien parametr systemu i dąży do zoptymalizowania go, czyli znalezienia przy zadanych warunkach ograniczających najlepszych jego możliwych wartości względem wybranego kryterium (na przykład próbuje się maksymalizować zyski lub minimalizować koszty). Zakłada się,

że wiele struktur językowych w pewnym sensie jest optymalnych; przykładowo dźwięki mowy mogą być optymalizowane pod względem akustycznej dystynktywności czy łatwości artykulacji, konstrukcje gramatyczne – według łatwości ich nabywania lub analizy. W odpowiednich modelach można więc badać, które z ewentualnych kryteriów optymalizacji mogłyby być relewantne w ewolucji języka. Potrzebna jest taka reprezentacja danego systemu językowego (na przykład zbioru dźwięków), której elementy można stopniowo modyfikować w poszukiwaniu optimum. Należy też wyznaczyć funkcję jakości, najlepiej w miarę łatwo obliczalną i gładką, której optimum następnie będzie poszukiwał wybrany algorytm optymalizacyjny. Działanie takich algorytmów jest zwykle podobne: mając najlepsze w danym momencie (tymczasowe) rozwiązanie, dokonują one drobnych zmian parametrów, przeszukując pobliską przestrzeń możliwych rozwiązań, a w przypadku natrafienia na jeszcze lepsze rozwiązanie zastępują nim to poprzednie i kontynuują ten proces. Różne w tych algorytmach natomiast mogą być sposoby wybierania owych alternatywnych rozwiązań – losowy, najszybszego wzrostu, symulowanego wyżarzania (jak na przykład w pracy [Lipowski, Lipowska 2005]) i wiele innych. Po znalezieniu optymalnego (lub dostatecznie dobrego) rozwiązania, można porównać postać uzyskanego finalnie systemu (przykładowo dźwięków) z rzeczywistym. Istotne ich podobieństwa wskazują na przyjęte kryteria optymalizacji, jako czynniki, które prawdopodobnie mogły odgrywać rolę w wyłanianiu się języka. Z techniki optymalizacyjnej korzystali na przykład Johan Liljencrants i Björn Lindblom [1972] w swoim modelu, który miał pokazać, że pewne uniwersalne tendencje językowych systemów samogłosek można wyjaśnić jako wynik optymalizacji ich akustycznej dystynktywności.

2. Algorytmy genetyczne. Algorytmy genetyczne również służą do wyszukiwania najlepszych rozwiązań w przestrzeni alternatywnych możliwości, jednak nie w oparciu o jedno tylko potencjalne optimum, lecz całą ich populację. Każdy osobnik z tej populacji (czyli możliwe rozwiązanie) jest reprezentowany przez swój genotyp (zwykle wektor bitowy), a według genotypu wyznaczany jest odpowiadający mu fenotyp. Dla fenotypów obliczana jest zależna od ich parametrów funkcja dostosowania (*fitness*). Osobniki najmniej dostosowane są usuwane z populacji, pozostałe zaś się rozmnażają. Genomy potomstwa general-

nie są kopiami genomów rodziców, jednak mogą też podlegać drobnym zmianom na skutek mutacji lub krzyżowania. Operacje selekcji i reprodukcji są wielokrotnie powtarzane, aż do znalezienia w trakcie tej ewolucji osobnika najlepiej (czy dostatecznie dobrze) dostosowanego, czyli optymalnego rozwiązania. Algorytmy genetyczne są bardzo skuteczne w przeszukiwaniu dużych przestrzeni rozwiązań. W kontekście rozwoju języka mogą być używane do badania dynamiki jego ewolucji tak biologicznej, jak i kulturowej. Jako przykład ich wykorzystania de Boer podaje model Redford *et al.* [1998], który objaśniał własności systemu sylab jako wyniku ograniczeń percepcji i produkcji. Symulowane były różne zestawy takich ograniczeń (w rodzaju: preferencji dla krótszych form lub prostszych zbitek spółgłoskowych, dążenia do maksymalnej dystynktywności itp.) wywierających presję selekcyjną na wyłaniające się wówczas układy sylab, dzięki czemu udało się odtworzyć systemy odpowiadające realnym systemom sylabowym.

Korzystając z technik optymalizacyjnych czy algorytmów genetycznych, zakłada się, że istnieje pewien parametr (tu – własność systemu językowego), który może podlegać optymalizacji. Jednak nabywanie czy produkcja języka przez ludzi nie polega przede wszystkim na optymalizacji nabywanego czy produkowanego języka. Ponadto język nie powinien być rozpatrywany tylko na poziomie indywidualnym, ale także na poziomie populacyjnym, czyli jako zbiór konwencji ustalanych we wspólnocie komunikacyjnej. Człowiek dostosowuje swoje zachowania językowe do obserwowanych przez siebie zachowań innych członków tej wspólnoty. To zaś oznacza występowanie bardzo silnych i skomplikowanych pętli sprzężeń zwrotnych pomiędzy poziomem osobniczym a populacyjnym, co sprawia, że cały ten układ staje się systemem złożonym (zob. też s. 36), w którym zresztą istotnie może wówczas dochodzić do optymalizacji różnych jego własności. Przebieg tak złożonych procesów i wyłanianie się w ich trakcie nowych, emergentnych właściwości trudno byłoby ująć w ramy matematycznych równań (nie mówiąc już o ich rozwiązywaniu), najłatwiej natomiast jest badać je za pomocą modeli wieloagentowych.

3. Systemy wieloagentowe. Agenty określa się jako niezależne fragmenty programu komputerowego, reprezentujące pewne autonomiczne jednostki, umieszczone w określonym środowisku (na ogół również symulowanym), z którego mogą one percypować sygnały i od-

powiednio na nie reagować, podejmując samodzielne decyzje. W szczególności agenty mogą też wchodzić w interakcje z innymi agentami. W przypadku modeli lingwistycznych agenty odpowiadają indywidualnym użytkownikom języka, są więc wyposażone w wiedzę językową i umiejętność odbierania i nadawania komunikatów językowych, jak również zdolność uczenia się. Zakres owej wiedzy i umiejętności zależy od konkretnego celu symulacji. W przypadku badania dźwięków mowy, na przykład, agenty powinny być zdolne do rozpoznawania, przyswajania i produkowania dźwięków. Populacja agentów może być homogeniczna albo też może mieć określoną jakąś strukturę (społeczną, przestrzenną, wiekową czy inną); może być stała lub otwarta i zmienna, to znaczy z dopływem lub wymianą agentów, ewentualnie może także podlegać biologicznym procesom ewolucyjnym (narodziny, reprodukcja, starzenie się, śmierć). Agenty mogą mieć określone rozmaite charakterystyki, niekoniecznie tylko te związane z ich umiejętnościami językowymi. Również ich interakcje mogą mieć charakter wyłącznie lingwistyczny albo zawierać też elementy pozajęzykowe.

Przy dużej liczbie agentów i opisujących je parametrów oraz jeszcze większej mnogości interakcji między nimi w trakcie symulacji układu można wygenerować olbrzymie ilości danych wyjściowych. Wprawdzie jest to kłopotliwe, ponieważ trzeba je wszystkie starannie i dogłębnie przeanalizować, zarazem jednak pomaga to zebrać statystycznie istotną liczbę informacji o zachowaniu systemu. Nie tylko więc jednorazowa symulacja musi trwać dostatecznie długo (typowo tysiące jednostek czasu, czyli pojedynczych kroków procedury symulacji, składających się z kolei z tysięcy interakcji agentów), ale także wielokrotnie powtarzane są niezależne przebiegi symulacji z różnymi (na przykład losowo zmienianymi) warunkami początkowymi. Śledząc podczas symulacji wartości rozmaitych parametrów, wyznacza się finalnie określone miary czy wskaźniki, których wielkość i przebieg zmienności wiarygodnie obrazują zachowanie systemu. Takimi miarami będą przykładowo, średnia dystynktywność dźwięków w systemie, liczba elementów badanego systemu językowego (dźwięków, słów itp.), średni sukces komunikacyjny w populacji czy poziom jednorodności językowej agentów (koherencji, to jest zestrojenia, ich leksykonów, reguł syntaktycznych, zestawów dźwięków itp.). Odpowiednie dla danego modelu wskaźni-

ki powinny być tak dobrane, aby miarodajnie pokazywały działanie modelu i zmiany, jakim wówczas podlega badany system językowy.

W stosowanym w lingwistyce ewolucyjnej modelowaniu wieloagentowym wyróżnić można dwa główne jego typy (mówi się tu nawet o „dominujących paradygmatach”), a mianowicie **modele gier językowych** oraz modele iterowanego uczenia. W tych pierwszych bada się zwykle duże populacje równorzędnych (to jest nieróżnicowanych pod względem statusu, funkcji itd.) agentów, początkowo na ogół niedysponujących językiem, który dopiero stopniowo wyłania się w trakcie ich interakcji jako wynegocjowany przez członków populacji zbiór konwencji. Agenty mogą się tu uczyć różnych elementów i właściwości języka – od głosek i sylab, przez wyrazy, do syntaksy. Charakterystyczny dla gier językowych jest horyzontalny przekaz informacji. Bardziej szczegółowo zostaną one przedstawione w rozdziale 2. Natomiast w **modelach iterowanego uczenia się** [Kirby *et al.* 2014] typowa populacja agentów składa się z dwóch generacji, pełniących odmienne role: „dzieci” uczą się języka od „dorosłych”. Następnie starsza generacja jest usuwana, a młodsza przejmuje jej funkcję i uczy następną generację. Cała ta procedura jest wielokrotnie iterowana, realizując wertykalny przekaz języka. Generacje są zwykle nieliczne, najczęściej po prostu jednoagentowe. Modele tego typu skupiają się więc na międzypokoleniowym przekazie języka (transmisja od „nauczycieli” do obserwujących ich „uczniów”), podczas gdy gry językowe kładą większy nacisk na sam proces komunikacji, modelując kognitywne i komunikacyjne aspekty bezpośrednich interakcji między agentami. Bart de Boer traktuje te dwa typy modeli jako ekstrema w przestrzeni dostępnych modeli agentowych, między którymi rozciąga się kontinuum możliwych do badania ich wariantów, z dowolną liczebnością populacji oraz dowolnym stosunkiem liczby transmisji horyzontalnych (wewnątrz generacji) do wertykalnych (między generacjami) [de Boer 2006, s. 396].

Jako przykład takiego mieszanego modelu de Boer wskazuje własny model systemu samogłosek, który w wersji podstawowej jest typowym modelem gier językowych, lecz w rozszerzonej zawiera także elementy iterowanego uczenia się. Jego agenty potrafią produkować i percypować samogłoski oraz uczyć się nowych lub modyfikować te, które mają w swoim repertuarze, w oparciu o wyniki interakcji z innymi agentami. Owe interakcje mają formę gry w imitację: agent-inicjator produkuje

samogłoskę ze swojego repertuaru, a agent-imitator próbuje ją naśladować, używając w tym celu takiej samogłoski ze swojego zestawu, którą uznaje za najbliższą tej percypowanej. Jeśli z kolei inicjator rozpozna ją jako identyczną z tą, którą sam wyprodukował, to interakcja kończy się sukcesem, a w przeciwnym przypadku porażką. W zależności od wyniku gry agenty modyfikują swoje repertuary tak, aby zwiększyć szansę przyszłych sukcesów; mogą wówczas usuwać lub dodawać nowe samogłoski, mogą je przesuwać w dostępnej ich przestrzeni (wyznaczonej parametrami artykulacyjnymi i akustycznymi) lub sklejać dwie zbyt bliskie sobie w jedną. Jak się okazuje, w wyniku tych powtarzanych wielokrotnie interakcji, w populacji wyłania się wspólny dla jej członków repertuar samogłosek, w dodatku podobny do występujących w rzeczywistości. Wspomniany wyżej model Liljencrantsa i Lindbloma (s. 57) objaśnia pewne własności systemów samogłosek jako wynik optymalizacji ich akustycznej dystynktywności. Model de Boera pokazuje, jak dochodzi do tej optymalizacji: pojawia się ona jako emergentna cecha w populacji oddziałujących ze sobą, a konkretnie w tym przypadku naśladujących się wzajemnie agentów, w wyniku samoorganizacji tego systemu w ramach ograniczeń warunkujących produkcję i percepcję (a zatem nie jest tu konieczne, nierealistyczne w istocie, eksplicytne optymalizowanie przez indywidualnych użytkowników języka). Model ten był też później modyfikowany przez dodanie wymiany pokoleniowej agentów, a więc i transmisji wertykalnej informacji, tak jak w modelach iterowanego uczenia się. Pokazano wówczas, że wyłoniony system samogłoskowy może pozostać stabilny także w otwartej, zmieniającej się populacji [de Boer 2000, 2006]. Dodajmy tu jeszcze, że wszystkie autorskie modele prezentowane w kolejnych rozdziałach tej monografii są modelami (wieloagentowymi) gier językowych. Jak się okazuje, wyniki uzyskane przez większość rozważanych modeli komputerowych świadczą o tym, że przekaz kulturowy, wymagania funkcjonalne i ogólne mechanizmy uczenia się mogą być nader pomocne (znacznie bardziej niż niegdyś przewidywano) w wyjaśnieniu wielu kwestii dotyczących własności języka czy jego ewolucji.

*

Paul Vogt [2009] jako ważne dla modelowania ewolucji języka wyróżnia z kolei dwa zasadnicze typy metod modelowania: makroewolu-

cyjne podejście analityczne oraz mikroewolucyjne modele wieloagentowe, które dalej dzieli na (ogólniejsze) agentowe modele analityczne i (bardziej szczegółowe) agentowe modele kognitywne. Te ostatnie uznaje za najbardziej realistyczne, jednak kosztem znacznego wzrostu ich złożoności obliczeniowej. Poniżej te wszystkie rodzaje modeli, różniące się poziomem ogólności oraz stopniem złożoności procesów i interakcji, które można w nich odtwarzać, omawiamy bardziej szczegółowo, zgodnie z powyższą ich klasyfikacją według Vogta, która w skrócie przedstawia się następująco:

1. makroewolucyjne analityczne,
2. mikroewolucyjne agentowe:
 - (a) agentowe analityczne,
 - (b) agentowe kognitywne.

1. Modele makroewolucyjne analityczne. Metoda analityczna polega na stosowaniu modelu matematycznego, który zwykle opisuje ewoluujący system za pomocą układu równań, tak że sam proces ewolucji może być opisany tylko na metapoziomie. Można w ten sposób badać, jak pewne językowe cechy czy formy rozprzestrzeniają się w populacji użytkowników języka i w jakich warunkach może się w ten sposób wyłonić stabilny system językowy. Typowe modele będą więc zawierać na przykład równania różniczkowe opisujące dynamikę zmian częstotliwości występowania pewnej własności lingwistycznej w populacji (zwykle zbyt skomplikowane do bezpośredniego rozwiązania, więc wymagające użycia metod analizy numerycznej). Modele te mogą wykorzystywać między innymi ewolucyjną teorię gier [Nowak, Komarova 2001], systemy dynamiczne [Abrams, Strogatz 2003], łańcuchy Markowa [Dowman *et al.* 2006] lub inne jeszcze techniki i koncepcje. Martin A. Nowak i Natalia L. Komarova badali na przykład, jak selekcja naturalna może prowadzić do wyłonienia się arbitralnych znaków, dwoistości (dwupoziomowości) struktury języka czy wreszcie syntaksy. Daniel M. Abrams i Steven H. Strogatz modelowali konkurujące języki o różnym statusie, szacując zmiany liczebności ich użytkowników; jak pokazały symulacje, nie mogą one stabilnie koegzystować, co nieuchronnie prowadzi do wymarcia jednego z nich. Mike Dowman *et al.* swoim modelem (Bayesowskiego) iterowanego uczenia się demonstrowali, że nawet słabe preferencje uczenia się (w tym przypadku

tendencja do regularności) mogą się pogłębiać w procesie kulturowej międzypokoleniowej transmisji języka i w efekcie wywierać silny wpływ na kształt formującego się języka i wyłanianie się jego uniwersalnych własności. W konsekwencji nie muszą być one objaśniane jako wyewoluowane biologicznie i wynikające z naszych wrodzonych i specyficznie językowych mechanizmów (takich jak organ językowy czy gramatyka uniwersalna Chomsky’ego). Wystarczy proces ewolucji kulturowej języków i ogólne (a nie specyficznie językowe) mechanizmy kognitywne. Co ciekawe, kluczową rolę odgrywa tu mechanizm tak zwanego wąskiego gardła (*bottleneck*), przez które muszą się „przeciskać” języki przekazywane między pokoleniami. Zjawisko to natomiast odpowiada w zasadzie tak zwanemu ubóstwu bodźców, czyli ich niedostatecznej dla poprawnego wyindukowania gramatyki ilości, odbieranej podczas nabywania języka – co z kolei było jednym z koronnych argumentów Chomsky’ego za konieczną wrodzonością języka.

Modele analityczne, aby były możliwe do przebadania, z konieczności nie mogą być zbyt skomplikowane; operują więc małą liczbą zmiennych i są deterministyczne w tym sensie, że warunki początkowe jednoznacznie wyznaczają stan układu w każdym kolejnym momencie. Ich prostota jest zaletą ze względu na łatwość analizy, ale też i słabością, gdyż ogranicza ona moc wyjaśniającą tych modeli. Pozwalają one uchwycić makroefekty (stany stabilne czy metastabilne układu, jego oscylacje czy bifurkacje itp.), natomiast nie wystarczają dla opisu złożonej dynamiki cechującej ewolucję języka. Nie śledzą one stanów pojedynczych użytkowników języka, tylko odsetek osobników w danym stanie; pomogą więc określić oczekiwane zachowanie populacji, ale już nie wyznaczyć cały zakres możliwych zachowań układu czy ich prawdopodobieństwo przy danych warunkach początkowych [Minett, Wang 2008, s. 34].

2(a). Modele agentowe analityczne. Dla takich bardziej szczegółowych badań lepszym narzędziem są modele wieloagentowe, w których każdy agent z osobna charakteryzowany jest analitycznie, czyli przez określoną formułę matematyczną. Globalne zachowanie takiego systemu nie jest już zdeterminowane przez jeden układ równań, lecz jego dynamika zależy od lokalnych interakcji indywidualnych agentów. Ze względu na wprowadzone do nich czynniki stochastyczne, niezależne symulacje układu startujące z tych samych warunków początkowych

mogą prowadzić do różnych stanów końcowych układu. Wiele takich przebiegów pozwala znaleźć różne możliwe stany stabilne i wyznaczyć ich względną częstotliwość. James W. Minett i William S. Wang rozszerzyli model konkurujących języków Abramsa i Strogatza o dwujęzyczność oraz strukturę społeczną danej populacji. Agentom są przypisane odpowiednie formuły definiujące prawdopodobieństwo (zależne od różnych parametrów), z jakim – one lub ich potomstwo – zmieniają stan (czyli uczą się drugiego języka). Badacze nie tylko potwierdzili wcześniejsze wyniki, ale też analizowali efekty stosowania różnych strategii ochrony języków zagrożonych wymarciem [Minett, Wang 2008].

2(b). Modele agentowe kognitywne. Jeszcze bardziej szczegółowy wgląd w zachowanie systemu zapewniają agentowe modele kognitywne, w których agenty nie są definiowane analitycznie, lecz są wyposażone w pewne kognitywne zdolności, zwykle pamięć i mechanizmy uczenia się oraz przetwarzania języka. Zaliczymy tu więc omawiane wcześniej modele gier językowych czy iterowanego uczenia się (s. 60). Złożoność tych systemów jest dużo większa niż agentowych modeli analitycznych, nie tylko ze względu na dużo większą liczbę zmiennych, którymi operują (dokładniejsze oszacowania podaje Vogt [2009, s. 241-242, 245-246]), ale również w związku z dużą liczbą mechanizmów wymagających implementacji dla zapewnienia agentom zdolności produkcji, interpretacji i uczenia się języka. W szczególności mogą one angażować skomplikowane nieliniowe procesy decyzyjne. Modele agentowe są bardziej szczegółowe i bardziej realistyczne niż analityczne, jednak ich złożoność pociąga za sobą mniejszą transparentność ich działania i oczywiście większe koszty obliczeniowe. Niewątpliwie jednak pozwalają one lepiej badać wpływ różnych społecznych i kognitywnych czynników na dynamikę ewolucji języków – ich wyłanianie się i dalszy rozwój.

Podsumowując, te trzy rodzaje modeli (analityczne, agentowe analityczne i agentowe kognitywne) pozwalają kolejno na coraz bardziej precyzyjny opis badanych zjawisk, a zarazem też zjawisk o coraz większym stopniu złożoności. Modele analityczne umożliwiają badanie bardzo ogólnych warunków, w których mogą występować pewne zjawiska językowe. W agentowych modelach analitycznych złożoność przenosi się z poziomu populacji na poziom osobniczy, co pozwala badać wpływ społecznych interakcji na dane zjawiska. Jednak ludzkich zdolności ko-

gnitywnych nie da się opisać formułami matematycznymi, stąd też niezbędne dla badania ich wpływu na ewolucję języków stają się agentowe modele kognitywne. Autorskie modele przedstawione w następnych rozdziałach niniejszej monografii należą właśnie do tej ostatniej kategorii.

*

W znakomitym artykule przeglądowym Kyle Wagner *et al.* [2003] omówili dotychczasowe komputerowe badania procesu wyłaniania się komunikacji w populacji agentów za pomocą mechanizmów uczenia się lub ewolucyjnych; ich wyniki można więc odnieść ogólnie do tworzenia się systemów komunikacji zwierząt, ale również do powstania i ewolucji języka. Autorzy podzielili wszystkie omawiane modele na cztery kategorie, w zależności od tego, czy agenci są usytuowane (*situated*) w (sztucznym) świecie oraz czy produkowane przez nie komunikaty mają jakąś strukturę (*structured*). Dla usytuowania agenta nie wystarcza przy tym samo jego osadzenie w jakimś środowisku i możliwość percepcji jego elementów lub innych agentów, ale wymagana jest także możliwość jakiegoś wzajemnego (kauzalnego) oddziaływania między nim a jego otoczeniem. Ma to wzmacniać ugruntowanie komunikacji tak, aby każde znaczenie było zakorzenione w zadanym świecie przez związek z jakimś jego obiektem lub stanem. Natomiast działalność agentów nieusytuowanych ograniczona jest wyłącznie do wysyłania i odbierania komunikatów. Komunikaty strukturalne składają się z mniejszych jednostek odpowiadających poszczególnym elementom znaczenia, podczas gdy niestrukturalne stanowią kompletne (holistyczne) całości (są pojedynczą jednostką albo ewentualnie zestawem niezależnych jednostek nadawanych odrębnymi kanałami i oddzielnie interpretowanych). W ten sposób autorzy podzielili modele wieloagentowe na następujące cztery kategorie:

1. nieusytuowane, niestrukturalne,
2. nieusytuowane, strukturalne,
3. usytuowane, niestrukturalne,
4. usytuowane, strukturalne.

Jak się okazuje, modele z tej samej kategorii mają wiele cech wspólnych, na przykład podobne zadania stawiane agentom lub analogiczne

procesy adaptacyjne, którym podlegają osobniki. W modelach nieusytuowanych osobniki potrafią tylko kodować i dekodować sygnały (czyli pełnią rolę wyłącznie mówców lub słuchaczy), a jedynym stawianym im zadaniem jest osiągnięcie możliwie najefektywniejszej komunikacji. Osobnicza adaptacja na ogół następuje poprzez uczenie się. Najbardziej typowe są tutaj interakcje między parami agentów. Natomiast w modelach usytuowanych agenty wywierają wpływ na otoczenie, w tym na inne agenty, a sygnały mogą być wysyłane i odbierane jednocześnie przez wiele z nich. W tym wypadku zadanie często nie dotyczy bezpośrednio komunikacji, lecz innych zachowań (takich jak znajdowanie pokarmu, unikanie drapieżników, szukanie partnerów, przesuwanie obiektów itp.), a komunikacja może być tylko przydatnym narzędziem służącym realizacji tego zadania, pojawiającym się zwykle w wyniku adaptacji ewolucyjnej. Agenty i ich behavior mogą być rozmaicie realizowane, na przykład jako automaty skończone, sieci neuronowe różnych typów, systemy reguł, pamięć asocjacyjna, tablicowanie i inne.

1. Modele nieusytuowane, niestrukturalne. Jako przykład modelu nieusytuowanego, niestrukturalnego można wskazać model wyłaniania się „pierwotnych słowników” w procesie imitacji, symulowany przez Jinyun Ke *et al.* [2002b]. Agenty dysponują tu zbiorami asocjacji typu obiekt-sygnał (czyli odwzorowaniami ze zbioru znaczeń w zbiór wyrażen językowych). Jeśli agenty w trakcie interakcji nie używają tego samego wyrażenia dla danego znaczenia, to uruchamiany jest proces imitacji, w którym jeden z agentów, postępując zgodnie z ustaloną strategią, może skopiować asocjację partnera do własnego słownika. Możliwe są różne strategie imitacji, na przykład losowe wyznaczanie jej kierunku (kto kogo imituje) albo też podążanie za ogólnymi trendami (naśladuje się wyrażenie partnera, o ile jest stosowane przez większość populacji), unikanie homonimów, naśladowanie autorytetów lub sąsiadów czy osobników starszych itp. Po dużej liczbie interakcji agentów w większości przebiegów symulacji (dla strategii imitacji losowej oraz strategii naśladowania trendu) następowało uzgodnienie słowników agentów, to znaczy używały one tych samych sygnałów dla wyrażenia tych samych znaczeń. Jednakże słowniki te zawsze były suboptymalne (por. [Nowak *et al.* 1999]), to znaczy niektóre sygnały odpowiadały więcej niż jednemu znaczeniu. Homonimów nie dawało się uniknąć nawet wtedy, gdy liczba dostępnych sygnałów była pięciokrotnie więk-

sza niż liczba obiektów. Jest to zgodne z obserwacją, że homonimy są powszechne w językach naturalnych (por. też rozdział 4). Należy także zaznaczyć, że wszystkie autorskie modele prezentowane w kolejnych rozdziałach niniejszej monografii należą do tej samej kategorii, czyli są modelami nieusytuowanymi, niestrukturalnymi.

2. Modele nieusytuowane, strukturalne. Tę kategorię może zilustrować model Kenny’ego Smitha *et al.* [2003]. Jest to jedna z wersji iterowanego modelu uczenia się (scharakteryzowanego ogólnie na s. 60), w której badano, jak język kompozycyjny może się wyłaniać z holistycznego systemu sygnałów. W systemie holistycznym sygnał jako całość reprezentuje kompletne znaczenie, inaczej mówiąc, żaden komponent sygnału nie odpowiada żadnemu składnikowi znaczenia. Natomiast w języku kompozycyjnym znaczenie całego wyrażenia jest funkcją znaczeń jego części. W omawianym modelu ustalony jest zestaw znaczeń, które są wektorami o stałej długości i dyskretnych wartościach liczbowych z zadanego zakresu (mają więc określoną strukturę), a sygnały (wyrażenia) są ciągami znaków. Komponentami znaczeń i sygnałów są także wektory i ciągi, określające jedną lub więcej ich wartości (składowych), które mogą też zawierać symbol wieloznaczny (*wildcard*), odpowiadający dowolnej wartości. Komponenty z symbolami wieloznacznymi autorzy traktują jako kompozycyjne, a pozostałe jako holistyczne.

Agenty w tym modelu reprezentowane są przez asocjacyjne sieci neuronowe, w których jeden zbiór węzłów odpowiada wszystkim znaczeniom i ich komponentom, a drugi – sygnałom i ich komponentom. Każdy węzeł pierwszego zbioru jest połączony z każdym węzłem drugiego, a połączeniom tym przypisane są wagi, które wyrażają moc asocjacji komponentów znaczeniowych z odpowiednimi składnikami wyrażań. Wagi korygowane są na etapie uczenia się języka przez agenta, który obserwuje wybrane losowo asocjacje (pary znaczenie-sygnał), wyprodukowane przez agenta z poprzedniej generacji. Proces ten jest powtarzany przez kolejne generacje, przy czym żaden agent nie zapoznaje się w toku uczenia się z całością języka, to znaczy nie poznaje wszystkich możliwych asocjacji. Zatem języki „przeciskają się” przez kulturowe wąskie gardło (*bottleneck*), co odpowiada ubóstwu bodźców, jakie odbieramy, nabywając język. Natomiast agent, który inicjuje tę iterowaną procedurę, startuje z pustą siecią, czyli nie zna jeszcze żad-

nego języka, a produkuje niezbędne sygnały dla znaczeń wyznaczonych mu do przekazania następcy w sposób czysto losowy (generując tym samym, jak uznają autorzy, holistyczny protojęzyk). Pomimo to po kilkudziesięciu czy kilkuset generacjach wyłania się język kompozycyjny, w którym w różnych asocjacjach tym samym komponentom znaczeniowym (czyli składowym wektora, który reprezentuje znaczenie) odpowiadają w analogiczny sposób te same komponenty sygnału (ciągi symboli); na przykład wszystkim znaczeniom (wektorom) o pierwszej składowej równej 1 będą odpowiadały sygnały zaczynające się od symboli *ab*. Należy tu jednak zauważyć, że już sama struktura stosowanych sieci asocjacyjnych, przewidująca występowanie między innymi komponentów kompozycyjnych, zakłada niejako wykreowanie tego rodzaju form. Podobnie zresztą nastawione na ich tworzenie są algorytmy indukcji i inwencji stosowane przez agenty do uogólniania poznanych asocjacji oraz analogicznego generowania nowych, używane w podobnym modelu Simona Kirby'ego [2001].

W każdym razie w powyższym modelu agenty nie podlegają ewolucji biologicznej ani żadnej presji typu funkcjonalnego, w szczególności nie dążą do osiągnięcia maksymalnego sukcesu komunikacyjnego ani wykształcenia języka o określonych własnościach czy komunikacji optymalnej pod jakimkolwiek względem. Realizowany jest tu wyłącznie kulturowy przekaz języka za pomocą mechanizmu iterowanego uczenia się. Zdaniem autorów mechanizm ten odpowiada za swoistą selekcję kulturową przekazywanych między generacjami języków (w odróżnieniu od selekcji naturalnej, której agenty tutaj w ogóle nie podlegają). W wyniku selekcji przeżywają języki o takich cechach, które umożliwiają im przejście przez wąskie gardło przekazu międzypokoleniowego. Jak się okazuje, cechą taką jest właśnie kompozycyjność: dzięki niej nie trzeba znać „na pamięć” wszystkich holistycznych asocjacji – co i tak jest niewykonalne wobec ubóstwa bodźców – wystarczy „rekonstruować” język analogicznie do poznanych przykładów jego użycia. Można więc powiedzieć, że kompozycyjność jest adaptacją języków w ewolucji kulturowej, jakiej podlegają w procesie transmisji międzypokoleniowej, zachodzącą w wyniku presji „wyuczalności”, wywieranej na języki w nieustannym (iterowanym) cyklu produkcji i uczenia się tychże języków przez kolejne generacje. Być może więc jednak, wbrew teorii Chomsky'ego, nabywamy język bez pomocy specjalnego orga-

nu językowego czy zakodowanej genetycznie w mózgu gramatyki uniwersalnej.

3. Modele usytuowane, niestrukturalne. Przejdźmy teraz do modeli trzeciej kategorii, czyli usytuowanych, niestrukturalnych. W modelach usytuowanych agenty nie tylko się komunikują, ale wchodzi też w jakieś interakcje ze środowiskiem i oceniane są raczej za skuteczność swojego działania niż za umiejętności komunikacyjne. Wiele tego rodzaju modeli częściej motywowanych było obserwacjami i hipotezami na temat systemów komunikacji zwierzęcej niż języka. Dlatego też występują tu zwykle problemy, takie jak: unikanie drapieżników, poszukiwanie partnera, żerowanie, dominacja, obrona terytorium itp. Najczęściej stosowanym mechanizmem adaptacji jest selekcja naturalna. Głównym problemem do wyjaśnienia pozostaje, jakie korzyści ewolucyjne odnoszą z komunikacji tak nadawca, jak i odbiorca sygnałów (inaczej komunikacja by się nie wykształciła). Niemniej modele te demonstrują, że możliwe jest wyłanianie się systemów sygnałów ugruntowanych, czyli powiązanych z samym agentem lub jego otoczeniem [Harnad 1990].

Jako przykład może tu posłużyć model Kyle'a Wagnera [2000], w którym autor bada, czy strategie kooperacji mogą prowadzić do powstania specyficznego systemu komunikacji, a mianowicie sygnałów pokarmowych (*food calls*). W dwuwymiarowym świecie komórkowym tego modelu agenty mogą przemieszczać się pomiędzy komórkami w poszukiwaniu pokarmu składowanego w niektórych z nich. Agent uzyskuje dostęp do pokarmu wyłącznie wtedy, gdy w danej komórce nie znajduje się sam, lecz razem z innym agentem. Agenty widzą pokarm i inne agenty tylko w tej komórce, w której aktualnie przebywają, za to słyszą (odbierają sygnały) także z dalszego otoczenia. Postępują zgodnie z regułami zapisanymi w swoim genomie, które percypowanym bodźcom przypisują określone akcje (wędruj, sygnalizuj, idź w kierunku sygnału, nic nie rób). Spożycie pokarmu oczywiście zwiększa dostosowanie (*fitness*) agenta. Z kolei emisja sygnału obciążona jest pewnym kosztem, obniżając dostosowanie. Brak tego kosztu powodował, że agenty ewoluowały w kierunku nieustannego sygnalizowania (w celu przyciągnięcia do siebie innych agentów – było to więc na ogół wysyłanie fałszywych komunikatów), a dalej uczyły się także ignorować odbierane sygnały jako nieniosące wartościowej informacji o pokarmie.

Wagner badał wpływ różnych wariantów warunków ekologicznych na wykształcanie się systemu komunikacji. Przykładowo, sygnalizacja wyłaniała się wówczas, gdy gęstość populacji nie była za wysoka – w tym bowiem przypadku agenty zbyt łatwo znajdowały towarzyszy niezbędnych im przy posiłku po prostu wędrując po okolicy (słuchanie sygnałów nie przynosiło więc specjalnych korzyści, a ich emitowanie było kosztowne). Innym warunkiem koniecznym do ewolucji sygnalizacji była odpowiednia obfitość pokarmu; gdy było go za mało, agent nie odnosił dostatecznych korzyści z ciągłego sygnalizowania w trakcie oczekiwania na inne agenty, które miałyby podążać za jego sygnałem (znów ze względu na koszt emisji sygnału agentowi może się jednak bardziej opłacać nie sygnalizować, lecz cierpliwie czekać, aż inny osobnik trafi do niego przypadkowo). W innych tego rodzaju modelach badano też sygnały alarmowe (które generalnie okazały się bardziej kosztowne od pokarmowych). Ważną obserwacją jest też stwierdzenie pozytywnej zależności między doborem krewniaczym a ewolucją altruistycznych sygnałów, zarówno pokarmowych, jak i alarmowych, a także powtarzająca się w wielu przypadkach konstatacja, że uczciwa komunikacja (polegająca na wysyłaniu wiarygodnych komunikatów, którym odbiorcy mogą zawierzyć) wyłania się tylko wtedy, gdy nadawanie sygnałów obarczone jest dla nadawcy pewnym kosztem.

4. Modele usytuowane, strukturalne. Najrzadziej symulowane są modele usytuowane, strukturalne, a więc te o największym stopniu złożoności; Wagner *et al.* [2003, s. 53] podają tylko cztery ich przykłady. Należy do nich zaliczyć także modele Angelo Cangelosiego. W jednym z nich [Munroe, Cangelosi 2002], na przykład, agenty reprezentowane przez (uczące się) sieci neuronowe „żerują” w środowisku, gdzie dostępne są po trzy rodzaje grzybów trujących oraz jadalnych. Przed spożyciem grzybów jadalnych dla każdego ich rodzaju trzeba wykonać inną akcję; tylko poprawne traktowanie każdego typu grzybów zwiększa dostosowanie (*fitness*) agenta. Agenty najlepiej dostosowane rozmnażają się bezpłciowo, przy czym ich potomstwo może podlegać mutacjom. Pierwsze generacje tylko uczą się rozpoznawać różne typy grzybów na podstawie informacji wizualnej. Dopiero w drugim etapie symulacji dopuszczona zostaje komunikacja między agentami a ich potomstwem, dzięki której dzieci podlegają uczeniu nadzorowanemu przez rodziców. Jak się okazuje, komunikacja zasadniczo przyspiesza proces uczenia się

przez dzieci rozróżniania grzybów. W toku ewolucji języka, implem-
towanego tu przez wagi połączeń między warstwami sieci neuronowej,
wyłaniają się w nim proste struktury typu obiekt-akcja; z tym że wy-
różnione od początku dwa odrębne klasterzy węzłów sieci neuronowej
narzucają niejako z góry taką dwuelementową strukturę. Niemniej jed-
nak w pierwszym klasterze w prawidłowy sposób wzmacniają się wagi
sześciu węzłów jako reprezentacji różnych gatunków (nazw) grzybów,
a w drugim klasterze – węzłów reprezentujących dwie podstawowe ak-
cje (predykaty *approach* i *avoid*) odpowiednio dla grzybów jadalnych
i niejadalnych.

Podsumowując swój przegląd, Wagner *et al.* [2003] stwierdzają, że
symulacje modeli właściwie z wszystkich czterech wyróżnionych przez
nich kategorii pokazują, iż elementarne systemy komunikacji mogą się
bez trudu wyłaniać w różnorodnych kontekstach, w populacjach po-
czątkowo niekomunikujących się, ale ewoluujących lub uczących się
agentów. W modelach nieusytuowanych łatwiej jest badać ogólne zasa-
dy tych procesów, ich dynamikę czy efektywność różnych technik trans-
misji sygnałów. Z kolei w usytuowanych wygodniej jest śledzić proces
przypisywania znaczeń sygnałom. Modele niestrukturalne ogólnie po-
twierdzają samą możliwość komunikacji albo też wskazują na rozmaite
naciski ekologiczne, wywołujące pojawienie się sygnałów, zaś struktu-
ralne demonstrują, jak w komunikatach może się wykształcać prosta
struktura (na przykład szyk jednostek odpowiadających poszczegól-
nym elementom znaczenia) albo też podział sygnałów na klasy („gra-
matyczne”); często następowało to wtedy, gdy liczba komunikowanych
sytuacji przekraczała liczebność repertuaru składników sygnału. Gene-
ralnie uzyskane struktury mają tu zawsze charakter sekwencyjny, a nie
hierarchiczny, nie reprezentują więc struktur frazowych ani zjawiska re-
kursji. Badano również wpływ na wyłanianie się systemów komunikacji
takich czynników, jak: błędy w procesie transmisji sygnałów, często-
tliwość ich prezentacji, złożoność sygnałów a łatwość ich produkcji,
rozbioru czy akwizycji, uczciwość komunikatów czy wreszcie czynni-
ki ekologiczne, geograficzne, demograficzne lub społeczne (na przykład
gęstość rozmieszczenia agentów, drapieżników i pokarmu; dobór sek-
sualny; związki pokrewieństwa itp.).

Uniwersalia językowe Hocketta. W swoim przeglądzie modeli
wyłaniania się systemów komunikacji Wagner *et al.* [2003] analizowali

je również pod kątem reprezentowanych w nich cech charakteryzujących język, których zestaw zaproponował Charles Hockett. Jego oryginalna lista siedmiu takich cech języka, których pełnego kompletu nie posiada żaden inny system komunikacyjny [Hockett 1959], była później rozszerzona do trzynastu [Hockett 1960] i dalej do szesnastu cech [Hockett, Altmann 1968; Hockett 1990]. Wreszcie ze względu na ich zróżnicowany charakter i odmienny sposób, w jaki wiążą się one z zachowaniami komunikacyjnymi, zaproponowano badanie ich w ramach nadrzędnej struktury obejmującej pięć grup (*frameworks*): kontekst społeczny aktów komunikacji, zachowania poprzedzające i konsekwencje aktów komunikacji, kanały komunikacji, repertuar sygnałów i ich struktura oraz przekaz systemu komunikacji i zmiany w nim zachodzące. Ponadto cechy nie muszą już być traktowane jako binarne, lecz raczej stopniowalne. Zakładając, że ich możliwe wartości (zakresy zmienności) wyznaczają odpowiednie wymiary, rozmaite systemy komunikacyjne można reprezentować jako punkty w odpowiedniej wielowymiarowej przestrzeni. Tego rodzaju schemat może służyć więc nie tylko do odróżniania języka od innych systemów komunikacji, ale też do precyzyjnej klasyfikacji pozostałych systemów.

Z kolei Wagner *et al.* [2003] oprócz uporządkowanych wymiarów proponują uwzględniać też zbiory, czyli nieuporządkowane zestawy dyskretnych wartości, jakie mogą przyjmować niektóre cechy. Taki zbiór (a nie kontinuum) mogą tworzyć na przykład różne możliwe sposoby nabywania systemu komunikacji, czyli różnego rodzaju procesy uczenia się lub ewolucyjne. Natomiast sposób transmisji systemu można by reprezentować w wymiarze ciągłym, wyrażając go ułamkiem określającym, jaka część tego systemu przekazywana jest kulturowo (a nie genetycznie). Strukturę komunikatów można by zaś oceniać na skali od niestukturalnych (atomowych), przez strukturalne o budowie czysto sekwencyjnej, po strukturalne o budowie hierarchicznej.

Wagner *et al.* [2003] ocenili więc prezentowane przez siebie modele komputerowe także pod względem tego, czy obejmują one wspomniane wyżej cechy Hocketta i czy pozwalają badać choćby jakieś ich aspekty. Jak twierdzą, każdy z modeli odnosi się tylko do nielicznych z nich, a cechy takie, jak: specjalizacja, dyskretność jednostek systemowych (przy fizycznej ciągłości sygnału) czy produktywność, jeśli w ogóle występują, to traktowane są bardzo pobieżnie; wreszcie żaden z omawianych

modeli nie uwzględnia zanikania sygnału, arbitralności ani przemieszczenia czasowo-przestrzennego. Zatem wszystkie te modele są pod tym względem dalekie od kompletności. Jak podkreślają autorzy, nie jest to właściwie zaskakujące, gdyż modelowanie komputerowe w ewolucji języka jest jeszcze tak młodą specjalnością, że pewna jej niedojrzałość jest całkiem zrozumiała („it is not surprising that many explorations are still in their infancy” [Wagner *et al.* 2003, s. 62]). Autorzy sugerują więc na przyszłość szersze podjęcie tej tematyki i bardziej dogłębną analizę nie tylko poszczególnych cech z listy Hocketta, ale zwłaszcza kombinacji wielu z nich, uważając to za bardzo obiecujący kierunek badawczy.

Do tej oceny można jednak zgłosić pewne zastrzeżenia. Po pierwsze, należy przypomnieć, że w modelowaniu zazwyczaj skupiamy się jedynie na wybranych aspektach danego zagadnienia i jego kluczowych czynnikach, nigdy nie reprezentując badanego zjawiska w pełnej jego złożoności, zarówno z powodu trudności technicznych, jak i dla uzyskania większej transparentności modelu, dzięki której łatwiej jest uchwycić, czy wręcz wypreparować, jego istotne własności i relacje oraz zrozumieć mechanizmy działania. Druga wątpliwość ma już charakter merytoryczny. Nie jest mianowicie wcale takie oczywiste, że układ cech zaproponowany przez Hocketta jest w ogóle dobrym punktem wyjścia do badania ewolucji języka. Obiekcje tego typu zgłaszają na przykład Sławomir Wacewicz i Przemysław Żywiczyński [2015]. Ich zdaniem teoretyczna perspektywa Hocketta jest w dużym stopniu niekompatybilna ze współczesnymi badaniami ewolucji języka, w związku z czym jego system klasyfikacji będzie miał ograniczone zastosowanie w lingwistyce ewolucyjnej. Wynika to, jak sądzą, głównie z tego, że Hockett ujmuje język raczej jako gotowy produkt niż złożony konglomerat sensomotorycznych, kognitywnych i społecznych umiejętności, które umożliwiają nabywanie i używanie języka przez żywe istoty (czyli zdolność językową – *faculty of language*). Dwie zasadnicze uwagi krytyczne, jakie zgłaszają Wacewicz i Żywiczyński wobec podejścia Hocketta, to jego nadmierne skupienie się na środkach komunikacji kosztem jej treści oraz na samym kodzie zamiast na zdolnościach kognitywnych jego użytkowników i kontekście społecznym jego użycia. Ogólnie więc, choć układ cech Hocketta spełniał ważną funkcję deskryptywną i jako taki odegrał już doniosłą rolę w językoznawstwie oraz semiotyce i biosemiotyce, to

jednak nie jest odpowiedni do czynienia rozróżnień między językiem a systemami komunikacyjnymi innych zwierząt z perspektywy ewolucyjnej.

*

Przegląd opracowany przez Wagnera *et al.* [2003] obejmował pierwszą dekadę modelowania komputerowego w ewolucji języka. Później pojawiały się oczywiście kolejne, na przykład Vogta (por. s. 61) czy Jaegera *et al.* [2009]. W tej ostatniej pracy przedstawiono klasyfikację modeli zbliżoną do omówionej przez Vogta, to jest podział na modele makroskopowe (tu wskazano na modele oparte na ewolucyjnej teorii gier) oraz agentowe, wśród których z kolei ze względu na ich dominujące aspekty – odpowiednio kulturowe, kognitywne oraz biologiczne – wyróżniono trzy podstawowe typy: modele iterowanego uczenia się, modele gier językowych i modele ewolucji genetycznej.

1. modele makroskopowe:
 - (a) oparte na ewolucyjnej teorii gier,
2. modele agentowe:
 - (a) iterowanego uczenia się,
 - (b) gier językowych,
 - (c) ewolucji genetycznej.

1(a). Modele oparte na ewolucyjnej teorii gier. Modele wykorzystujące ewolucyjną teorię gier (wspomniane już na s. 62) mogą też służyć do badania roli imitacji w procesie przekazu kulturowego. Naśladowanie form językowych (albo powtórne ich użycie – *re-use*) traktowane jest tu jako forma replikacji, która następuje z pewnym marginesem błędu. Dynamika ewolucyjna rozwija się w każdej populacji reprodukcujących się jednostek, o ile tylko występuje wśród nich zmienność w zakresie jakiejś dziedzicznej cechy oraz sukces reprodukcyjny jest skorelowany z tą cechą. W grach komunikacyjnych odpowiednim zachowaniom lub cechom przypisane jest więc prawdopodobieństwo ich imitacji, reprezentujące zarazem poziom ich kulturowego dostosowania (*fitness*). Przy pewnych dodatkowych założeniach o nieskończonej populacji i ciągłym czasie (choć faktycznie czas w grach zmienia się w sposób dyskretny) dynamika ewolucyjna może być opisana przez układ równań różniczkowych. W ewolucji języka takie równania będą

nieliniowe, gdyż *fitness* jednostek, a więc i cały proces selekcji, jest tu zależny od globalnego rozkładu częstości. Przykładowo, „przeżycie” neologizmu zależne jest od występowania innych słów o tym samym znaczeniu; ta sama zasada odnosi się także do jednostek językowych innych rodzajów – od fonemów po konstrukcje syntaktyczne. Selekcję zależną od częstości można modelować poprzez tak zwaną dynamikę replikatorów w ramach ewolucyjnej teorii gier [Maynard Smith 1982]. Poza analitycznym lub komputerowym rozwiązywaniem wspomnianych skomplikowanych układów równań, można też wówczas korzystać ze znanych już, udowodnionych w ramach tej teorii twierdzeń, pozwalających w przypadku niektórych typów gier bezpośrednio zidentyfikować ich zwycięskie strategie i stany ewolucyjnie stabilne, co jest zawsze podstawowym celem tego rodzaju analizy. Możliwe zastosowania tej teorii do badania ewolucji języka przedstawili przede wszystkim Martin A. Nowak i Natalia L. Komarova [Nowak *et al.* 1999; Nowak, Komarova 2001; Komarova, Nowak 2003], jak również Gerhard Jäger [2007; 2008], którzy dla populacji komunikujących się jednostek badali na przykład stacjonarne dystrybucje liczby użytkowników poszczególnych języków istniejących w systemie, dynamikę wyłaniania się wspólnego języka oraz jego cechy.

2(c). Modele ewolucji genetycznej. Modele gier językowych i iterowanego uczenia się (czyli modele agentowe z punktów 2(a) i 2(b)) zostały już pokrótce zaprezentowane wcześniej (s. 60). Trzeci typ modeli agentowych służy do badania roli czynników biologicznych, a konkretnie genetycznych aspektów transmisji języka. Zasady ich działania są analogiczne jak w omówionych wcześniej algorytmach genetycznych (s. 57). Agenty wyposażone są w genomy, które kodują leksykon lub gramatykę ich języka. Sukces komunikacyjny osiągną przez agenty we wzajemnych interakcjach determinuje ich *fitness*. Agenty lepiej dostosowane mają większe szanse na reprodukcję. Ich potomstwo może mieć genomy identyczne z rodzicielskimi albo zmodyfikowane przez mutacje lub krzyżowanie. Wprowadza to niezbędną zmienność w populacji, a dalej mechanizm selekcji umożliwia stopniowe rozprzestrzenianie się w niej cech zapewniających najlepsze dostosowanie. Jako przykład posłużyć może model omówiony na s. 70 [Munroe, Cangelosi 2002]. Jednak genetyczne zakodowanie leksyki czy gramatyki jest wysoce nieprawdopodobne z biologicznego punktu widzenia i w now-

szych modelach przyjmuje się słabsze założenia, na przykład o kodowaniu genetycznym tylko pewnych preferencji lub uniwersalnych ograniczeń na klasę możliwych języków. Dotyczy to między innymi modelu ENGA (*Evolutionary Neurogenetic Algorithm*) Eörsa Szathmáry’ego *et al.* [2007], który autorzy określają jako biomimetyczny, inspirowany takimi biologicznymi zjawiskami, jak ontogeneza mózgu, morfologia neuronów czy pośrednie kodowanie genetyczne. Ewoluuujące w tym modelu sieci neuronowe nie mają bezpośrednio zakodowanych swoich zasobów językowych, lecz nabywają je w procesie uczenia. Proces selekcji sukcesywnie prowadzi do rozwoju agentów dysponujących takimi zachowaniami komunikacyjnymi, które pozwalają im sprawnie radzić sobie z wymagającymi kooperacji zadaniami, z jakimi wiązała się wywierana na nie presja selekcyjna. Dzieje się tak pomimo tego, że zachowania te nie były *explicite* zakodowane w ich genomie; komunikacja wyłania się więc jako synergiczny czynnik zwiększający efektywność działania osobników, a tym samym ich dostosowanie. Należy tu jeszcze zaznaczyć, że do tej samej grupy zaliczyć też można autorski model przedstawiony w rozdziale 3, w którym populacja agentów również podlega ewolucji biologicznej.

*

Jeden z najnowszych przeglądów modeli komputerowych w ewolucji języka, Patrizii Grifoni *et al.* [2016], obejmuje lata 2003–2012, czyli kolejną dekadę w stosunku do opracowania Wagnera *et al.* [2003] (s. 65). Autorzy zasadniczo przyjęli klasyfikację Jaegera *et al.* [2009] (s. 74), nieco ją tylko modyfikując poprzez wyodrębnienie modeli ewolucji genetycznej w osobną kategorię (jako tak zwane modele wykorzystujące obliczenia ewolucyjne – *evolutionary computation-based models*):

1. modele teoriogrowe,
2. modele agentowe:
 - (a) iterowanego uczenia się,
 - (b) gier językowych,
3. modele ewolucyjne:
 - (a) algorytmy genetyczne,
 - (b) ewolucja gramatyczna,

gdź jak zauważyli, obecnie stosuje się jeszcze inne – poza algorytmami genetycznymi – algorytmy ewolucyjne (takie, jak programowanie ewo-

lucyjne, strategię ewolucyjną, neuroewolucję i inne), aczkolwiek w kontekście ewolucji języka wyszczególnione zostały przez nich jeszcze tylko modele ewolucji gramatycznej.

3(b). Modele ewolucji gramatycznej. Przykładowe systemy tego rodzaju to LEVER [Juergens, Pizka 2006] czy (GE)² [O'Neill, Ryan 2004]. Ewolucja gramatyczna to forma programowania genetycznego (które służy do automatycznego generowania kodu komputerowego), wykorzystująca gramatyki formalne, a konkretnie bezkontekstowe, do opisu struktur generowanych w procesie ewolucji [GET, b.r.]. Zaimplementowano systemy produkujące fragmenty kodu w takich językach, jak: Lisp, Prolog, C++, Java, Postscript czy ENGLISH. Ewoluujące w typowy sposób, przez mutacje i krzyżowanie, genotypy w formie łańcuchów binarnych lub całkowitych są odwzorowywane w odpowiadające im fenotypy, czyli programy, w oparciu o zadaną gramatykę BNF (to jest w notacji Backusa-Naura), definiującą docelowy język programowania. Selekcja następuje jak zwykle na podstawie wyznaczonych dla nich wartości funkcji dostosowania, zależnych już od konkretnego zadania, które szukany program ma rozwiązywać. Szczególnego rodzaju zadaniem może być nawet generowanie kolejnej gramatyki bezkontekstowej (na przykład definiującej łańcuchy binarne), dla której wyjściowa gramatyka jest wówczas rodzajem metagramatyki; taki właśnie model opracowali Hemberg *et al.* [2008].

Kończąc powyższy przegląd różnych typów modeli komputerowych stosowanych w lingwistyce ewolucyjnej i proponowanych ich klasyfikacji, należy jeszcze zauważyć, że modelowanie komputerowe to dyscyplina rozwijająca się niezwykle szybko i wielopłaszczyznowo. Wciąż rozwijane są nowe techniki i metodologie, jak i kolejne pola badawcze, na których można je stosować. Niewątpliwie przedstawione tu klasyfikacje wkrótce trzeba będzie znów rozszerzać i modyfikować. Odnosząc je natomiast do modeli przedstawionych w następnych rozdziałach, można te autorskie systemy scharakteryzować następująco: są to mikroewolucyjne modele agentowe kognitywne, które – dokładniej mówiąc – są modelami gier językowych (a konkretnie: gry w nazywanie), z czego jeden jest ewolucyjny; wszystkie zaś są nieusytuowane i niestrukturalne.

2.

Gry językowe

*A basic task of science is to build models –
simplified and abstracted descriptions –
of natural phenomena*

Richard K. Belew *et al.*

Rozdział ten rozpoczyna ogólna charakterystyka gier językowych jako modeli negocjowania konwencji językowych. Omówiona dalej koncepcja gier językowych Ludwiga Wittgensteina stanowi dodatkowy argument za tym, że modele te są doskonałym narzędziem do badania zachowań językowych i języka. Następnie zaprezentowany jest teoretyczny schemat cyklu semiotycznego, zaproponowany przez Luca Steelsa do opisu interakcji w grze, jak również podstawowe kategorie gier językowych, wyróżnione przez niego ze względu na cel komunikacyjny. Przedstawiona jest także, opracowana przez Pietera Wellensa, klasyfikacja gier według typu problemu konwencjonalizacji wraz z różnego rodzaju strategiami, pozwalającymi rozwiązywać poszczególne problemy. Z kolei bardziej szczegółowo przeanalizowane i porównane zostały podstawowe strategie stosowane w grze w nazywanie. Na koniec wreszcie dokładniejsza dyskusja wybranych modeli gier językowych przybliżyła pewne istotne zagadnienia pojawiające się w kontekście tych badań.

2.1. Ogólna charakterystyka

Twórcą modelu gier językowych jest Luc Steels, który od lat jednocześnie kieruje Laboratorium Sztucznej Inteligencji na uniwersytecie w Brukseli oraz Laboratorium Komputerowym firmy Sony w Paryżu. Pierwsze komputerowe implementacje tych modeli zrealizował w połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku [Steels 1995, 1996], a zaraz potem pojawiło się wiele kolejnych, autorstwa samego Steelsa, jak również jego współpracowników (por. np. relację Vogta [2000, s. 19 i n.]). W ostatnim piętnastoleciu modele te cieszyły się dużym zainteresowaniem szerokiego grona badaczy z wielu różnych ośrodków naukowych (zob. też s. 104).

Pojedyncza gra językowa to interakcja komunikacyjna między dwoma agentami, przebiegająca według określonego scenariusza i kończąca się sukcesem (odpowiadającym „porozumieniu się” agentów) albo porażką (w przeciwnym przypadku). Szczegóły tej interakcji mogą być rozmaicie definiowane w różnych typach gier językowych. Taka gra jest wielokrotnie rozgrywana między kolejnymi parami agentów. Dzięki temu modele gier językowych mogą być wykorzystywane do badania, w jaki sposób duża liczba użytkowników języka może zsynchronizować swoje zachowania językowe i osiągnąć konsensus co do sposobu użycia poszczególnych form językowych (na przykład fonemów, słów lub konstrukcji gramatycznych), działając wyłącznie lokalnie, bez żadnej odgórnej kontroli czy centralnego sterowania. Kluczowym problemem jest wówczas ustalenie, czy możliwe jest wyłonienie się w tej sytuacji globalnych, to jest wspólnych dla całej populacji, konwencji językowych? Szukając odpowiedzi na to ogólne pytanie, w konkretnych realizacjach tego modelu można analizować poszczególne aspekty czy typy wyrażeń językowych (przykładowo: nazwy własne, nazwy kolorów, gestów itp., kwantyfikatory, wskaźniki przypadku, relację zgody itd.) z punktu widzenia możliwego ich wyewoluowania w warunkach ugruntowanej komunikacji użytkowników języka.

Tego typu modele implementowane są jako tak zwane systemy wieloagentowe, podobnie jak (między innymi) modele iterowanego uczenia się. W tych ostatnich (zob. s. 60), i ogólnie w modelach inspirowanych koncepcjami ewolucji biologicznej, na przykład wykorzystujących ewolucyjną teorię gier (s. 62 i 74) lub ewolucję genetyczną (s. 75), język

przekazywany jest wertykalnie, czyli międzypokoleniowo. W ewoluującej populacji wyróżnia się kolejne generacje rodziców i dzieci oraz narzuca się kierunek transferu języka od starszych do młodszych. Można też rozważać transfer diagonalny, to jest zachodzący w obrębie stałej populacji (jednego pokolenia), w której jednak wyróżnia się dwie odrębne grupy, to znaczy nauczycieli i uczniów, między którymi komunikacja znów zachodzi tylko w jednym kierunku. Zakłada się tu *implicite*, że grupa rodziców czy nauczycieli jest w pewnym stopniu językowo zsynchronizowana; niekiedy zresztą jest po prostu jednoagentowa.

Natomiast w paradygmacie gier językowych transmisja języka zachodzi horyzontalnie, to znaczy między osobnikami z jednorodnej populacji, w której każdy może być i odbiorcą, i nadawcą komunikatów. Zakłada się, że język może wyłonić się w procesie jego kulturowego przekazu dzięki werbalnym i niewerbalnym interakcjom równorzędnych partnerów (ang. *peer-to-peer*), znajdujących się w tym samym środowisku. Agenty są wyposażone w odpowiednie własności i funkcje, a wielokrotnie wchodząc ze sobą (na ogół parami) w interakcje, realizując kulturowy przekaz języka między osobnikami. Agenty, wykorzystując różne mechanizmy uczenia się, stale modyfikują i adaptują swoją wiedzę językową, tak aby maksymalizować sukcesy komunikacyjne przy minimalizacji nakładów. Język, który się w ten sposób wykształca, nie powstaje w oparciu o jakieś z góry ustalone reguły, lecz na podstawie praktyki językowej, to jest użycia języka w konkretnych sytuacjach (por. znaczenie jako użycie [Wittgenstein 2000], także *usage-based approach* [Tomasello 2009]). Innymi słowy, proces wyłaniania się języka nie jest tu odgórny (*top-down*), lecz oddolny (*bottom-up*) i opiera się na mechanizmach selekcji i samoorganizacji.

Powstający w ten sposób język jest złożonym systemem adaptacyjnym (zob. też s. 35–46). Dla systemu złożonego nie da się wywieść z reguł określających działanie poszczególnych jego części zachowania systemu jako całości. System adaptacyjny zaś przejawia zmienność ukierunkowaną na dostosowanie się do warunków. Tego typu układy jest bardzo trudno, lub wręcz niemożliwe, opisać w sposób analityczny. W ramach językoznawstwa takie próby są co prawda podejmowane (w szczególności w jego nurcie generatywnym), ale dają one jedynie częściowy i ograniczony obraz języka. Przede wszystkim bowiem jest to obraz statyczny, obraz języka jako niezmiennego układu, wyznaczonego

przez ustalony zestaw reguł leksykalnych i syntaktycznych. Natomiast w ramach lingwistyki ewolucyjnej (tak jak generalnie w nurcie funkcjonalnym i kognitywnym językoznawstwa) bada się język jako system dynamiczny, system, który się kształtuje i rozwija. Istotnie, przecież język nieustannie się zmienia, i to na różnych poziomach – na poziomie wspólnotowym, gdzie niektóre konwencje językowe wychodzą z użycia, a pojawiają się i stopniowo rozprzestrzeniają nowe, jak również na poziomie indywidualnych użytkowników, którzy stale się adaptują do zmieniających się warunków. Nawet znając warunki początkowe takiego układu oraz zasady określające działanie jego elementów, nie jesteśmy w stanie przewidzieć, jak populacja jako całość rozwiąże problemy konwencjonalizacji (czyli ustalania konwencji językowych). Globalne konwencje pojawiają się bowiem jako efekt, w pewnym sensie uboczny, zlokalizowanego użycia języka (*situated language use*). Dynamikę takich złożonych systemów adaptacyjnych trudno jest zbadać inaczej, niż symulując ich działanie, czy ściślej działanie ich modeli, które siłą rzeczy będą zawsze pewną wyidealizowaną ich reprezentacją, opisem uproszczonym i cząstkowym, bo biorącym pod uwagę zaledwie niektóre – często nawet tylko pojedyncze – aspekty danego systemu.

2.2. Gry językowe Wittgensteina

W lingwistyce ewolucyjnej, a w każdym razie w dominującym obecnie jej nurcie, zakłada się ścisły związek między językiem, jego powstaniem i rozwojem, a **komunikacją**. Język jest używany do komunikowania się, do interakcji z innymi jego użytkownikami, umożliwiając partnerom osiągnięcie ich celów. Takie interakcje zachodzą między co najmniej dwoma interlokutorami i są osadzone w określonej sytuacji (kontekście). Znaczenie zastosowanym przez partnerów wypowiedziom nadaje właśnie ich użycie w danych warunkach (tak jak znaczenie słowa *wapno* będzie odmiennie rozumiane, zależnie od tego, czy słowo to użyte zostało w aptece czy na budowie). Zwróćmy uwagę, że stosunkowo łatwo radzimy sobie z wieloznacznością słów czy fraz – właśnie interpretując je w kontekście. Natomiast trudno jest zdefiniować znaczenia słów w jakichś absolutnych terminach, niezwiązanych z czynnikami

zewnątrznymi – właśnie dlatego, że nie wywodzą się one z żadnych niezależnych od ich użycia abstrakcji, lecz wyłaniają się z konkretnych interaktywnych sytuacji.

Zauważmy, że jest to podejście zbieżne z koncepcją Ludwiga Wittgensteina **znaczenia jako użycia**. Autor *Dociekań filozoficznych* pisze w §10 (s. 13): „Cóż więc oznaczają wyrazy tego języka? – Jakżeż miałyby się to ujawnić, jeżeli nie w sposobie ich użycia?”, albo w §43 (s. 43): „[...] znaczeniem słowa jest sposób użycia go w języku”, a według §340 (s. 157), aby poznać, jak słowo funkcjonuje, trzeba przyjrzeć się, jak jest używane [Wittgenstein 2000]. Język to narzędzie służące nam do komunikacji; by go rozumieć, trzeba znać reguły użycia słów i konfrontować je z kontekstem, w którym te słowa zostały przekazane. Tak jak figury szachowe nie mają samodzielnego znaczenia, a tylko to określone przez reguły ich użycia w grze (przy czym zmiana tych reguł prowadzi do odmiennej gry), tak słowa mają znaczenie tylko w kontekście wypowiedzi, zaś ich rozumienie jest zdolnością użycia ich dla określonych celów. „Słowo to instrument, którym ludzie oddziałują wzajemnie na swe zachowanie; a jego znaczenie to po prostu sposób, w jaki ono na to zachowanie wpływa” [B. Wolniewicz we wstępie do: Wittgenstein 2000, s. XXI].

Zacytujmy jeszcze fragment §5 (s. 10) *Dociekań*: „[...] ogólnikowe pojęcie o znaczeniu słów otacza funkcjonowanie języka obłokiem mgły uniemożliwiającym jasne widzenie sprawy. – Mgła się rozproszy, gdy zjawiska językowe studiować będziemy w ich wersjach prymitywnych, w których cel i funkcjonowanie wyrazów leżą jak na dłoni. Takich właśnie prymitywnych postaci języka używa dziecko uczące się mówić. Nauczanie języka nie jest tu objaśnianiem, lecz tresurą”. Tak więc za wygodne narzędzie badania języka Wittgenstein uznał **gry językowe**, czyli skonstruowane lub wyodrębnione w języku uproszczone modele różnych praktyk językowych, dla których da się określić kierujące nimi reguły. Takie gry (albo, jak czasem mówi Wittgenstein, **języki prymitywne**) mają na celu naświetlenie związków, analogii i różnic z naszym użyciem języka, mają więc w prostszym kontekście ujawnić własności analogiczne do pełnego języka w sposób wolny od nieistotnych komplikacji związanych z użyciem potocznym [Kawalec 2015]. „Nasze jasne i proste gry językowe nie są studiami wstępnymi do przyszłej reglamentacji języka – niejako pierwszymi przybliżeniami nie uwzględniającymi

tarcia ani oporu powietrza. Gry te są raczej obiektami porównawczy-
mi, które dzięki podobieństwu albo niepodobieństwu, mają rzucić świa-
tło na panujące w naszym języku stosunki” [Wittgenstein 2000, §130,
s. 77].

Można stwierdzić, że według Wittgensteina, dla rozumienia języka
nie ma znaczenia to, czy język jest prosty czy złożony, ani też na je-
go rozumienie nie wpływa analiza jego struktury. Wittgenstein sądzi,
że przeznaczenie narzędzi językowych nie jest związane z fizycznym
nośnikiem, a to dlatego, że jedynym jego wyznacznikiem jest to, czy
i jakie działanie zostanie wyzwolone przez język. Bez języka nie może-
my wpływać na innych ani inicjować działań. Wyrażenia językowe to
narzędzia, których przeznaczeniem jest kreowanie pożądaných działań
i sterowanie nimi [Wiertelwska-Bielarz 2010, s. 82].

Przykład gry językowej podaje Wittgenstein [2000] już w §2 (s. 8-9):
„Wyobraźmy sobie język, [...] język ów służyć ma porozumiewaniu się
budowniczego A ze swym pomocnikiem B. A składa jakąś budowlę
z bloków kamiennych, wśród których są kostki, słupy, płyty i belki.
B ma podawać bloki, i to w takiej kolejności, w jakiej A ich potrze-
buje. W tym celu posługują się oni językiem składającym się ze słów:
«kostka», «słup», «płyta», «belka». A wykrzykuje te słowa – B przy-
nosi blok, który na dany okrzyk nauczył się przynosić. Potraktuj to
jako kompletny, prymitywny język”.

Wittgenstein nie formułuje nigdzie, na czym mianowicie polega
istota gry językowej (tym samym zaś i języka), co więcej – uważa,
że nie da się jej jednoznacznie zdefiniować. Nie da się określić jakie-
goś sedna wspólnego dla wszystkich gier, można jedynie powiedzieć,
że są one do siebie podobne pod różnymi względami – że są ze sobą
rozmaicie spokrewnione. Filozof podkreśla jednak jako jedną z najistot-
niejszych cech gry językowej jej zupełność: mimo że prymitywna, nie
jest fragmentem całości, lecz samodzielną całością. Można też przyjąć,
że na grę językową składają się słowa (i sposoby ich użycia, czyli reguły
gry), gesty, miny, pozy i inne pozalingwistyczne środki przekazu, kon-
tekst, aktywność związana z realizacją gry, wreszcie użycie, cel użycia
i funkcje danych środków – ale także uczenie się gier, którego podstawą
jest trening [za Kawalec 2015]. Zwłaszcza wypowiedanie słów okazu-
je się zaledwie jedną z wielu czynności wykonywanych w trakcie gry
językowej. Jak mówi autor *Dociekań filozoficznych*: „«Grą językową»

nazywać też będą całość złożoną z języka i z czynności, w które jest on wpleciony” [Wittgenstein 2000, §7, s. 12].

A ile jest możliwych gier językowych? Niezliczona ilość – bo wyrażen językowych (nawet tych samych) możemy używać na niezliczone sposoby. Możemy stwierdzać, pytać, rozkazywać, ale też odpowiadać i działać według rozkazu, opisywać przedmiot lub sporządzać go wedle opisu, zdawać raport ze zdarzenia lub snuć na jego temat domysły, wysuwać hipotezy i sprawdzać przewidywania, opowiadać wymyśloną historyjkę lub odgrywać scenkę, śpiewać, zadawać zagadki lub je rozwiązywać, opowiadać dowcipy, przedstawiać zadania i problemy lub je rozwiązywać, tłumaczyć z innych języków, prosić, dziękować, przeklinać, witać, modlić się itd. I co ważne, mnogość ta nie jest stała, gdyż wciąż powstają nowe gry językowe, a inne stają się przestarzałe i idą w zapomnienie [Wittgenstein 2000, §23, s. 20-21].

Podsumowując, możemy chyba się zgodzić z opinią Marty Wołos [2002, s. 73], że model gry językowej jako potencjalne narzędzie językoznawcze wydaje się posiadać wyjątkowo szeroki zasięg, umożliwiającą całościowe i nowoczesne spojrzenie na język, z uwzględnieniem zdobyczy ważnych obecnie i produktywnych dziedzin, w których badany jest język, w szczególności kognitywizmu, pragmatyki językowej, antropologii językoznawczej, psychologii komunikacji, socjologii czy teorii komunikacji niewerbalnej. Ta syntetyczność i interdyscyplinarność ujęcia kwestii języka (i życia) sprawiają, że koncepcja Wittgensteina wyprzedza inne tego rodzaju podejścia o przeszło pół wieku. Reprezentuje ona sposób patrzenia na język charakterystyczny dla nurtu zwanego funkcjonalistycznym (albo integracjonistycznym), w którym przedstawia się język w ujęciu procesualnym, uwzględniającym nie tylko wyrażenia językowe, ale i użytkowników języka, ich intencje i sposób użycia komunikatów werbalnych i niewerbalnych, jak też cały kontekst interakcji – w odróżnieniu od nurtu autonomistycznego (czy segregacjonistycznego), w którym język badany jest jako statyczna i zamknięta struktura, z pominięciem wszelkich uwikłań konsytuacyjnych i aktywności komunikujących się podmiotów – a więc nie w postaci takiej, w jakiej się faktycznie przejawia [Wołos 2002, s. 35].

2.3. Cykl semiotyczny

Zatem gry językowe mogą stanowić wygodne narzędzie do badania zachowań językowych i języka, który się w nich pojawia. Model ten jest intensywnie wykorzystywany w komputerowych symulacjach wyłaniania się języka, gdyż takie schematyczne interakcje zapewniają prostotę modelowania, nie upraszczając nadmiernie (jeśli wierzyć Wittgensteinowi) kwestii zmienności i złożoności języka. Gry te, rozumiane jako zrutynizowane (to jest przebiegające według określonego scenariusza) i powtarzalne interakcje między co najmniej dwoma agentami, muszą być osadzone w konkretnej sytuacji. Powinny też być adaptatywne, bo język nie jest tworem zamkniętym i stałym, lecz przeciwnie – jest otwarty i zmienny. Nieustannie rozwija się i różnicuje w obrębie populacji, tak jak podlegają ciągłym zmianom języki poszczególnych jego użytkowników. W trakcie interakcji partnerzy zwykle dostosowują do siebie wzajemnie swoje zachowania językowe, tak aby skutecznie się komunikować; innymi słowy, występuje tu zjawisko dostrajania się (*alignment*). Interlokutorzy mogą przy tym modyfikować lub poszerzać swoje zasoby, zarówno językowe, jak i pojęciowe, mogą też zmieniać własne lub przyswajać nowe strategie językowe, czy ogólniej kognitywne – a wszystko to w celu zapewnienia skuteczności i efektywności komunikacji, to jest przy maksymalizacji siły wyrażania języka i minimalizacji niezbędnych nakładów („kosztów” w rodzaju wysiłku czy potrzebnej pamięci).

W ogólności interakcję mówcy i słuchacza, biorących udział w grze językowej, można przedstawić w abstrakcyjnej formie tak zwanego cyklu semiotycznego [Steels 2001a, 2003]. Obaj uczestnicy przechodzą w nim przez trzy poziomy przetwarzania: sensomotoryczny, konceptualny i językowy. Każdy z nich dzięki swoim zmysłom i doświadczeniom zna kontekst sytuacyjny, a ponadto dysponuje jakimś modelem świata, czyli pewną ontologią; ich tworzenie to etap ugruntowania (*grounding*). Mówca, dążąc do wybranego celu poprzez użycie języka jako środka do niego prowadzącego, musi najpierw dokonać stosownej konceptualizacji, a utworzone pojęcie (strukturę semantyczną) zwerbalizować. Przekazaną mu wypowiedź słuchacz powinien przeanalizować, tak aby odtworzyć jej strukturę, a następnie ją zinterpretować w oparciu o znany kontekst i wiedzę o świecie (co znów wymaga ugruntowania). Final-

nie słuchacz może podjąć jakieś działanie, ewentualnie realizując przy tym cel mówcy. Poszczególne etapy tego cyklu są procesami złożonymi, to znaczy nie są jednoznaczne w tym sensie, że na przykład dla ustalonego celu zwykle możliwe są liczne jego konceptualizacje, dane pojęcie można wyrazić na wiele sposobów, a określone wyrażenie różnie zinterpretować.

Cykl semiotyczny obejmuje w ten sposób rutynowe zastosowanie znanych już konwencji językowych. Możliwe jest też dalsze rozszerzanie czy uzupełnianie go, w szczególności o procesy niezbędne dla uchwylenia rozwoju i zmienności języka, czyli inwencję językową (generowanie nowych słów lub sposobów konstruowania wypowiedzi) oraz uczenie się języka (czyli nabywanie nieznanych dotąd konwencji). Ten ogólny, abstrakcyjny schemat można rozmaicie doprecyzować i zrealizować praktycznie w formie różnych konkretnych gier językowych, które w gruncie rzeczy są interakcjami ze ściśle opracowanym scenariuszem.

Proste gry językowe wirtualnych agentów odbiegają oczywiście od naszych interakcji w świecie rzeczywistym, tym bardziej że realistyczne dialogi ludzi mogą zawierać w sobie jednocześnie wiele przeplatających się gier. Należy jednak podkreślić ich istotne charakterystyki, które mają być zbieżne z zachowaniami językowymi ludzi. Przede wszystkim więc są one celowe i znaczące (interlokutorzy mają pewne intencje, chcą zrealizować swój zamiar). Ponadto są one osadzone we wspólnym kontekście i korzystają z mechanizmu wspólnej uwagi. W niektórych eksperymentach mamy nawet do czynienia z agentami ucieleśnionymi (bo zaimplementowanymi w robotach działających w realnym świecie). Muszą one wówczas wypracować swoje własne konceptualizacje oraz wspólny język, ugruntowany w danym środowisku, a wyłaniający się samorzutnie (*bootstrapped*) wyłącznie na podstawie użycia języka w praktyce – nie zaś w oparciu o jakieś z góry zadekretowane reguły.

Gra językowa agentów powinna być zanurzona w jakimś ich wspólnym działaniu, w którym przydatna jest komunikacja. W ten sposób modeluje się dialog usytuowany, a nie izolowane zdania (do jakich z kolei często odnosi się analiza w ramach lingwistyki formalnej). Zatem gra językowa wymaga populacji użytkowników języka (minimum dwóch) oraz określonego kontekstu i celu komunikacji, czyli nieodzowne jest uwzględnienie także aspektów pragmatycznych interakcji, a nie tylko lingwistycznych. Przypomnijmy tu wspomniany wcześniej przykład

Wittgensteina z grą językową budowniczych: aby efektywnie pracować, potrzebowali języka (słów oznaczających różne materiały budowlane), wspólnej uwagi skierowanej na obiekty (ewentualnie akcje) w ich otoczeniu oraz rutynowej interakcji, w której występowali na przemian i w której oprócz wypowiedzi językowych mogły być stosowane także gesty i inne czynności. Tak więc gra językowa opiera się na określonym ucieleśnieniu (*embodiment*), które „kotwaczy” (ugruntowuje) jej uczestników w świecie fizycznym w ogólności oraz w ich specyficznym środowisku i konkretnym otoczeniu w szczególności. Czynniki te mają wpływ na to, jakiego rodzaju cele komunikacyjne mogą mieć partnerzy oraz jakie tworzyć i wykorzystywać pojęcia. Przykładowo, jeśli agenty nie rozróżniają kolorów, to nie wyłoni się z ich interakcji język określający paletę barw, a jeśli ich świat jest statyczny i niezmienny, to nie powstanie język umożliwiający opis dynamicznych wydarzeń i zmienności w czasie.

Reasumując, kiedy opracowuje się model gry językowej, należy ustalić:

1. konfigurację środowiska i agentów,
2. strukturę populacji agentów,
3. cel komunikacyjny,
4. scenariusz gry,

a następnie trzeba zaproponować

5. strategię językową,

która pozwoli agentom wykreować od podstaw („z niczego” – gdyż początkowo nie dysponują one jeszcze żadną formą języka) odpowiedni do sytuacji wspólny system porozumiewania się [Steels 2012b]. Generalnie niezwykle trudno jest przewidzieć z góry wszelkie konsekwencje i efekty rozważanej strategii, dlatego tak ważna jest tu możliwość (a raczej konieczność) wykonania symulacji komputerowych, a jeszcze lepiej – eksperymentów z użyciem robotów. Tylko takie doświadczalne wyniki mogą niezbitnie potwierdzić nie tylko skuteczność przyjętej strategii, ale także wyznaczyć różne charakterystyki jej działania, co z kolei umożliwia porównanie jej z alternatywnymi strategiami i ułatwia generowanie ich nowych wariantów. Omówimy teraz krótko pięć powyższych czynników.

1. Konfiguracje środowiska i agentów. Jak już wspomniano, eksperymentalne agenty stosowane do prowadzenia gier językowych mogą być albo wyłącznie softwarowe, działając tylko w świecie wirtualnym, albo też mogą być zaimplementowane w robotach operujących w świecie realnym. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z nieugruntowanymi grami językowymi, a w drugim – z ugruntowanymi [Steels 2012b]. Wykorzystanie robotów z ich (choćby ograniczonymi) możliwościami sensomotorycznymi jest niewątpliwie cenne dla tego rodzaju badań. Język umożliwia nam wymianę informacji o świecie zewnętrznym, percypowanych zmysłami i osadzonych w fizycznych kontaktach z tym światem (i być może nawet dlatego właśnie język się wyłonił, choć ta akurat kwestia nie jest jeszcze na obecnym etapie badań w żadnym stopniu przesądzona, por. podrozdział 1.2). Pojęcia abstrakcyjne zapewne rozwinęły się później, jako metaforyczne rozwinięcia tych wcześniejszych, ucieleśnionych [Lakoff 2011]. Sugeruje to, że powinniśmy najpierw próbować wyjaśnić powstanie języka perceptualnie ugruntowanego. Do tego właśnie zadania nieodzowne są roboty (lub przynajmniej sensory). Od roku 1995 przeprowadzono już wiele tego rodzaju eksperymentów z robotami grającymi w gry językowe, począwszy od mobilnych konstrukcji z Lego wyposażonych w czujniki światła, przez kamery na statywach, do najnowszej generacji robotów „psokształtnych” (Aibo) czy humanoidalnych [Vogt 2003; Steels *et al.* 2002; Steels, Kaplan 2002; Steels 2001b, 2012b].

Co do konfiguracji środowiska, w którym mają działać agenty, może być ono statyczne lub dynamiczne (kwestia przemieszczania się obiektów, w tym także agentów, wiąże się ze zmiennością sytuacji w czasie) oraz otwarte (z możliwością pojawiania się nowych obiektów, atrybutów lub czynności) bądź zamknięte. Te i inne aspekty środowiska mogą mieć wpływ na skuteczność przyjętych w systemie strategii językowych. W przypadku agentów ucieleśnionych na sukces ich strategii mogą wpływać także ich błędy, szумы, a nawet pewien stopień losowości, które są nieuniknione, gdy konkretne maszyny działają w środowisku fizycznym.

2. Struktura populacji agentów. Istotną kwestią jest również konfiguracja i własności populacji agentów. Może ona być jednorodna (każdy agent może komunikować się z każdym innym) lub podzielona na zróżnicowane podgrupy albo też o określonej strukturze wyznaczo-

nej przez sieć połączeń między agentami. Populacja może być egalitarna (gdy wszystkie agenty mają taki sam wpływ na kształtowanie się wspólnego języka) lub nie (na przykład, gdy wyróżnia się grupę nauczycieli i uczniów, jak w modelu iterowanego uczenia się). Ponadto agenty mogą różnić się między sobą stopniem aktywności w procesie kreowania języka oraz skłonnością do dostosowywania się do poznanych konwencji językowych. I wreszcie populacja jako całość może być statyczna lub dynamiczna (gdy przybywa nowych agentów i ewentualnie ich też ubywa).

3. Cel komunikacyjny. W ogólności zakłada się, że cel komunikacyjny gry jest, lub może być, częścią większej sekwencji interakcji agentów współdziałających w danym środowisku, która jednakże nie jest tu modelowana. Chociaż sam cel zasadniczo pozostaje poza właściwym aktem komunikacji (to jest to, co mówca chce osiągnąć, na przykład zwrócić uwagę słuchacza na obiekt, dostać od niego obiekt, uzyskać informację itp.), to jednak właśnie osiągnięcie tego celu determinuje sukces interakcji. Proponując klasyfikację gier językowych ze względu na ich cel komunikacyjny, Luc Steels [2012b] wyróżnił ich trzy zasadnicze typy: gry referencyjne, gry akcji oraz gry opisowe. Oczywiście można zaproponować jeszcze inne cele komunikacyjne i określić w ten sposób dodatkowe typy odpowiednich gier, ale tylko te trzy wyżej wymienione ich rodzaje były jak dotąd realizowane eksperymentalnie i badane. Jak podkreśla Steels [2012b, s. 15], takie eksperymenty, przede wszystkim te z wykorzystaniem robotów, są niezmiernie czasochłonne i wymagają wyteżonej pracy ekipy wysoko wykwalifikowanych fachowców.

W **grach referencyjnych** (grach w odniesienia) mówca swoim komunikatem zwraca uwagę słuchacza na wybrany z ich wspólnego otoczenia obiekt. Gracz może w tym celu używać nazw własnych, ale może też odnosić się do obiektów poprzez ich cechy charakterystyczne (kolor, kształt, wielkość, położenie etc.). Ten drugi przypadek wymaga uprzedniego rozegrania przez agenta (indywidualnie, to znaczy z samym sobą) gry w odróżnianie w celu ustalenia takiej cechy dystynktywnej wybranego obiektu, lub ewentualnie takiego zestawu cech, którym różni się ten obiekt od pozostałych w danym kontekście. Informacje zwrotne związane z sukcesem komunikacyjnym, lub jego brakiem, mogą być wyrażane poprzez gesty wskazujące dane przedmioty;

w zwykłych (nieugruntowanych) symulacjach takie gesty siłą rzeczy też muszą być markowane przez bezpośrednie udostępnianie agentom niezbędnych informacji.

Możliwe są oczywiście różne warianty gier referencyjnych, z których Steels [2012b] wymienia trzy następujące jako podstawowe: są to gra w nazywanie, gra w zgadywanie oraz wielowyrazowa gra w zgadywanie. Z **grą w nazywanie** (*naming game*) mamy do czynienia wówczas, gdy dane przedmioty są jednoznacznie rozróżnialne w ramach jednego semantycznego wymiaru – inaczej mówiąc, gdy używane są ich nazwy własne lub ewentualnie nazwy ich cech dystynktywnych (z jednej ustalonej kategorii), które jednoznacznie identyfikują poszczególne obiekty (a więc *de facto* pełnią rolę nazw jednostkowych). W grze tej nie ma więc niepewności co do znaczenia komunikatów, lecz jedynie co do ich formy. Uczestnicy gry generują bowiem wiele różnych słów dla wyrażenia tych samych znaczeń i stąd głównym problemem jest tu redukcja nadmiernej liczby tych synonimicznych form wyrazowych, najlepiej do jednej, tak aby uzyskać wspólny dla całej populacji słownik, czyli zestaw jednoznacznych konwencji językowych (tutaj: par znaczenie-forma, zwanych zwykle asocjacjami). Gra w nazywanie, jako najprostszy wariant gry referencyjnej, jest szczególnie wygodna i użyteczna dla badania semiotycznej dynamiki procesu konwencjonalizacji [Baronchelli *et al.* 2006b] albo koewolucji perceptualnie ugruntowanych znaczeń (na przykład kolorów) i odpowiadającego im języka [Bleys *et al.* 2009].

W przypadku **gry w zgadywanie** (*guessing game*) albo nie stosuje się wskazywania w celu przekazywania informacji zwrotnych, albo też przy (opisowej) identyfikacji obiektów uwzględnia się więcej niż jedną kategorię semantyczną. Wprowadza to dodatkową niepewność – co do znaczenia komunikatu: słuchacz nie wie (musi więc zgadnąć), do którego obiektu odnosi się użyte przez mówcę wyrażenie, albo też którą z cech, lub jaki zestaw cech, danego obiektu oznacza. Przykładowo, jeśli odniesieniem wypowiedzi jest stary, dziurawy, czarny kapeć leżący na podłodze koło kanapy, to czy ta wypowiedź znaczy właśnie: *stary, dziurawy, czarny kapeć leżący na podłodze koło kanapy*, czy może odpowiada jakiejś kombinacji mniejszej liczby wymienionych cech, na przykład: *stary, czarny kapeć* albo *kapeć leżący na podłodze koło kanapy*? Jak widać, mamy tu do czynienia ze znanym problemem podniesionym przez Quine’a (jego słynny przykład z *gavagai* przyta-

czamy na s. 99). Słuchacz nie jest w stanie rozwiązać go w pojedynczej interakcji; ustalić znaczenie nowego słowa może jedynie w toku kolejnych ekspozycji, stosując odpowiednią strategię, na przykład uczenia się międzysytuacyjnego (*cross-situational learning*). Kiedy w grze dopuszcza się reprezentowanie tylko jednej kategorii semantycznej przez (holistyczne) formy wyrazowe, mówi się o znaczeniach jednowymiarowych, natomiast gdy formy te mogą wyrażać zestawy cech z wielu kategorii, mówi się o znaczeniach wielowymiarowych, zaś gra staje się wówczas kompozycyjną grą w zgadywanie (*compositional guessing game*) [Wellens, Loetzsch 2012]. Złożoność tej gry referencyjnej jest zatem dużo większa niż gry w nazywanie, a dodatkową trudność sprawia tu problem kombinatorycznej eksplozji liczby możliwych znaczeń (rosnącej wykładniczo wraz z liczbą uwzględnianych obiektów czy kategorii). Gra w zgadywanie omawiana jest jeszcze w podrozdziałach 2.4 i 2.6.

I wreszcie w **wielowyrazowej grze w zgadywanie** (*multiple word guessing game*) możliwe jest używanie zestawów słów dla wyrażania kombinacji cech identyfikujących obiekt (a więc znaczeń wielowymiarowych); jest to więc właściwie wielowyrazowy wariant gry kompozycyjnej. Występuje w niej kolejny problem, a mianowicie, jak dystrybuować możliwe znaczenia między poszczególne użyte formy wyrazowe. Należy tu jednak zastrzec, że tworzy się w tym przypadku po prostu zwykłe sekwencje wyrazów (pary, trójki itd.), między którymi nie zachodzą żadne związki hierarchiczne. Wyrażenia nie są już co prawda traktowane jako holistyczne całości, jak w poprzednich typach gier, lecz przy braku syntaksy (niewnoszącej tu zatem żadnych dodatkowych informacji) znaczenie całej wypowiedzi jest prostą sumą znaczeń jej wyrazów składowych [De Beule 2009].

Drugi z wyżej wymienionych typów gier językowych to **gry akcji**, w których celem mówcy jest wywołanie określonej reakcji słuchacza, polegającej na wykonaniu przez niego pewnej czynności. W tym wypadku również może być potrzebna gra w odróżnianie, pozwalająca znaleźć cechy dystynktywne akcji, która ma zostać wykonana. Informacje zwrotne nie mogą być w tej grze przekazywane przez wskazywanie, ale w przypadku porażki mówca może sam zademonstrować słuchaczowi właściwą czynność. Oczywiście roboty biorące udział w tej grze muszą być wyposażone w zaawansowane techniki rozpoznawania wzajemnych ruchów i ich efektów, a także procedury zapewniające pre-

czyjną kontrolę motoryczną, zaś w trakcie gry powinny rozwijać swoje systemy sterowania, sukcesywnie wiążąc obrazy wizualne akcji z odpowiednimi programami kontroli motorycznej.

Luc Steels [2012b] wymienia dwa rodzaje gier akcji, a mianowicie grę w pozy oraz grę w ruchy. W tej pierwszej słuchacz ma przyjąć określoną przez mówcę postawę, a w drugiej wykonać jakieś działanie (na przykład wstać). Jeśli wiąże się ono z użyciem pewnego obiektu (*Podnieś duży czerwony klocek*), to konieczne też staje się rozegranie gry referencyjnej dla zidentyfikowania tego przedmiotu.

I wreszcie w grach trzeciego typu, czyli **grach opisowych**, mówca przedstawia słuchaczowi pewną sytuację. Także tutaj możliwe są różne warianty, na przykład w grze w fakty sukces następuje, gdy słuchacz uznaje opis mówcy za zgodny z aktualnie percypowaną sytuacją, zaś w grze w rozpoznanie, gdy poprawnie wybiera jedną z dwóch prezentowanych scen jako zgodną z opisem przekazanym mu przez mówcę. Połączeniem dwóch ostatnich typów gier, opisowej i akcji, jest natomiast gra w konstrukcje, w której słuchacz buduje jakiś obiekt według instrukcji mówcy. Na koniec zestawmy raz jeszcze wszystkie wyżej wymienione rodzaje realizowanych dotąd gier językowych, pamiętając, że jest to klasyfikacja według ich celu komunikacyjnego:

1. gry referencyjne,
 - (a) gra w nazywanie,
 - (b) gra w zgadywanie,
 - (c) wielowyrazowa gra w zgadywanie,
2. gry akcji,
 - (a) gra w pozy,
 - (b) gra w ruchy,
3. gry opisowe,
 - (a) gra w fakty,
 - (b) gra w rozpoznanie,
 - (c) gra w konstrukcje (opisowa gra akcji).

Zanim przejdziemy do omówienia możliwych scenariuszy gry i strategii prowadzących do wspólnego dla agentów języka (jako zestawu przyjętych konwencji językowych), dodajmy tu jeszcze jeden niezbędny komentarz. Jako że implementacja pełnego cyklu semiotycznego omawianego wyżej jest zadaniem trudnym i obliczeniowo bardzo wy-

magającym, zwykle pewne jego fazy, mniej istotne z punktu widzenia celu badawczego danego eksperymentu, są w jakiś sposób tylko imitowane. Przykładowo, dla uniknięcia problemów z generowaniem i rozpoznawaniem mowy dokonuje się transmisji wypowiedzi agentów wyłącznie w wersji symbolicznej. Z kolei, aby pominąć kwestie percepcji i fizycznych aspektów działań agentów, wystarczy je wyposażyć w odpowiednio zasymulowany model świata (odpowiada to przejściu od gier ugruntowanych do nieugruntowanych). Można też agentom zapewnić znajomość pewnego fragmentu języka, po to by skupić się na badaniu wybranego zagadnienia (przykładowo określników dla zadanych fraz rzeczownikowych). Natomiast proces konceptualizacji można pominąć, zaopatrując agenty w gotowe zestawy znaczeń, które będą one wyrażać lub deszyfrować.

4. Scenariusz gry. W dalszej części zajmujemy się już wyłącznie grami referencyjnymi. Scenariusz gry definiuje sposób realizacji cyklu semiotycznego wraz z procedurami inwencji i akwizycji języka. Pojedyncza „rozgrywka”, czyli interakcja dwóch agentów (którą w symulacjach powtarza się wielokrotnie), ma następujący ogólny schemat. Z populacji agentów wybrani zostają losowo mówca i słuchacz. Mówca wybiera jako temat swojej wypowiedzi jeden obiekt z ich wspólnego otoczenia (ze sceny wspólnej uwagi – *joint attentional scene* [Tomasek 2002]) i przekazuje słuchaczowi odnoszący się do niego komunikat, czyli formę językową, która według znanej mu konwencji (asocjacji) przypisana jest temu obiektowi. Słuchacz stara się rozszyfrować ten komunikat, to znaczy ustalić obiekt będący tematem wypowiedzi mówcy. Zależnie od tego, czy słuchacz poprawnie wyznaczy ten obiekt czy też nie, gra kończy się albo sukcesem, albo porażką. Agenty dysponują też pozalingwistycznymi środkami komunikacji, takimi jak gesty wskazywania albo potakiwania i zaprzeczania, które służą do przekazywania odpowiednich informacji zwrotnych, dzięki czemu finalnie oba agenty wiedzą, czy ich interakcja zakończyła się sukcesem czy porażką, a ponadto słuchacz może zidentyfikować faktyczny desygnat użytego przez mówcę wyrażenia. Te informacje pozwalają agentom uczyć się skutecznej (maksymalizującej liczbę sukcesów) komunikacji, co następuje dzięki stopniowej synchronizacji ich leksykonów. Ten ogólny schemat oczywiście może być realizowany na wiele różnych konkretnych sposobów, przy wykorzystaniu rozmaitych strategii i metod reprezenta-

cji. Ponadto w niektórych wariantach tak zwany feedback (informacje zwrotne) może być tylko częściowy czy nawet zerowy.

Na cały eksperyment składa się seria wielokrotnie powtarzanych interakcji (gier) między dwoma wylosowanymi z populacji agentami. Stan początkowy możemy określić jako *tabula rasa* – agentom brak jakiegokolwiek wiedzy o języku czy świecie. Startując z tego stanu zerowego, muszą one dopiero wytworzyć wspólny system językowy, a niekiedy i pojęciowy. Nie ma przy tym wśród nich żadnego lidera czy mistrza kierującego tym procesem. Cel może być osiągnięty wyłącznie poprzez sukcesywne rozgrywanie parami gier językowych. Interakcje między agentami mają zatem charakter czysto lokalny, ograniczony do mówcy i słuchacza, i żadne informacje na ich temat nie są dostępne globalnie ani całej populacji, ani jakiejś jej części, nawet sąsiadom. Mówi się też o agentach, że nie dysponują telepatią, co oznacza, że nie mają wglądu do zasobów wiedzy pozostałych agentów, czy to lingwistycznej, czy o świecie, nie mają więc dostępu do żadnych informacji posiadanych przez partnera interakcji czy też innych agentów, nie mogą też znać jakichkolwiek danych statystycznych czy zbiorczych dotyczących populacji jako całości. Zatem jeśli w toku gry pojawia się jakaś innowacja (nowa asocjacja kojarząca wyraz ze znaczeniem), to początkowo znają ją tylko dwa biorące udział w tej grze agenty, a pozostałe mogą się ewentualnie z nią sukcesywnie zapoznawać w toku następnych gier, o ile tylko będzie ona w nich wykorzystywana w komunikacji. Jedynie w ten sposób może się taka nowa konwencja stopniowo rozprzestrzenić i upowszechnić w populacji – poprzez jej adaptowanie i używanie przez kolejne agenty w kolejnych interakcjach.

Agenty rozgrywające taką standardową grę językową opisaną wyżej mogą w jej trakcie natrafić na pewne problemy i dlatego szczegółowy skrypt rozgrywki musi uwzględniać ich diagnostykę i strategie ich rozwiązywania. Przede wszystkim trzeba określić tryb działania w sytuacjach, gdy wiedza lingwistyczna agentów okazuje się niewystarczająca. Ma to miejsce wówczas, gdy język mówcy jest zbyt ubogi (ma niedostateczną moc wyrażania) i nie pozwala mu nazwać danego obiektu, albo też gdy słuchacz spotyka się z nowym, nieznanym mu dotąd słowem. Za podstawową strategię naprawy takich sytuacji przyjmuje się szeroko rozumiane uczenie się, a w szczególności procesy inwencji i akwizycji. Inwencja to generowanie i przyswajanie (przez mówcę)

nowych form wyrazowych, czyli wprowadzanie innowacji językowych, a akwizycja to przyswajanie (przez słuchacza) nowo poznanych form (a właściwie w obu przypadkach dotyczy to całych asocjacji). W toku eksperymentu w wyniku działania inwencji pojawia się w systemie wiele form synonimicznych.

Te dwa procesy, inwencji i akwizycji językowej, pozwalają agentom rozbudowywać ich leksykony i mogą doprowadzić finalnie do wyłonienia się wspólnego dla całej populacji języka, zapewniającego im globalnie skuteczną komunikację. Następuje to najpóźniej wtedy, gdy wszystkie agenty poznają już cały zestaw wykreowanych w grach asocjacji – wówczas każdy może zrozumieć każdego. Jednakże taki język jest wysoce redundantny i daleki od optymalnego, czyli wzajemnie jednoznaczny, w którym każdemu znaczeniu odpowiada dokładnie jedno słowo i odwrotnie. Takie rozwiązanie trudno więc uznać za zadowalające, istnieją jednak metody pozwalające szybciej uzyskać pożądany efekt w postaci skutecznej globalnej komunikacji, odbywającej się przy użyciu optymalnego lub chociaż suboptymalnego języka.

5. Strategia językowa. W tym celu można mianowicie wykorzystać jakiś proces adaptacyjny, zapewniający „dostrojenie” stanów lingwistycznych agentów (*alignment*); może on polegać na przykład na wzmacnianiu form zapewniających sukces w grze i ewentualnie osłabianiu pozostałych. Takie czynności nie należą już do właściwego aktu komunikacji, lecz następują po nim, w momencie gdy wszystkie informacje, także niewerbalne, są już przekazane i oba agenty znają zarówno wynik gry, jak i jej temat. Kierując się tymi informacjami, mogą one wówczas modyfikować swoje leksykony, dążąc do maksymalizacji liczby przyszłych sukcesów komunikacyjnych. Odpowiednie zmiany mogą polegać na dodawaniu i usuwaniu form wyrazowych (właściwie asocjacji) ze słownika, albo na korygowaniu przypisanych im wag – o ile takowe są stosowane, co zależy od przyjętej strategii.

Przez strategię językową rozumie się tu minimalny zestaw czynników niezbędnych, żeby użytkownik języka mógł opanować i skutecznie używać danego podsystemu językowego (takiego jak na przykład: system nazw dla obiektów, system terminów określających kolory albo położenie w przestrzeni, albo system gramatyczny w rodzaju przypadków czy związku zgody). Taka strategia musi w szczególności określać konkretne formy reprezentacji dla znaczeń oraz dla wyrażen językowych,

sposób ich organizacji, a także to, czy będzie stosowany mechanizm punktacji (ważenia), a jeśli tak, to jaki rodzaj wag będzie używany, na jakim poziomie i jakie będą zasady operowania nimi. Wymienione czynniki składają się na poziom reprezentacji strategii językowej.

Natomiast na poziomie przetwarzania strategia językowa obejmuje te procesy, które są niezbędne agentowi do odnoszenia sukcesów w grach językowych. Będą to więc procesy: inwencji, produkcji, interpretacji, konceptualizacji, uczenia się i dostrajania (adaptacji). Te komponenty są współzależne, bo przykładowo przy efektywniejszych procedurach uczenia się wystarczą słabsze mechanizmy dostrajania. Oczywiście także czynniki z poziomu reprezentacji i rozwiązania tam przyjęte mają wpływ na procesy z poziomu przetwarzania.

Jak doskonale wiedzą z praktyki badacze implementujący tego rodzaju systemy, nawet drobne modyfikacje przyjętej strategii mogą powodować znaczne i niekiedy idące w zupełnie nieprzewidzianym kierunku zmiany w wyłaniającym się systemie językowym. Fakt ten stanowi jeszcze jeden argument przemawiający za użyciem symulacji komputerowych jako podstawowego (a być może nawet jedyne skutecznego) narzędzia w tego typu badaniach. Więcej informacji na temat strategii stosowanych w grach językowych podano w podrozdziale 2.5.

2.4. Problemy konwencjonalizacji

Gry językowe można realizować z różnymi scenariuszami oraz stosując rozmaite strategie; przy czym nie jest tak, że określony typ gry wymaga zawsze takiego samego scenariusza z taką samą strategią. Inaczej mówiąc, można symulować jakąś grę, na przykład w nazywanie, wykorzystując różnorodne scenariusze i strategie. Dlatego proponowane niekiedy klasyfikacje gier ze względu na zastosowane w nich strategie czy scenariusze interakcji nie są adekwatne. Lepsze kryterium ich pogrupowania proponuje Pieter Wellens [2012], klasyfikując gry językowe według głównego spośród występujących w danym przypadku problemu konwencjonalizacji.

I tak dla gry w nazywanie tym głównym problemem jest **rywalizacja** (synonimicznych) **form** wyrazowych. W początkowej fazie gry agenty produkują wiele różnych nazw dla tego samego obiektu. Dąże-

nie do stanu optymalnego, czyli do wzajemnie jednoznacznego przyporządkowania nazw obiektom, oznacza w szczególności potrzebę zastosowania jakiegoś mechanizmu selekcji, który pozwoli zredukować liczbę konkurujących synonimów – najlepiej do jednego (na desygnat). Problem rywalizacji i selekcji form jest kwestią podstawową, występującą także i w innych, bardziej złożonych niż gra w nazywanie, typach gier językowych.

Problem rywalizacji form może być rozwiązywany przy użyciu różnego rodzaju strategii. Wellens [2012, s. 20] rozróżnia dwa zasadnicze typy strategii: minimalne i nieminimalne. Kryterium podziału jest tu stosowanie mechanizmu wag, czyli punktacji przypisywanej formom (czy asocjacom): **strategie minimalne** to te, które z tego mechanizmu nie korzystają, zaś nieminimalne – wdrażają go. Do strategii minimalnych zaliczyć można strategię bazową gry w nazywanie, strategię imitacji oraz minimalną grę w nazywanie, natomiast do nieminimalnych – strategie z hamowaniem obocznym oraz częstotliwościową i frekwencyjną.

Strategia bazowa służy jedynie jako punkt odniesienia dla porównań z innymi, gdyż jest tak elementarna, że w istocie nie obejmuje żadnej formy mechanizmu dostrojenia, a jedynie akwizycję wszelkich poznawanych asocjacji. Zapewnia to co prawda sukces komunikacyjny, nie rozwiązuje jednak zasadniczego problemu, czyli eliminacji konkurujących form wyrazowych.

Strategia imitacji jest najprostszą metodą pozwalającą rozwiązać ten problem. Jej dynamika opiera się na zasadzie „zwycięzca bierze wszystko” w takim sensie, że forma zapewniająca sukces komunikacyjny wypiera wszystkie inne.

Dość dobrze znaną i przeanalizowaną w różnych wariantach (na przykład dla różnych topologii) jest minimalna gra w nazywanie, wprowadzona przez Andreę Baronchellego *et al.* [2006b], również wykorzystująca wyżej wymienioną zasadę. Ważne wyniki uzyskane dla tego modelu zostaną omówione bardziej szczegółowo w podrozdziale 2.6 (od s. 129).

Strategie nieminimalne, chronologicznie rzecz biorąc, stosowane były wcześniej niż trzy powyższe strategie minimalne. Strategie z tak zwanym hamowaniem obocznym korzystają z różnorodnych mechanizmów punktacji, które promują jedne, a tłumią inne formy wyrazowe.

Wymagają tym samym większych zasobów pamięci w celu przechowywania całych zestawów konkurujących ze sobą form.

Podobnie jest też w przypadku strategii częstotliwościowej, w której system wag przypisywanych nazwom opiera się na częstotliwości odnośnienia sukcesów przez poszczególne formy. Z kolei w strategii frekwencyjnej wagi to liczby wystąpień danego słowa w interakcjach agenta. Obie metody były stosowane już przez Luca Steelsa w jego pierwszych modelach gry językowej [1995; 1999]. Dokładniejsza charakterystyka i porównanie powyższych strategii zostaną przedstawione w podrozdziale 2.5.

Tak więc gra w nazywanie służy do rozwiązywania problemu konwencjonalizacji, który można nazwać rywalizacją form wyrazowych, albo inaczej problemem niepewności co do formy (*uncertainty of word forms*). Uczestnicy gry nie są pewni, której z licznych możliwych nazw danego obiektu należy używać w komunikacji, natomiast zawsze są zorientowani co do znaczenia przekazywanego w danej interakcji (po każdej z nich wiadomym jest, do jakiego obiektu, czy do jakiej jego cechy, odnosił się dany komunikat). Znaczenia są tu więc pewne i jednoznacznie wyznaczone (możemy je określić jako atomowe), ale odwzorowanie ze zbioru form w zbiór znaczeń jest wielo-jednoznaczne, podczas gdy oczekiwanym finalnym efektem gry w nazywanie jest odwzorowanie jedno-jednoznaczne.

Jednakże, ogólnie rzecz biorąc, w procesach akwizycji języka, szczególnie w przypadku uczenia się nowych słów przez dzieci, nie zawsze dany jest taki precyzyjny feedback, czyli pełne informacje zwrotne. Inaczej mówiąc, nie zawsze dokładnie wiadomym jest, do którego z szeregu możliwych znaczeń odnosi się użyta w komunikacji forma wyrazowa. Nawet wskazywanie nie musi przecież ujawniać, o jakim aspekcie sytuacji jest mowa. Zacytujmy tu raz jeszcze Ludwiga Wittgensteina: „Przybysz w obcym kraju uczy się czasem języka krajowców poprzez dawane mu przez nich objaśnienia ostensywne; sens tych objaśnień często będzie musiał zgadywać i czasem odgadnie go trafnie, a czasem nie” [Wittgenstein 2000, §32]. Przywołać też można znany przykład z *gavagai* prezentowany przez Quine’a [1999] w kontekście jego tezy o niezeterminowaniu odniesienia (*indeterminacy of reference*) oraz przekładu (*indeterminacy of translation*). Jak zrozumiemy słowo *gavagai* wypowiedziane w nieznanym nam języku przez kogoś wskazującego

na biegnącego królika? Jako znaczenie tego słowa narzuca się przede wszystkim *królik*, ale przecież może ono również dobrze oznaczać *długie uszy*, *obiad*, *szybko biegnie*, *ładne futerko* albo nawet *zanosi się na deszcz*, *bo króliki uciekają*.

W przypadku występowania takich sytuacji w grze językowej z zestawu dostępnych znaczeń należy wybrać jedno – trzeba tylko odgadnąć które. Stąd właśnie tego typu grę określa się mianem gry w zgadywanie. Elementarny wariant owej gry to minimalna gra w zgadywanie, która jest najmniejszym możliwym rozszerzeniem gry w nazywanie poprzez włączenie do niej jednego tylko dodatkowego problemu, który Wellens [2012, s. 22] nazywa **niepewnością co do odwzorowania** (*mapping uncertainty*): w grze trzeba rozstrzygnąć, które ze znaczeń odpowiada danej formie i która forma odpowiada danemu znaczeniu. Inaczej mówiąc, ponieważ w trakcie gry powstają między formami a (atomowymi) znaczeniami relacje wielo-wieloznaczne, zatem dążąc do optymalnego stanu jedno-jednoznaczności, należy nie tylko redukować liczbę form synonimicznych, jak w zwykłej grze w nazywanie, ale i liczbę znaczeń przypisanych formom homonimicznym.

Ten kolejny typ problemu konwencjonalizacji, czyli niepewność co do odwzorowania, wyznacza zatem następny rodzaj gry językowej. Poszukując w niej rozwiązań owego problemu, rozważać można dwa podejścia. Pierwsze polega na stosowaniu specyficznych warunków czy ograniczeń jako heurystyk prowadzących proces uczenia się we właściwym kierunku. Przykładowo, takie użyteczne kryterium stanowić może zasada wykluczania (*mutual exclusivity*), zaproponowana przez Ellen Markman w kontekście akwizycji nowych słów przez dzieci, czyli założenie, że obiektowi może być przypisana tylko jedna nazwa. Powoduje ono, że znając już jedną nazwę obiektu, napotkaną nową nazwę dziecko przyporządkowuje jego atrybutowi lub części, albo też innemu obiektowi z konsytuacji [Markman, Wachtel 1988]. Byłoby więc to założenie ograniczające liczbę możliwych hipotez dotyczących znaczenia nowego słowa u osoby uczącej się języka. Wydaje się jednak, że tego typu tendencje czy heurystyki pozwalają jedynie do pewnego stopnia ograniczyć niepewność co do odwzorowania, ale nie mogą jej całkowicie wyeliminować.

Inna możliwość to zastosowanie tak zwanego uczenia się międzysytuacyjnego (*cross-situational learning*) [Siskind 1996]. Polega ono na

tym, że przy wielokrotnym napotkaniu tego samego słowa w różnych konsytuacjach uczący się nie tylko systematycznie gromadzi różne hipotezy dotyczące przyporządkowania znaczenia temu słowu, ale też jednocześnie stopniowo eliminuje błędne hipotezy, wykorzystując jakiś mechanizm ich selekcji. Różne wersje tego mechanizmu dają w efekcie różne strategie międzysytuacyjne. Najprostsza jest strategia minimalna, czyli nie oparta na wagach, a polegająca na wyszukiwaniu znaczeń wspólnych dla kolejnych sytuacji. Do strategii nieminimalnych zalicza się na przykład częstotliwościową (inaczej statystyczną), czyli wymagającą zliczania częstotliwości współwystępowania słów i znaczeń (a w wariancie bayesowskim wyznacza się jeszcze odpowiednie prawdopodobieństwa), czy strategię elastyczną, która dzięki zastosowaniu bardziej wyrafinowanych funkcji ważenia jest szybsza i bardziej niezawodna [De Beule *et al.* 2006]. Oczywiście możliwe jest jeszcze stosowanie różnych innych, bardziej finezyjnych metod probabilistycznych, albo też kombinacji strategii międzysytuacyjnych z heurystycznymi.

Zarówno w grze w nazywanie, jak i w minimalnej grze w zgadywanie, i znaczenia, i reprezentujące je wyrażenia (słowa) są atomowe, to znaczy stanowią niepodzielne całości. Ponadto w obu tych typach gier językowych występuje rywalizacja form wyrazowych, natomiast tylko w tej drugiej mamy do czynienia z problemem niepewności co do odwzorowania. Naturalnym rozszerzeniem badanego zagadnienia jest wprowadzenie nieatomowych znaczeń oraz złożonych wypowiedzi. Tego rodzaju znaczenia mają więc jakąś wewnętrzną strukturę, natomiast wypowiedzi stanowią ciągi słów. Należy jednak pamiętać, że są to ich zwykłe konkatenacje, bez określonych związków syntaktycznych czy przypisanych ról semantycznych.

Z kolei najprostszą strukturą, jaką można przyjąć dla reprezentowania znaczeń, jest zbiór, na przykład – zbiór wartości atrybutów. Słowa mogą więc teraz wyrażać dowolne wiązki cech semantycznych. Na przykład kombinację cech {*duży, zielony, drewniany, klocek*} można ująć holistycznie i zwerbalizować przy użyciu tylko jednego słowa, ale można też w niej wydzielić mniejsze zestawy cech i każdemu z nich przypisać osobne słowo. Zatem kiedy wypowiedź składa się, dajmy na to, z dwóch słów, to mogą one oznaczać odpowiednio {*duży, zielony*} i {*drewniany, klocek*} albo {*duży, klocek*} i {*zielony, drewniany*}, i temu podobne dwuelementowe zbiory cech, ale też {*duży, zielony,*

drewniany} i {*klocek*} albo {*duży, drewniany, klocek*} i {*zielony*}, czy jeszcze inne kombinacje.

Wówczas jednak pojawia się nowy rodzaj problemu konwencjonalizacji, a mianowicie **niepewność co do znaczenia** (*meaning uncertainty*). Dla danego zbioru cech istnieje bowiem wiele możliwości jego podziału na podzbiory, a dalej przypisania tych podzbiorów kolejnym słowom wypowiedzi. Słuchacz przyswajający nowe słowa staje więc przed nie lada wyzwaniem, zwłaszcza że wraz ze wzrostem liczby cech i słów następuje kombinatoryczna eksplozja liczby możliwych rozwiązań. Przykładowo, dla n -elementowego zbioru cech, które należy „rozdzielić” między dwa słowa, istnieje $2^n - 2$ rozwiązań, a więc problem rośnie tu wykładniczo. W ogólnym przypadku liczba możliwych odwzorowań n -elementowego zbioru cech na k -elementowy zbiór słów (czyli tak zwanych surjekcji) wynosi $k! S(n, k)$, gdzie $S(n, k)$ to tak zwana liczba Stirlinga.

Tak więc ten ostatni problem konwencjonalizacji, a mianowicie niepewności co do znaczenia (czy inaczej mówiąc, niewiadomego znaczenia), wyznacza nam kolejny typ gier leksykalnych, mianowicie kompozycyjne (inaczej wielowyrazowe) gry w zgadywanie. Zasadniczym zadaniem, które należy w nich rozwiązać, nie jest już tylko znalezienie właściwego odwzorowania form na ustalone znaczenia, ale przede wszystkim poprawne skonstruowanie tych znaczeń i wreszcie uzgodnienie ich z resztą populacji (*alignment*) w trakcie interakcji komunikacyjnych. Jak zwykle podstawowym celem gry jest wyłonienie się w sposób wynikający wyłącznie z użycia języka (*usage-based*) pewnego systemu leksykalnego. W tym jednak przypadku system leksykalny nie ma być w pełni atomowy (czyli taki, że słowa wyrażają wyłącznie znaczenia atomowe), lecz powinien dysponować całym bogactwem słów wyrażających znaczenia o pewnej wewnętrznej strukturze, rozmaicie skomponowane ze znaczeń bardziej elementarnych; na przykład w przypadku zbiorów atrybutów: począwszy od najprostszych (jednoatrybutowych) po dowolnie złożone (wieloatrybutowe) – czyli od najogólniejszych po najbardziej szczegółowe znaczenia.

Problem niepewności co do znaczenia w kompozycyjnej grze w zgadywanie zasadniczo można próbować rozwiązywać metodami analogicznymi jak omawiane wcześniej dla minimalnej gry w zgadywanie, w szczególności zaś można też zastosować uczenie międzysytuacyjne.

Strategie wykorzystujące ten ostatni mechanizm, choć mogą być realizowane na rozmaite konkretne sposoby, mają taki sam charakter, to znaczy są oparte na rywalizacji hipotez. Wymagają one wyznaczania i pamiętania wszystkich potencjalnych znaczeń dla poszczególnych słów. W miarę kolejnych ich wystąpień w grze są one systematycznie gromadzone, a jednocześnie stopniowo eliminowane są te z nich, które są niezgodne z kolejnymi kontekstami lub też stają się najmniej prawdopodobne. W ten sposób te tymczasowe hipotezy konkurują ze sobą tak długo, aż (w najlepszym przypadku) zostanie tylko jedna. Stąd tego rodzaju strategie można określać mianem **konkurencyjnych**.

Strategie konkurencyjne dają się więc zaadaptować do kompozycyjnych gier w zgadywanie. Okazuje się jednak, że w tym przypadku nie zdają już tak dobrze egzaminu. Nie są dostatecznie efektywne i nie skalują się do dużych systemów. Kłopot polega na tym, że dla bardzo dużych przestrzeni znaczeń tego rodzaju algorytm jest za słaby dla jej przeszukania (pamiętajmy o wykładniczym wzroście liczby potencjalnych rozwiązań). Oprócz niewystarczających poziomów sukcesu komunikacyjnego oraz sukcesu dostrojenia leksykalnego, ich mankamentem są też niedostatecznie dobre inne charakterystyki wyłaniającego się systemu leksykalnego, jak na przykład wspomniany wyżej stopień szczególności i różnorodności wykreowanych znaczeń (generalnie bowiem wykazują one tendencję do preferowania znaczeń atomowych).

Pieter Wellens opracował w związku z tym jeszcze inny rodzaj strategii, którą nazwał **adaptatywną** [Wellens 2012]. Generalnie stosuje ona podobne podejście międzysytuacyjne, jednakże z jedną zasadniczą różnicą w stosunku do strategii konkurencyjnych, a mianowicie nie wymaga ona enumeracji wszystkich rywalizujących hipotez i ich dalszej stopniowej eliminacji. Generowana jest zamiast tego jedna ogólna hipoteza, która jest systematycznie przetwarzana i uszczegóławiana poprzez sukcesywne adaptowanie jej do aktualnych kontekstów. Można powiedzieć, że znaczenie słowa jest stopniowo „szlifowane”, jest kształtowane i precyzowane w zależności od tego, jak to słowo jest używane. Strategia adaptatywna w porównaniu z konkurencyjnymi dała jak dotychczas najlepsze wyniki. Wellens przewiduje również, że być może dobrym rozwiązaniem byłaby jakaś kombinacja tych dwóch typów strategii, wykorzystująca zalety obu.

2.5. Strategie

Przedstawione w poprzednim podrozdziale teoretyczne ujęcie Pietera Wellensa [2012] kwestii tego, jak poszczególne typy problemu konwencjonalizacji wyznaczają (definiują) różnego rodzaju leksykalne gry językowe, pozwala zobaczyć grę w nazywanie na nieco szerszym tle. Za cechy charakterystyczne tego właśnie rodzaju gier językowych należy więc uznać występowanie w nich wyłącznie znaczeń atomowych (nie kompozycyjnych), jak też niezłożonych (holistycznych) form wyrazowych, a przede wszystkim dysponowanie przez uczestników gry pełną informacją zwrotną o jej wyniku, co oznacza, że mają oni pewność zarówno co do znaczenia, jak i co do odwzorowania użytych form – inaczej, niż jest to w pozostałych przypadkach, czyli odpowiednio w kompozycyjnej i w minimalnej grze w zgadywanie. Stąd podstawowy problem, z którym pozostaje się uporać w grze w nazywanie, to rywalizacja form wyrazowych: spośród wielu zaproponowanych dla danego znaczenia finalnie powinna zostać jedna wspólna dla uczestników gry.

W świetle powyższej charakterystyki gry w nazywanie okazuje się, że najwcześniejsze zaimplementowane gry z połowy lat dziewięćdziesiątych XX wieku [Steels 1995, 1996], choć później na ogół określane tym mianem, miały jednak więcej cech wspólnych z grą w zgadywanie. Do omówionego tu wzorca lepiej pasują dopiero następne realizacje [Steels 1998a; Steels, McIntyre 1999]. Wyraźny wzrost zainteresowania grą w nazywanie nastąpił w połowie kolejnej dekady, kiedy to pojawiły się prace badające ją bardziej systematycznie z szerszej teoretycznej perspektywy [Lenaerts *et al.* 2005; De Vylder, Tuyls 2006; Baronchelli *et al.* 2006b]. Właściwie dopiero wtedy pewność co do znaczenia stała się standardową cechą gry w nazywanie. Wówczas też zauważono, że przy takich założeniach w zasadzie nie ma potrzeby symulowania więcej niż jednego obiektu w danym kontekście. Jak się bowiem okazuje, dynamika dostrajania się populacji w kwestii nazwy dla danego obiektu jest zupełnie niezależna od tego, jak ten proces przebiega dla pozostałych obiektów. Inaczej mówiąc, rywalizacja nazw (o dane znaczenie), a co za tym idzie – eliminacja synonimów, przebiegają odrębnie dla poszczególnych obiektów i nie wpływają na siebie wzajemnie. Stąd bez utraty ogólności rozważań (a za to istotnie przyspieszając symula-

cje), można ograniczać grę w nazywanie do przypadku jednoobiekto-
wego. Proces interpretacji komunikatu przez słuchacza sprowadza się
wówczas do sprawdzenia, czy ma on w swoim słowniku komunikowa-
ne wyrażenie (oczywiście oznacza to wtedy sukces komunikacyjny), co
jeszcze bardziej upraszcza scenariusz tego wariantu gry w nazywanie.

W kolejnych latach gra w nazywanie była dalej szczegółowo bada-
na w różnych interesujących wersjach, na przykład [Dall'Asta *et al.*
2006b; Wang *et al.* 2007; Lu *et al.* 2008; Baronchelli *et al.* 2008; Bri-
gatti 2008; Liu *et al.* 2009; da Silva Filho *et al.* 2009; Lu *et al.* 2009;
Zhang, Lim 2010; Baronchelli 2011; Maity *et al.* 2013; Li *et al.* 2013;
Gao *et al.* 2014; Lou, Chen 2015]; pewne wybrane modele zostaną
przedstawione dokładniej w podrozdziale 2.6, a modele własne autorki
w następnych rozdziałach. Analizowano w tych pracach ogólną dyna-
mikę procesu synchronizacji, korelacje między różnymi parametrami
modelu, skalowalność modelu do dużych wartości podstawowych para-
metrów, wreszcie zachowanie modelu w zależności od topologii sieci, na
której można розміścić populację, dla różnego rodzaju grafów innych
niż pełny, na którym pierwotnie gra była zdefiniowana.

Poniżej, w oparciu o wyniki Pietera Wellensa [2012], zostały pokrót-
ce scharakteryzowane i porównane podstawowe strategie umożliwiające
w grze w nazywanie wyłonienie się w populacji wspólnego leksykonu.
Wellens dla zestawienia i skonfrontowania poszczególnych strategii re-
implementował je wszystkie w identycznych warunkach. Celem tego
badania było przede wszystkim sprawdzenie, do jakiego stopnia me-
chanizm ważenia stosowany w strategiach nieminimalnych poprawia
efektywność rozwiązywania problemu rywalizacji form w stosunku do
strategii minimalnej gry w nazywanie. Intuicyjnie można by oczekiwać,
że strategie nieminimalne radykalnie przyspieszą proces eliminacji sy-
nonimów. Do oceny strategii stosowane są przy tym trzy miary: sukces
komunikacyjny, konkurencyjność nazw (a zarazem ich synchronizacja)
i wreszcie sukces synchronizacyjny.

Sukces komunikacyjny to stosunek liczby sukcesów w grze do
liczby wszystkich interakcji. Sukces następuje wówczas, gdy słuchacz
poprawnie wskaże desygnat nazwy użytej przez mówcę, a przy przyję-
tych tu założeniach, znając dane słowo, nie może się mylić co do jego
znaczenia, innymi słowy – jeśli posiada tę nazwę w swoim słowniku, to
wie też, który obiekt ona oznacza i tym samym odnosi sukces.

Konkurencyjność nazw to średnia liczba nazw rywalizujących o dany obiekt (czyli synonimów), zaś **synchronizacja nazw** to odwrotność ich konkurencyjności. Kiedy oba te parametry są równe jedności, to mamy do czynienia z minimalną konkurencyjnością i zarazem z maksymalną synchronizacją nazw; jest to sytuacja, w której nadmiarowe synonimy zostały wyeliminowane i wszystkie agenty mają dla każdego obiektu dokładnie po jednej nazwie.

Natomiast **sukces synchronizacyjny** łączy w sobie sukces komunikacyjny oraz synchronizację: sukces tego rodzaju ma miejsce wtedy, gdy słuchacz nie tylko zna zakomunikowaną mu nazwę, ale ponadto jest to jednocześnie to właśnie słowo, którego on sam, będąc mówcą, użyłby w celu wskazania jej desygnatu. Wobec tego, jak zaraz to zobaczymy, interakcja kończy się sukcesem synchronizacyjnym tylko wtedy, gdy funkcje produkcji obu graczy zwracają dla obiektu będącego ich argumentem (tematem wypowiedzi) dokładnie po jednym i tym samym słowie.

Poszczególne strategie Wellens definiuje w kategoriach specyficznych funkcji, czy też procedur, realizujących kolejne etapy interakcji. Są to między innymi funkcja produkcji i funkcja interpretacji wyrażań językowych (działające specyficznie dla każdego agenta, bo w oparciu o ich indywidualne słowniki), czy też funkcja innowacji i funkcja akwizycji. Ponadto niezbędna jest także **procedura aktualizacji**, która modyfikuje stany obu graczy po interakcji w sposób zależny od jej wyniku (sukcesu lub porażki). Jej działanie powinno zapewniać agentom maksymalizację liczby sukcesów w trakcie dalszej gry, a w szczególności synchronizację ich leksykonów w obrębie całej populacji (*alignment*).

Funkcja produkcji w przypadku każdego agenta wyznacza dla ustalonego obiektu (tematu interakcji) zbiór odpowiadających mu nazw, to znaczy wszystkich przypisanych mu synonimów, które ten agent zna (czyli występujących w jego leksykonie). Wszystkie agenty rozpoczynają eksperyment z pustymi leksykonami. Stąd oczywiście zbiór wyznaczony przez funkcję produkcji może być pusty (gdy agent nie zna jeszcze żadnego słowa oznaczającego dany obiekt) albo jedno- lub wieloelementowy (gdy agent już kiedyś „rozmawiał” o tym obiekcie). W tym ostatnim przypadku agent musi jeszcze wybrać jedną z tych rywalizujących nazw w sposób zależny od przyjętej strategii (na przykład losowo lub zależnie od przypisanej wagi).

Kiedy zbiór wyznaczony przez funkcję produkcji jest pusty, aktywowana jest przez agenta **funkcja innowacji**, generująca nową nazwę dla danego obiektu. Jednocześnie agent umieszcza w swoim leksykonie odpowiadającą tej parze asocjację. Funkcja innowacji skonstruowana jest w taki sposób, aby zagwarantować, że każdorazowo wprowadza ona do systemu nowe, niewystępujące w nim dotychczas słowo, co eliminuje możliwość przypadkowego pojawienia się w nim homonimów (jako identycznych słów odnoszących się do różnych obiektów).

Z kolei **funkcja interpretacji** dla podanej nazwy wyznacza (dzięki niewystępowaniu tu problemu niepewności co do znaczenia) co najwyżej jeden obiekt, będący jej desygnatem: jeden, o ile agent zna daną nazwę, albo zero, jeśli jej nie zna. W tym ostatnim przypadku uruchamiana jest **funkcja akwizycji**, która pozwala mu zapamiętać poznaną w ten sposób asocjację nowego słowa z obiektem będącym tematem rozmowy (wiadomym dzięki informacji zwrotnej).

Funkcje produkcji i interpretacji zaliczane są do procedur przetwarzania, zaś funkcje innowacji i akwizycji do uczenia się. Razem z mechanizmem aktualizacji wyznaczają one strategię przyjętą w grze. Jak już wcześniej wspomniano (s. 98), Wellens rozróżnia strategie minimalne, niestosujące mechanizmu ważenia asocjacji, i pozostałe – czyli niemimalne. Wśród tych pierwszych wymienia strategie: bazową, imitacji oraz minimalnej gry w nazywanie. Jeśli chodzi o **strategię bazową**, to jest ona tak elementarna, że nie zawiera odrębnej procedury aktualizacji, albo inaczej mówiąc, sprowadza się ona wyłącznie do akwizycji: w przypadku porażki słuchacz (nieznający użytego w interakcji słowa) dołącza je do swojego leksykonu, natomiast po sukcesie stany obu graczy pozostają niezmienione. Ponadto wybór nazwy z ich zbioru wyznaczonego przez funkcję produkcji jest losowy.

Nawet tak trywialna strategia zapewnia agentom po rozegraniu dostatecznej liczby gier wyłonienie wspólnego języka. Świadczy o tym osiągnięcie maksymalnego sukcesu komunikacyjnego (równego jedności). Jednocześnie jednak poziom sukcesu synchronizacji pozostaje zerowy. Dzieje się tak, ponieważ ostatecznie wszystkie agenty poznają wszystkie słowa, które wystąpiły w różnych interakcjach w obrębie całej populacji (stąd maksymalny sukces komunikacyjny), jednak w najmniejszym nawet stopniu nie dostrzegają wzajemnie swoich leksykonów. W trakcie gry powstaje wiele synonimów, a żaden z nich nie zostaje

już później wyeliminowany. Innymi słowy, konkurencyjność nazw jest bardzo duża, a ich synchronizacja – praktycznie żadna. Należy więc uznać, że strategia bazowa zawodzi, gdyż nie rozwiązuje podstawowego problemu rywalizacji form wyrazowych.

Z powodu początkowo pustych leksykonów w pierwszym etapie gry wykorzystywana jest często funkcja inwencji. Trwa to tak długo, aż każdy agent rozegra co najmniej jedną grę na temat każdego obiektu. Średnio rzecz biorąc, powstaje w ten sposób $n/2$ synonimów dla każdego obiektu (liczba ta określa więc poziom konkurencyjności nazw), gdzie n to liczba agentów w populacji. W dalszym ciągu funkcja inwencji nie będzie już potrzebna, a procesy uczenia się sprowadzają się już wyłącznie do akwizycji wszystkich utworzonych nazw. Ten proces trwa oczywiście znacznie dłużej; zauważmy, że w populacji n agentów każda wygenerowana w procesie inwencji nazwa wymaga $n - 1$ aktów akwizycji, aby poznały ją wszystkie agenty (przy czym taka akwizycja nie musi przecież zachodzić w serii kolejnych interakcji, nawet gdy dotyczą one tego samego obiektu, gdyż agenty mogą się też posługiwać innymi jego nazwami). Czas trwania tego procesu rośnie więc szybko wraz z wielkością populacji.

Nowa nazwa utworzona na potrzeby danej interakcji znana jest tylko lokalnie – tym dwu agentom, które biorą w niej udział. Następnie mogą ją poznać kolejne agenty rozmawiające na temat tego samego obiektu z tymi agentami, które już ją znają, i tak stopniowo będzie się ona rozprzestrzeniać w populacji. W tym samym czasie jednak agenty jeszcze jej nieznające będą kreować inne nazwy dla tego samego obiektu. Żadna z nich nie będzie preferowana w stosunku do innych. Ostatecznie więc wyłoni się wspólny dla wszystkich agentów leksykon, lecz nie będzie on optymalny, czyli minimalny, a wręcz przeciwnie – maksymalny, a więc wymagający dużych zasobów pamięci, znów (tak jak czas trwania tego procesu) zależnych od wielkości populacji (tym razem liniowo).

Co ciekawe, jedno z rozwiązań prowadzących do uzyskania pełnej synchronizacji językowej agentów polega na dalszym uproszczeniu strategii bazowej, a mianowicie na ograniczeniu pamięci agentów, które w swoich leksykonach mogą teraz przechowywać maksymalnie po jednej nazwie dla każdego obiektu. Mechanizm aktualizacji działa tak jak w strategii bazowej, to znaczy w przypadku porażki spro-

wadza się do akwizycji przez słuchacza użytego w interakcji słowa. Jednakże tym razem dla słuchacza (jak i zresztą dla mówcy) będzie to w tym momencie jedyna znana mu nazwa danego obiektu (o ile znał inną, to automatycznie ją „zapomniał”). W przypadku sukcesu stany obu graczy pozostają niezmiennione. Można powiedzieć, że jeśli agent jako mówca nie musi sam wygenerować nowej nazwy dla obiektu, to po prostu naśladuje ostatniego agenta-mówcę, z którym rozmawiał o tym obiekcie, używając w kolejnej interakcji tejże nazwy, którą wówczas usłyszał. Stąd omawiana strategia nazywa się **strategią imitacji**.

W przypadku tej strategii wyjątkowo jest tak, że sukcesy komunikacyjny i synchronizacyjny mają identyczne wartości. Sukces komunikacyjny oznacza bowiem, że słuchacz zna daną nazwę – a ponieważ może znać tylko jedną, jest ona automatycznie jego preferowaną nazwą dla danego obiektu, co z kolei oznacza jednoczesny sukces synchronizacyjny. Jak pokazują symulacje, strategia imitacji wystarcza dla osiągnięcia pełnego globalnego sukcesu komunikacyjnego, co oznacza, że wyłania się wtedy wspólny i w pełni zsynchronizowany w obrębie całej populacji język. Do powstania tego optymalnego słownika prowadzi tu dynamika typu *winner takes all*. W trakcie eksperymentu pojawiają się w populacji różne nazwy dla tego samego obiektu, które następnie konkurują ze sobą krócej lub dłużej (co można dokładnie prześledzić), ale finalnie wygrywa tylko jedna nazwa. Jak się wydaje, kluczową cechą tej strategii jest pełna adaptatywność agentów: słuchacze zawsze gotowi są zmodyfikować swój repertuar językowy, o ile okazuje się on niezgodny z zasobami językowymi ich rozmówców. Umożliwia to właściwą samoorganizację systemu, w procesie której dla każdego obiektu wyłania się ostatecznie jedna nazwa wspólna dla całej populacji (inaczej mówiąc, preferowana przez wszystkich agentów).

Można też sprawdzić, że modyfikacja powyższej strategii redukująca ową adaptatywność zmienia kompletnie dynamikę systemu i finalny wynik eksperymentu. Otóż w wariantcie konserwatywnym tej strategii agenty nadal przyswajają nowe słowa, ale tylko w sytuacji, gdy jeszcze nie znają żadnej nazwy dla obiektu. W kolejnych interakcjach trwają jednak uparcie przy swojej wersji i już jej nie zmieniają. Jak się łatwo domyślić, nie tylko nie osiągają sukcesu synchronizacyjnego, ale nawet sukces komunikacyjny jest znikomy (w symulacjach Wellensa

pozostawał na poziomie czterech procent). Adaptatywność jest więc tu kluczowym czynnikiem, niezbędnym dla samoorganizacji systemu.

I wreszcie ostatnia ze strategii minimalnych to **strategia** tak zwanej **minimalnej gry w nazywanie**, która łączy w sobie elementy dwóch poprzednich strategii. Najogólniej mówiąc, w przypadku porażki działa ona jak strategia bazowa, a w przypadku sukcesu jak strategia imitacji. Tak jak w strategii bazowej agenty mogą przechowywać w swoich leksykonach wiele synonimów, a po porażce słuchacze nieznający danej nazwy dokonują jej akwizycji. Kiedy jednak interakcja kończy się sukcesem, to i mówca, i słuchacz stosują zaczerpniętą ze strategii imitacji zasadę „zwycięzca bierze wszystko”, to znaczy zapominają wszystkie konkurujące synonimy, oprócz tego jednego, który zapewnił im sukces. Do takiej aktualizacji leksykonów nie wystarczają już dotychczasowe funkcje inwencji czy akwizycji, należy więc zdefiniować tu kolejną funkcję realizującą proces eliminacji zbędnych asocjacji ze słowników graczy, a co za tym idzie, koordynacji tych słowników.

W przypadku tej strategii sukces komunikacyjny nie pokrywa się z sukcesem synchronizacyjnym (podobnie jak dla strategii bazowej), jednak – jak pokazują symulacje – tym razem obydwie te miary osiągają swoje maksymalne wartości, choć sukces synchronizacyjny dąży do niej nieco wolniej niż komunikacyjny. Interesujące jest też porównanie przebiegu zmienności sukcesu komunikacyjnego w funkcji czasu (mierzonego liczbą interakcji) tej strategii ze strategią imitacji. W przypadku tej ostatniej osiągnięcie pełnego sukcesu trwa znacznie dłużej oraz przebiega stopniowo i łagodnie. Natomiast w przypadku minimalnej gry w nazywanie proces ten nie tylko trwa dużo krócej, ale też wyraźnie mamy tu do czynienia w pewnym momencie z gwałtownym przejściem, z raptowną zmianą stanu całego systemu: z początkowego chaosu nagle przechodzi on w stan uporządkowany, w którym leksykony wszystkich agentów są zsynchronizowane [Baronchelli *et al.* 2006b]. Można powiedzieć, że system ze strategią imitacji powoli ewoluuje, natomiast w minimalnej grze w nazywanie następuje w nim nagła przemiana (zwana też przejściem fazowym). Uprzedzając nieco poniższą prezentację strategii nieminimalnych, dodajmy tutaj, że niezwykła efektywność strategii minimalnej gry w nazywanie wynika zapewne z tego, że jest ona w pewnym sensie równoważna ekstremalnej wersji hamowania obocz-

nego: mianowicie hamuje się tu konkurentów maksymalnie poprzez ich całkowitą eliminację.

Przejdźmy zatem do strategii nieminimalnych, to znaczy wykorzystujących mechanizm wag przypisywanych asocjacom. Pierwsza z nich to **strategia hamowania obocznego**. Pojęcie to (*lateral inhibition*) pochodzi z neurobiologii, gdzie oznacza zdolność pobudzonego neuronu do redukcji aktywności jego sąsiadów; wytworzony w ten sposób kontrast w zakresie stymulacji wpływa na poprawę percepcji bodźca, który był źródłem aktywacji neuronu. Tego rodzaju mechanizm wykorzystywany był już w bardzo wczesnych modelach gier językowych [Steels, Kaplan 1999; Steels 2000a; Vogt 2000], zatem chronologicznie rzecz biorąc, strategia ta poprzedzała wszystkie omówione wyżej strategie minimalne, implementowane dopiero kilka lat później.

Aby móc zastosować strategię nieminimalną, należy rozszerzyć możliwości reprezentacyjne systemu: każdej asocjacji z leksykonu (czyli parze forma-znaczenie) zostaje przypisana waga, na ogół liczba z przedziału od zera do jedności, reprezentująca jej stopień skonwencjonalizowania, czy „popularności”. Hamowanie oboczne polega wówczas na zmniejszaniu wag konkurujących nazw; po grze zakończonej sukcesem zwiększa się wagę użytej nazwy (zwycięska forma jest wzmacniana), natomiast wagi jej synonimów są obniżane (formy konkurencyjne są hamowane). Z kolei jeśli gra kończy się porażką, to mówca zmniejsza wagę użytego słowa, zaś słuchacz przyswaja nową asocjację z pewną wagą początkową. Słowa o wagach zerowych lub ujemnych usuwane są z leksykonów. Wagi przekraczające jedność są przycinane do tej maksymalnej wartości. Funkcja produkcji wybiera słowo o najwyższej wadze (ewentualnie losowo, jeśli więcej niż jedno ma tę samą wagę).

W wersji, którą Wellens nazywa podstawową strategią hamowania obocznego [Steels, Belpaeme 2005], występują więc cztery parametry, a mianowicie waga początkowa (przypisywana nowym słowom przez funkcję innowacji i funkcję akwizycji) oraz wykorzystywane w procedurze aktualizacji: przyrost wagi (dla słowa, które wygrało), spadek wagi (dla słowa, które przegrało) i tłumienie wagi (dla hamowania słów konkurujących ze zwycięskim). Wszystkie te parametry wpływają na przebieg procesu synchronizacji leksykonów graczy. Zauważmy, że kiedy wartości parametrów przyrostu i spadku wagi są zerowe, natomiast tłumienie oraz waga początkowa są równe jedności, to podstawowa

strategia hamowania obocznego działa identycznie jak strategia minimalnej gry w nazywanie: zwycięska forma pozostaje w leksykonie jako jedyna, gdyż konkurujące z nią są natychmiast eliminowane.

Hamowanie oboczne może być realizowane jeszcze inaczej niż przez zmniejszanie i zwiększanie wag o ustalone wartości, a mianowicie przez interpolację wag do zera i do jedności. Wagę zmniejsza się wówczas o ustalony ułamek jej wartości, a zwiększa o ułamek jej odległości od jedności. W tej sytuacji wagi zawsze mieszczą się w przedziale $(0, 1)$, gdyż ich wzrost czy spadek jest tym wolniejszy, im są one bliższe wartości granicznych, dzięki czemu nigdy tych wartości nie przekroczą. Oznacza to między innymi, że żadna poznana przez agenta nazwa nie zostanie już zapomniana, podobnie jak w strategii bazowej. Niemniej także w tym przypadku dzięki mechanizmowi hamowania obocznego gracze wypracowują jednak preferencje zapewniające im sukces synchronizacyjny. Tego rodzaju strategia wykorzystana była na przykład przez Vogta i Coumansa [2003] oraz De Beule'a i De Vyldera [2005].

Oba rodzaje strategii z hamowaniem obocznym pozwalają populacji graczy osiągnąć pełny sukces tak komunikacyjny, jak i synchronizacyjny (przy czym w strategii podstawowej dzieje się to nieco szybciej niż w interpolowanej). Na tempo i przebieg ewolucji systemu, w szczególności na dynamikę sukcesu synchronizacyjnego, wpływają oczywiście wartości poszczególnych parametrów tych strategii. Jak sprawdził w swoich symulacjach Pieter Wellens [2012, s. 53], istotna jest tu rola parametru tłumienia, którego wielkość określa siłę hamowania obocznego. Przy zerowej wartości tego parametru, czyli faktycznie bez hamowania obocznego, poziom sukcesu synchronizacyjnego spada do około 80% w przypadku strategii interpolowanej i nawet poniżej 50% dla strategii podstawowej. Z kolei zwiększanie wartości tego parametru zarówno podnosi poziom sukcesu (do 100% dla tłumienia równego na przykład 0,5), a także zwiększa tempo osiągania maksymalnego sukcesu. Natomiast wpływ parametru spadku wagi (w przypadku porażki) jest nieco inny: aczkolwiek jego zerowa wartość także pogarsza działanie systemu (choć nie tak drastycznie jak tłumienie zerowe), to dla przykładowych wartości 0,2 i 0,4, przy tym samym końcowym poziomie sukcesu, był on szybciej osiągany dla wartości mniejszej (w obu rodzajach strategii); inaczej mówiąc, zwiększanie parametru spadku wagi nie przyspiesza, lecz spowalnia synchronizację leksykonów.

Można by oczekiwać, że bardziej subtelna procedura aktualizacji w strategii z hamowaniem obocznym zapewni jej dużo większą efektywność w porównaniu ze strategią minimalnej gry w nazywanie. W rzeczywistości proces osiągnięcia stanu pełnej synchronizacji przebiega w tym przypadku co prawda szybciej, zwłaszcza dla strategii podstawowej, jednak różnica nie jest aż tak istotna, jak by można się spodziewać (a dla strategii interpolowanej w ogóle zanika w końcowej fazie ewolucji systemu). Tak więc stopniowe działanie hamowania obocznego daje stosunkowo niewielką korzyść w porównaniu z działaniem ekstremalnym (czyli całkowitą eliminacją konkurujących form), z jakim mamy do czynienia w minimalnej grze w nazywanie.

Druga strategia nieminimalna to **strategia frekwencyjna**, po raz pierwszy zastosowana przez Steelsa i McIntyre'a [1999]. W tym przypadku wagi to liczby naturalne reprezentujące frekwencję słowa, czyli liczbę interakcji, w których agentowi jako słuchaczowi zostało to słowo zakomunikowane. Funkcja produkcji wybiera zawsze słowo o najwyższej frekwencji (a w przypadku gdy jest kilka słów o tej samej najwyższej wadze, jedno z nich wybierane jest losowo). Funkcje inwencji i akwizycji inicjują nowe asocjacje z wagą równą jedności, natomiast funkcja aktualizacji zwiększa o jeden frekwencję usłyszanej nazwy. Aktualizacji podlega przy tym tylko stan słuchacza, gdyż frekwencja powinna reprezentować preferencje innych agentów (a własne należy oczywiście do nich dostosowywać). Słuchacz w każdej interakcji, obojętnie czy zakończonej sukcesem czy nie, automatycznie dowiaduje się, która nazwa jest preferowana przez mówcę. Mówca natomiast, w zależności od wyniku gry, dowiaduje się jedynie, czy użyta przez niego nazwa jest zrozumiała dla słuchacza, nie może jednak wiedzieć, czy jest nazwą przez niego preferowaną. Stąd zwiększanie jej frekwencji przez mówcę, nawet tylko w przypadku sukcesu, umacniałoby jedynie jego własne preferencje, osłabiając w sumie jego możliwości adaptacyjne.

Bardziej szczegółową analizę tych dwóch opcji, to jest aktualizacji tylko słuchacza, albo i słuchacza, i mówcy, możemy znaleźć u De Vyldera [2007, s. 139–145]. De Vylder zwraca właśnie uwagę na asymetrię informacji uzyskiwanych przez mówcę i przez słuchacza w trakcie interakcji oraz wskazuje na potrzebę odpowiedniego zróżnicowania ich reakcji (mówca nie powinien tak samo jak słuchacz traktować sukcesu, sko-

ro uzyskuje dzięki niemu mniej informacji niż słuchacz). Wzmacnianie w tej sytuacji asocjacji mówcy może być pomocne w początkowej fazie ewolucji systemu (przez redukowanie liczby słów w populacji), jednakże finalnie może ją zablokować w jakimś stanie suboptymalnym, w którym utrzymuje się już tylko kilka słów znanych wszystkim agentom, przez co ich interakcje kończą się co prawda zawsze sukcesem, nieprzynoszącym jednak mówcom żadnych nowych danych na temat preferencji innych agentów, co niezmiernie spowalnia dalszą ewolucję w kierunku synchronizacji. Byłby to więc tak zwany metastabilny (i suboptymalny) stan systemu, z którego przejście do stanu optymalnego, choć teoretycznie możliwe, praktycznie wymagałoby już zbyt długiego czasu.

W przypadku strategii frekwencyjnej nazwy nigdy nie są zapominane, czyli usuwane z leksykonów, podobnie jak w strategii bazowej czy interpolowanej. Oznacza to, że także tutaj agenty muszą finalnie osiągnąć pełny sukces komunikacyjny. Symulacje Wellensa pokazują, że następuje to nie tylko szybciej niż przy strategii minimalnej gry w nazywanie (w której po sukcesie konkurencyjne nazwy są od razu eliminowane, co może prowadzić do porażki w przypadku ponownego napotkania ich w późniejszych interakcjach), ale nawet nieco szybciej niż przy podstawowej strategii z hamowaniem obocznym (w której konkurencyjne nazwy są stopniowo wytłumiane). Te dobre rezultaty wynikają z faktu, że produkowane są zawsze formy o najwyższej frekwencji, przez co wiele innowacji językowych wygenerowanych przez funkcje inwencji w ogóle nie rozprzestrzeni się w populacji. Natomiast w osiąganiu sukcesu synchronizacyjnego strategia frekwencyjna nie daje już takiego przyspieszenia, gdyż osiąga go właściwie tak samo jak strategia minimalnej gry w nazywanie, a więc wolniej niż podstawowa strategia z hamowaniem obocznym.

Powyższa prezentacja i porównanie poszczególnych strategii pokazują, że możliwe są różne rozwiązania problemu konwencjonalizacji definiującego grę w nazywanie, a mianowicie problemu rywalizacji form wyrazowych. Dzięki założeniom o holistycznym charakterze znaczeń oraz o pełnej informacji zwrotnej przekazywanej w interakcjach, w grze w nazywanie nie występują problemy niepewności co do odwzorowania czy znaczenia komunikatów, lecz właśnie jedynie co do formy. Zadaniem populacji jest więc wyłonienie „z niczego” (ze stanu zerowego – *tabula rasa*) wspólnego minimalnego zbioru nazw dla określonego ze-

stawu obiektów (znaczeń). Oprócz bazowej, każda z powyższych strategii pozwala zrealizować to zadanie, czyli uzyskać pełną synchronizację leksykonów (a wszystkie bez wyjątku gwarantują pełny sukces komunikacyjny). Dla uzyskania synchronizacji można stosować całkowitą eliminację konkurujących form, ich bardziej stopniowe hamowanie albo kontrolę ich frekwencji w aktach komunikacji.

Bez względu na wykorzystany w tym celu mechanizm, kluczem do sukcesu jest tu **adaptatywność** agentów, czyli ich zdolność do zmiany swojego stanu w zależności od informacji pozyskiwanych w kolejnych interakcjach. Agenty muszą dość elastycznie dostosowywać się do sytuacji, ale zarazem nieprzesadnie, raczej w zrównoważony sposób. Zauważmy, że tylko w przypadku strategii imitacji, która polega na dosłownym naśladowaniu partnera interakcji, a więc pozwala na maksymalną adaptatywność agentów, w ewolucji systemu nie występuje charakterystyczne szybkie przejście od niskiego do wysokiego poziomu sukcesu synchronizacyjnego. Osiągnięcie pełnego sukcesu w przypadku strategii imitacji trwa dłużej i proces ten przebiega w sposób bardziej ciągły i równomierny, niż ma to miejsce dla strategii minimalnej gry w nazywanie albo strategii z hamowaniem obocznym czy frekwencyjnej. Zatem nadmiernie wysoki stopień adaptatywności też nie musi być korzystny, podobnie jak zbyt niski, jak na przykład w strategii bazowej czy w konserwatywnym wariacie strategii imitacji, które w ogóle nie zapewniają synchronizacji. Niewątpliwie jednak adaptatywność odgrywa decydującą rolę w procesie wyłaniania się wspólnego dla całej populacji i minimalnego leksykonu.

Na poziomie reprezentacji strategia imitacji ma możliwości ograniczone w stosunku do strategii bazowej, gdyż nie pozwala ona na zapamiętywanie konkurujących synonimów danej formy wyrazowej. Potencjalnie negatywny wpływ tego ograniczenia na ewolucję systemu rekompensuje pojawiająca się dzięki temu dynamika typu *winner takes all*, zapewniająca synchronizację systemu. Minimalna gra w nazywanie ponownie rozszerza poziom reprezentacyjny o listy synonimów, ale także poziom przetwarzania o funkcje realizujące znów zasadę „zwycięzca bierze wszystko”. Zmiany te prowadzą do istotnego przyspieszenia procesu synchronizacji. Strategię minimalnej gry w nazywanie można traktować jako ekstremalny wariant strategii z hamowaniem obocznym. Strategie z hamowaniem, tak jak i strategia frekwencyjna,

mają jeszcze bardziej rozbudowany poziom reprezentacji, umożliwiające przypisywanie asocjacom wag. Mechanizm ten pozwala na bardziej elastyczne przetwarzanie list synonimów: zwycięzca nie pozostaje sam w leksykonie, jedynie jest wzmacniany, zaś (tylko w przypadku strategii z hamowaniem) jego rywale są tłumieni. Takie podejście okazuje się co prawda jeszcze efektywniejsze od minimalnej gry w nazywanie, ale zysk nie jest już wielki. Jak jednak podkreśla Wellens [2012, s. 57], choć dla gry w nazywanie zastosowanie strategii nieminimalnych nie przynosi jakiegś spektakularnej poprawy w stosunku do strategii minimalnych, to właśnie jedynie one pozostają skuteczne w innych niż gra w nazywanie typach gier językowych – takich jak na przykład gra w zgadywanie – to znaczy w tych, w których występują dodatkowe problemy konwencjonalizacji związane z niepewnością co do odzworowania i co do znaczenia. Tymi kwestiami nie będziemy się jednak już bardziej szczegółowo zajmować.

2.6. Wybrane modele

Spośród wielu różnych modeli gier językowych wybrane tu zostały do dokładniejszego omówienia trzy przykłady, które wydają się prezentować szczególnie interesujące wyniki, obserwacje i odniesienia. Ten subiektywny wybór nie stanowi oczywiście wyczerpującego zestawienia, ale nawet w tej – z konieczności – ograniczonej formie pokazuje niektóre zjawiska i mechanizmy, które można analizować w kontekście gier językowych. Jako pierwsze omówiono modele Toma Lenaerts *et al.*, odnoszące się ogólnie do kwestii homonimów i synonimów w grze w nazywanie, który to problem badany był także w jednym z modeli autorki (zreferowanym w rozdziale 4). Następnie przedstawiono modele Paula Vogta, który analizował wpływ mechanizmów wspólnej uwagi i feedbacku w grach referencyjnych. Na koniec scharakteryzowano dynamikę minimalnej gry w nazywanie, zbadaną przez Andreę Baronchellego *et al.*, do której odwołujemy się także w następnych rozdziałach.

Badając populację agentów, które wielokrotnie rozgrywają pomiędzy sobą grę językową, analizuje się przede wszystkim, czy proces ten prowadzi do wyłonienia się wspólnego języka (jako zestawu asocjacji, czyli par forma-znaczenie) i ewentualnie, jakie będą jego własności, to

znaczy czy będzie on efektywny i minimalny. Bart De Vylder i Karl Tuyls [2006] za **język efektywny** uważają język zapewniający sukcesy w grze w nazywanie. Oznacza to, że każdemu obiektowi musi odpowiadać co najmniej jedno słowo jednoznacznie go identyfikujące, czyli niebędące homonimem. Z kolei język uznaje się za **minimalny**, jeśli jest „oszczędny”, to znaczy nie ma w nim więcej słów, niż jest to niezbędne – innymi słowy, gdy nie występują w nim synonimy. Tym samym w języku zarazem efektywnym i minimalnym, czyli **optymalnym**, każdemu obiektowi odpowiada dokładnie jedno słowo i odwrotnie, każdemu słowu odpowiada dokładnie jeden obiekt (jest to więc wzajemnie jednoznaczne przyporządkowanie form i znaczeń).

Grę w nazywanie, ogólnie scharakteryzowaną w poprzednich podrozdziałach, można oczywiście szczegółowo realizować na różne sposoby i stąd istnieje wiele jej wariantów. Przykładowo, Lenaerts *et al.* [2005] analizują wersję, w której wszyscy gracze od początku znają ten sam, niezmienny w trakcie całej gry, zestaw w słów oraz d obiektów. Każdy gracz posiada słownik reprezentowany przez macierz o w kolumnach i d wierszach, której każdy element v_{ij} jest wagą (liczbą z przedziału $[0, 1]$), jaką dany gracz przypisuje asocjacji i -tego słowa z j -tym obiektem. Mówca zawsze wybiera dla danego obiektu to słowo, którego asocjacja z tymże obiektem ma w jego leksykonie najwyższą wagę (spośród wszystkich słów). Z kolei słuchacz interpretuje przekazane mu słowo jako ten obiekt, którego asocjacja z tym właśnie słowem ma w jego własnym słowniku najwyższą wagę (spośród wszystkich obiektów). Po każdej rozgrywce słowniki mówcy i słuchacza są aktualizowane stosownie do wyniku gry: w przypadku sukcesu wagi użytej asocjacji są zwiększane (strategia wzmacniania – *reinforcement*), zaś pozostałe dla tego samego znaczenia (u mówcy) oraz dla tego samego słowa (u słuchacza) są odpowiednio zmniejszane (strategia hamowania obocznego – *lateral inhibition*, czyli tu: redukcji konkurencyjnych asocjacji). Natomiast w przypadku porażki wykonuje się odwrotne czynności.

Gra symulowana zarówno dla dwóch, jak i dla dziesięciu graczy prowadziła do uzyskania koherencji językowej, czyli wyłonienia się wspólnego języka gwarantującego maksymalny sukces komunikacyjny (mierzony jako liczba sukcesów w stosunku do liczby wszystkich prób komunikacji w kolejnych przedziałach czasu). W przypadku, gdy liczba słów była równa liczbie obiektów ($w = d = 7$), finalny język był i efek-

tywny, i minimalny, a więc optymalny (to znaczy wzajemnie jednoznaczny, czyli każdemu obiektowi odpowiadało w nim dokładnie jedno słowo). Kiedy słów było mniej niż obiektów ($w < d$), język nie był efektywny, gdyż poziom sukcesu komunikacyjnego utrzymywał się nieco poniżej wartości maksymalnej. Spowodowane to było występowaniem homonimów: niektóre słowa miały w słownikach graczy więcej niż jedną interpretację, w dodatku u różnych graczy mogły to być różne ich kombinacje, co dodatkowo zmniejszało lingwistyczną koherencję populacji. I wreszcie, w przypadku gdy liczba słów przewyższała liczbę obiektów ($w > d$), w języku mogły się pojawiać synonimy, czyli różne słowa o tym samym znaczeniu. Jak pokazały wyniki symulacji, tempo ewolucji systemu do stanu pełnej koherencji było w tych warunkach najszybsze, a finalnie niektóre synonimy zupełnie „wychodziły z użycia” (bowiem ich wagi zerowały się dla wszystkich asocjacji).

Co ciekawe, Lenaerts *et al.* [2005] przebadali też system hybrydowy, modyfikując wyjściowy model tak, aby realizować w nim diagonalny transfer języka. Populacja została więc podzielona na dwie rozłączne grupy – nauczycieli i uczniów. Nauczyciele zostali wyposażeni w słowniki zapewniające im językową koherencję w obrębie ich grupy. W grze w nazywanie tylko oni byli mówcami, zaś słuchaczami wyłącznie uczniowie i tylko słowniki tych ostatnich były aktualizowane. Również w tym wariantcie dla liczby słów równej liczbie obiektów ($w = d$) populacja osiągała stan pełnej lingwistycznej koherencji, przy czym mierzona była ona zarówno między obu grupami, jak i wewnątrz grupy uczniów. Innymi słowy, uczniowie mogliby się z sukcesem komunikować nie tylko z nauczycielami, ale także wzajemnie między sobą. Z kolei, gdy do języka nauczycieli wprowadzone zostały dwa homonimy ($w < d$), to poziom koherencji międzygrupowej zmalał, podobnie jak w oryginalnej wersji tego modelu, natomiast koherencja wewnątrz grupy uczniów spadła dramatycznie. Powodem było to, że uczniowie przyswajali te dwuznaczne słowa tylko w jednym z ich znaczeń, ale niekoniecznie tym samym dla wszystkich uczniów, przez co nie wszyscy mogliby się wzajemnie zrozumieć. I wreszcie dla ($w > d$) słowniki nauczycieli zawierały po dwa te same synonimy. W tym przypadku koherencja między obu grupami była znowu maksymalna, natomiast wewnątrz grupy uczniów nieco poniżej tego optimum. Jak objaśnia-

li autorzy, uczniowie nie mogli w tej sytuacji dobrze przyswoić sobie pewnych znaczeń [Lenaerts *et al.* 2005, s. 576].

Gwarancja wyłonienia się języka wspólnego dla wszystkich jego użytkowników byłaby bardzo pożądana dla takich praktycznych zastosowań, jak na przykład grupa robotów umieszczonych w nowym, nieznanym wcześniej środowisku, dla którego konieczne byłoby wykreowanie od podstaw adekwatnego języka, albo też wieloelementowy system agentów softwarowych, które muszą wypracować wspólny system wymiany informacji. Oczywiście, jeśli chodzi o język naturalny, to nie jest on ani minimalny, ani efektywny, bo występują w nim zarówno synonimy, jak i homonimy. Dlatego też modele generujące języki efektywne lub minimalne mogą być tylko pierwszym krokiem w badaniach problemu uzgadniania wspólnego języka, choć – jak utrzymują na przykład De Vylder i Tuyls [2006] – i one powinny dostarczyć istotnych wyników pozwalających lepiej rozumieć teoretyczne aspekty tego typu procesów analizowanych w bardziej skomplikowanych modelach przy bardziej realistycznych założeniach.

Na ogół jednak w grach językowych przyjmuje się dodatkowe założenia z góry wykluczające homonimię (zaproponowali je, właściwie jednocześnie i niezależnie, De Vylder i Tuyls [2006] oraz Baronchelli *et al.* [2006b]; kwestia ta była już sygnalizowana na s. 104). Przed rozpoczęciem gry każdy agent ma pusty słownik. Kiedy agent zostaje mówcą, a nie zna żadnego słowa odnoszącego się do obiektu, który wybrał jako temat wypowiedzi, tworzy dla niego nowe słowo. Można przyjąć, że prawdopodobieństwo wykreowania słowa identycznego z jakimś już istniejącym jest zanedbywalnie małe. Ponadto zakłada się, że słuchacz, poznając nowe słowo, tworzy z nim asocjację dopiero wtedy, gdy mówca wskaże mu właściwy obiekt. W tej sytuacji w wyłaniającym się języku homonimy nie powinny występować. To z kolei oznacza, że zbiory słów używanych na oznaczenie różnych obiektów pozostają rozłączne. Zatem, badając generowanie i ewolucję synonimów (słów oznaczających ten sam obiekt), mamy gwarancję, że dynamika tych procesów dla każdego ze zbiorów synonimów jest, po pierwsze, niezależna od pozostałych, a po drugie, równoważna im, wobec czego wystarczy przeanalizować ich przebieg dla jednego tylko obiektu. Innymi słowy, dynamika n -obiektowej gry w nazywanie redukuje się do kombinacji n **niezależnych gier jednoobiektowych**. Z tego też powodu

w modelach tego typu bada się na ogół tylko przypadek jednoobiekto-
wy [na przykład De Vylder, Tuyls 2006; Baronchelli *et al.* 2006b; Wang
et al. 2007; Maity *et al.* 2013; Li *et al.* 2013; Gao *et al.* 2014, i in.].
To nie tylko eliminuje już całkowicie ewentualny problem homonimii,
ale także sprawia, że słuchacz zawsze poprawnie „odgaduje” obiekt.
Tak więc możemy w naszych rozważaniach w ogóle pominąć procedurę
odgadywania, wobec czego także jej wynik nie będzie już determino-
wał sposobu aktualizacji stanów wewnętrznych agentów po interakcji.
Sukces lub porażkę aktu komunikacyjnego będzie natomiast warunko-
wać już tylko to, czy słuchacz zna słowo użyte przez mówcę. W tej
uproszczonej wersji będzie to już właściwie opisana w następnej części
tego podrozdziału (jednoobiektowa) gra obserwacyjna. Natomiast wy-
stępowanie w języku homonimii i synonimii będzie bardziej szczegóło-
wo dyskutowane w ramach modelu wieloobiektoowego przedstawionego
w rozdziale 4.

*

Gra w nazywanie nie ma aspektu niepewności referencyjnej (*re-
ferential uncertainty*), gdyż obiekty są jednoznacznie identyfikowalne
oraz finalnie następuje tu (niewerbalny) transfer znaczenia między gra-
czami, ujawniający je słuchaczowi. Gdy rezygnuje się z takiego ujed-
noznacznienia komunikatu, eliminując wskazywanie jego tematu przez
mówcę, gra staje się bardziej złożona. Nazywa się ją grą w zgadywanie
(*guessing game*), gdyż wobec pojawienia się wspomnianej referencyj-
nej niepewności słuchacz może tylko zgadywać (ale nie będzie miał
pewności), do czego odnosi się wypowiedź mówcy. Taka sama sytuacja
ma miejsce, gdy słowa używane w grze (ze wskazywaniem) nie są już
jednoznacznymi identyfikatorami obiektów (nazwami własnymi), lecz
mogą odnosić się do rozmaitych ich cech, takich jak: kolor, kształt,
wielkość, położenie itd. (por. też s. 91 i 99).

Ten sam problem rozwiązują (bardzo skutecznie) dzieci uczące się
mówić. Nabywając słowa, muszą je poprawnie przyporządkowywać ich
odniesieniom (*mapping problem*). Jak radzą sobie z niezliczoną liczbą
potencjalnych referencji, co pomaga im zredukować liczbę możliwych
znaczeń? Proponuje się różne możliwe mechanizmy wspomagające ten
proces uczenia się (zob. na przykład w pracy Paula Blooma [2000]).
Jednym z nich jest **wspólne skupienie uwagi** (*joint attention* [To-

masello, Todd 1983]) interlokutorów na jakimś obiekcie, uzyskiwane w danej interakcji dzięki, między innymi, wskazywaniu go, przenoszeniu wzroku, wpatrywaniu się czy innym jeszcze niewerbalnym albo werbalnym wskazówkom; istotna jest tutaj także umiejętność rozumienia intencji drugiej osoby (*Theory of Mind*). Uważa się, że wspólna uwaga ułatwia dzieciom wyłowienie z aktualnej konsytuacji tych jej aspektów, które są w danym przypadku istotne, a w szczególności tych, do których odnosi się użyta w niej wypowiedź [Clark 2009]. Dzieciom mogą też pomagać przekazywane w różnej formie **informacje zwrotne**, dotyczące ich słownictwa i korygujące jego użycie (*corrective feedback* [Chouinard, Clark 2003]). Zapewne wykorzystują one również **ogólne mechanizmy uczenia się**, a więc postrzegając istotne elementy sytuacji (obiekty, ich własności, akcje, zdarzenia etc.), kojarzą je ze słowami, które są najczęściej używane w ich obecności (*salience-association-frequency* [Hirsh-Pasek *et al.* 2000]). Ponadto dzieci mogą stosować **uczenie się międzysytuacyjne** (*cross-situational learning*), gromadząc więcej informacji na temat danego słowa z różnych jego wystąpień i na przykład wywodząc jego znaczenie jako przekrój zbiorów jego możliwych znaczeń z tych wszystkich sytuacji [Akhtar, Montague 1999; Yu, Smith 2007]. I wreszcie, aby zredukować stopień niezdeterminowania odniesienia słów, uczące się ich dzieci mogą opierać się na specyficznych dla nauki języka regułach, takich jak choćby **zasady konwencjonalności** czy kontrastu (*principle of conventionality, principle of contrast* [Clark 2009]). Według pierwszej z nich wierzymy w konwencje językowe, w szczególności zaś dzieci uważają, że dla poszczególnych znaczeń istnieją skonwencjonalizowane formy odpowiednie dla ich wyrażania, to jest takie, których zastosowania oczekiwałby każdy użytkownik języka. Z kolei według **zasady kontrastu** różnice w formie oznaczają różnice w znaczeniu (por. też s. 177). Eve V. Clark [1987] wyprowadza z zasady kontrastu, oprócz wyżej wspomnianej zasady konwencjonalności, następujące jeszcze wnioski: różne słowa oznaczają różne rzeczy, a więc nie ma absolutnych synonimów; znane słowa mają pierwszeństwo przed nowymi; nowe słowa wypełniają **luki** w leksykonie (odpowiadają takim znaczeniom, którym dotąd brak było jeszcze odpowiedniej formy wyrazowej). Tego typu warunki ograniczają oczywiście dopuszczalne inferencje dotyczące znaczeń, jakie można przypisać nowym słowom.

Które z tych mechanizmów mogą być istotne dla agentów budujących system komunikacji w formie wspólnego słownika? Paul Vogt [2000] szukał odpowiedzi na to pytanie, badając różne warianty gry w nazywanie oraz gry w zgadywanie. Były one poprzedzane **grą w odróżnianie** (*discrimination game*), rozgrywaną indywidualnie przez każdego agenta, a polegającą na takiej kategoryzacji obiektów, która pozwala rozróżniać między sobą poszczególne egzemplarze (przy czym różne agenty mogą uzyskiwać tu różne wyniki w zależności od swoich możliwości percepcyjnych i zgromadzonej już wiedzy). Celem tej gry było generowanie znaczeń (tu: dystynktywnych zbiorów własności odróżniających wybrany obiekt od pozostałych w danym kontekście), które następnie były werbalizowane w grze w nazywanie. Własności reprezentowano jako pary postaci (atrybut wartość). Atrybuty odpowiadały możliwościom percepcyjnym agentów, które mogły być zarówno symulowane w stworzonych dla nich wirtualnych światach [Vogt, Divina 2007], jak i rzeczywiste dla agentów implementowanych w fizycznie istniejących robotach działających w realnym świecie [Vogt 2000, 2003].

Jeśli możliwych zbiorów dystynktywnych jest więcej niż jeden, to są one dla słuchacza źródłem referencyjnej niepewności. Przykładowo, kiedy trzeba odróżnić wysokiego bruneta od niskiego blondyna, to pojawiają się trzy możliwości: własność (wzrost wysoki), własność (kolor brunet) oraz zestaw obu tych własności ((wzrost wysoki) (kolor brunet)). Natomiast kiedy w ogóle brak własności dystynktywnych (na przykład trzeba odróżnić wysokiego blondyna od innego wysokiego blondyna), to albo należy dołączyć dodatkowy atrybut (powiedzmy wagę), albo uszczegółowić dostępną kategorię, przykładowo: (kolor ciemny-blondyn), (kolor średni-blondyn), (kolor jasny-blondyn). Podane przykłady są oczywiście pogładowe, gdyż w praktyce agenty operują na różnych przedziałach liczbowych, w których mieszczą się konkretne wartości odpowiednich parametrów i które w miarę potrzeb mogą ulegać dalszym podziałom na bardziej szczegółowe kategorie (rozumiane ogólnie jako dowolne obszary w przestrzeni własności). W trakcie tego rodzaju gry językowej (gry w nazywanie połączonej z grą w odróżnianie) agenty tworzą więc nie tylko wspólny leksykon, ale i wspólną ontologię [Steels 2000b]. Zbiór kategorii jest tu kolejnym dynamicznym systemem, który wyłania się i samoorganizuje dzięki mechanizmom se-

lekcji, adaptacji i uczenia się („przeżywają” te kategorie, które przynoszą sukcesy w grach językowych).

Wspomniane wyżej różne warianty gier językowych analizowanych przez Vogta różnią się między sobą przede wszystkim zakresem informacji dostępnych dla graczy i wynikającymi stąd strategiami uczenia się wspólnego leksykonu. Dla zbadania wpływu informacji ekstralingwistycznych na tworzenie się wspólnego słownika agentów Vogt [2000] zaimplementował najpierw wszystkie możliwe konfiguracje gry, w których odpowiednio występowały, lub nie występowały, mechanizmy wspólnej uwagi (*joint attention*) oraz przekazywania informacji zwrotnych (*corrective feedback*). Wspólna uwaga ustalana jest w ten sposób, że mówca jeszcze przed swoją wypowiedzią językową przekazuje słuchaczowi informację, jaki jest jej temat (powiedzmy, wskazując na dany obiekt). Informacje zwrotne dotyczą wyniku gry (sukces czy porażka), wpływając tym samym na adaptację słowników agentów. Gry realizujące cztery możliwe kombinacje tych dwóch mechanizmów Vogt nazwał: grą ostensywną (w demonstrowanie), grą obserwacyjną, grą w zgadywanie i grą egoistyczną. W **grze ostensywnej** (*ostensive game*) dostępne były i wspólna uwaga, i feedback, w **grze obserwacyjnej** (*observational game*) tylko wspólna uwaga, w **grze w zgadywanie** (*guessing game*) tylko feedback, zaś w **grze egoistycznej** (*selfish game*) żaden z tych mechanizmów (w tym przypadku gracze jakby nie dbają o to, czy się wzajemnie rozumieją, zachowują się więc w pewnym sensie egoistycznie).

Agenty, zaczynając gry z pustymi słownikami, uczą się stopniowo nowych asocjacji, czyli słów powiązanych ze znaczeniami, którymi są generowane w grze w odróżnianie kategorie dystynktywne. Każdemu obiektowi może odpowiadać wiele takich kategorii. W słowniku każdej kategorii może odpowiadać wiele słów (synonimia), a każde słowo może odpowiadać różnym kategoriom (homonimia). Dla każdej interakcji ustala się wspólny dla mówcy i słuchacza aktualny kontekst składający się z pewnej liczby obiektów. Obaj gracze indywidualnie rozgrywają gry w odróżnianie dla tych obiektów. Mówca po wybraniu z kontekstu obiektu, który będzie tematem gry, wybiera ze słownika takie słowo, które odpowiada którejś z wyznaczonych dla tego obiektu kategorii; jeśli nie ma żadnego, to może (z pewnym prawdopodobieństwem) wygenerować nowe, zapamiętując odpowiednią asocjację. Gra kończy się

sukcesem, gdy słuchacz ustali jako odniesienie słowa użytego przez mówcę ten sam obiekt, który mówca wybrał jako temat swojej wypowiedzi.

W przypadku gier językowych ze wspólną uwagą słuchacz każdorazowo wie, o którym obiekcie jest mowa, a więc stara się tylko znaleźć w swoim leksykonie asocjację podanego mu słowa z jakąś kategorią dystynktywną, ustaloną przez niego dla wskazanego obiektu (zauważmy, że nie musi to być ta sama kategoria, którą „miał na myśli” mówca). W tej sytuacji następuje wzmocnienie odpowiednich asocjacji poprzez zwiększenie przypisanych im wag. Natomiast gdy słuchacz nie znajdzie żadnej takiej asocjacji, to nauczy się w tym momencie nowych, łącząc dane słowo w pary ze wszystkimi ustalonymi dla danego obiektu kategoriami dystynktywnymi (alternatywnie z jedną wybraną losowo lub najefektywniejszą, czyli taką, która wśród dotychczas wykorzystywanych kategorii dystynktywnych zapewniała stosunkowo dużą liczbę sukcesów). Vogt i Coumans [2003] traktują tego typu gry jako realizację hipotezy asocjacyjnego uczenia się słów (*associative learning*), czyli nabywania ich w sytuacji, gdy jednocześnie prezentowany jest ich desygnat.

W przypadku braku wspólnej uwagi, to znaczy, gdy słuchacz nie zna z góry tematu gry, musi on próbować zgadnąć, który spośród obiektów w danym kontekście nim jest. Analizuje wówczas wszystkie możliwości, szukając asocjacji danego słowa z odpowiadającymi poszczególnym obiektom kategoriami dystynktywnymi. I znów, gdy żadnej nie znajdzie, to zapamięta wszystkie możliwe (lub losową, ewentualnie tę o najefektywniejszym znaczeniu), zaś gdy znajdzie różne takie asocjacje, to wybierze najsilniejszą i o najefektywniejszym znaczeniu. Sukcesem będzie wybranie takiej asocjacji, której znaczenie (kategoria dystynktywna) odpowiada temu samemu obiektowi, który wybrał mówca jako temat swojej wypowiedzi. Asocjacje (i kategorie) przynoszące sukcesy wzmacnia się, zapewniając ich częstsze użycie w przyszłości, co zwykle prowadzi do dalszych ich sukcesów itd.; właśnie takie dodatnie sprzężenie zwrotne prowadzi w końcu do, choćby częściowego, uzgodnienia leksykonów agentów.

Alternatywą dla uczenia się asocjacyjnego może być uczenie się ze wzmocnieniem (*reinforcement learning*), efektywne szczególnie wtedy, gdy uczący się uzyskuje pełne informacje zwrotne, pozwalające

na odpowiednie korygowanie jego języka (*corrective feedback*). Taką informacją zwrotną będzie przede wszystkim sam wynik gry (sukces czy porażka, a więc ustalenie, czy słuchacz wybrał ten sam obiekt co mówca) oraz ewentualnie w przypadku porażki wskazanie słuchaczowi rzeczywistego tematu gry (to jest tego obiektu, który wybrał mówca). Te asocjacje, które uzyskują pozytywny feedback, ulegają wzmocnieniu i będą w dalszym ciągu częściej stosowane od tych, które miały negatywny feedback i zostały osłabione. Dodatkowo w przypadku transferu znaczenia do słuchacza po porażce może on odpowiednio rozszerzyć swój słownik, tak aby w przyszłości odnosić sukcesy. Jeśli zaś w grze nie ma mechanizmu przekazywania graczom informacji zwrotnych, to w efekcie obaj nie znają wyniku gry i nie mogą bezpośrednio wykorzystywać informacji o sukcesie czy porażce do aktualizacji swojej wiedzy językowej. Jedynym kryterium decydującym o sposobie adaptacji ich słowników będzie wtedy to, czy udało im się znaleźć w swoich słownikach adekwatne asocjacje – to znaczy pasujące do wybranego obiektu w przypadku mówcy oraz do któregoś z obiektów z kontekstu w przypadku słuchacza – jednak bez wiedzy o tym, czy faktycznie odnosiły się one do tego samego obiektu. W każdym razie brak takich adekwatnych asocjacji każdy z graczy traktuje jako swoją porażkę (wymagającą stosownego rozszerzenia słownika o nowe asocjacje), zaś ich znalezienie jako wynik pozytywny, pozwalający wzmocnić odpowiednie asocjacje. Można powiedzieć, że taki wynik gracze „uważają” za sukces, choć w istocie niekoniecznie miał on miejsce (gdyż słuchacz mógł niepoprawnie zidentyfikować obiekt, o którym komunikował mu mówca).

Choć w tych różnych wariantach gier językowych ze względu na dostępność poszczególnych typów informacji przyjęte są różniące się w szczegółach schematy adaptacji leksykonów, to jednak ich ogólny mechanizm jest taki sam. Jak określa to Vogt [2000, s. 93], implementuje on generowanie, ewolucję kulturową oraz selekcję jako mechanizmy istotne w procesie wyłaniania się języka. Generowanie to tworzenie nowych „haseł słownikowych” niezbędnych dla skutecznego porozumiewania się, ewolucja kulturowa realizuje się przez transfer i asymilację słów między partnerami interakcji, i wreszcie mechanizm selekcji jest sterowany wzbudzaniem skutecznych i hamowaniem nieskutecznych w komunikacji elementów (tak asocjacji, jak i kategorii).

W poszczególnych grach osadzani w różnych kontekstach gracze mogą każdorazowo w inny sposób kategoryzować te same obiekty. Ponadto zawarte w ich leksykonach asocjacje reprezentują, zwłaszcza początkowo, relacje wielowieloznaczne między słowami a znaczeniami, w dodatku różne u różnych graczy. To wszystko czyni cały system bardzo złożonym. Jednak stopniowo dzięki mechanizmowi uczenia się ze wzmocnieniem system samoorganizuje się, dążąc do jednoznaczności, co oznacza, że w użyciu pozostaje coraz mniej synonimów i homonimów, a słowniki graczy upodabniają się. Analogicznie upodabniają się zestawy kategorii (znaczeń) stosowanych przez agentów. Bardzo ciekawą obserwacją Vogta [2000, s. 95] jest występujący w takim systemie wysoki stopień koewolucji języka i ontologii.

Porównując wyniki poszczególnych wariantów, Vogt [2000, s. 157 i n.] skonstatował, że w badanych przez niego grach językowych dla wyłonienia się efektywnego leksykonu niezbędna jest jakaś ekstralingwistyczna forma przekazu informacji. Przede wszystkim w grze egoistycznej, w której brak mechanizmów zarówno wspólnej uwagi, jak i feedbacku (informacji zwrotnych), w ogóle nie dochodzi do wykształcenia się leksykonów zapewniających sukces komunikacyjny. Z kolei najlepsze wyniki (sukcesy na poziomie prawie 70%, przy właściwie identycznych pozostałych charakterystykach) uzyskane zostały w obu wariantach ze wspólną uwagą, to jest w grze ostensywnej oraz grze obserwacyjnej. Brak większych różnic między tymi dwoma wariantami jest naturalny, gdyż w sytuacji wspólnej uwagi feedback (którym różni się gra ostensywna od obserwacyjnej) jest właściwie redundantny. Wspólnym dla obu wariantów mankamentem jest tymczasem duży stopień homonimii i synonimii w słownikach agentów. Jak się wydaje, ustalenie wspólnej uwagi zmniejsza presję mechanizmu selekcji (działającego na asocjacje tak, że następuje rozstrzygnięcie ich wieloznaczności), co jest spowodowane tym, że w takiej grze optymalizacja leksykonu nie jest kluczowa dla osiągania sukcesów komunikacyjnych. Intuicyjnie jest to zgodne z naturalnym odczuciem, że wspólna uwaga czyni komunikację językową do pewnego stopnia zbyteczną. Natomiast w grze w zgadywanie (z feedbackiem, lecz bez wspólnej uwagi – a wobec jej braku to komunikacja werbalna niesie zasadnicze informacje, doprecyzowane potem przez mechanizm zwrotny) poziom sukcesu jest co prawda dwukrotnie niższy, za to wyewoluowane w tej grze słowniki mają większą

wartość informacyjną ze względu na niższy stopień homonimii i synonimii, a tym samym są bliższe efektywnemu i minimalnemu, czyli optymalnemu (wzajemnie jednoznaczному). Dłuższe symulacje najprawdopodobniej lepiej zestroiłyby słowniki graczy, co zwiększyłoby liczbę sukcesów także w tym wariancie.

Potwierdziły to także późniejsze symulacje tych gier tak dla agentów robotycznych [Vogt 2001], jak i dla agentów wirtualnych (czyli niezaimplementowanych w robotach działających w rzeczywistym środowisku), które dysponowały już ustaloną i wspólną dla wszystkich ontologią (zestawem znaczeń), a więc odbywały się bez uprzedniego rozgrywania gry w rozróżnianie [Vogt, Coumans 2003]. Uzyskiwany w tym przypadku stuprocentowy sukces komunikacyjny gier obserwacyjnych i w zgadywanie oraz zbieżność ich innych charakterystyk (jak zanikająca synonimia czy homonimia) autorzy przypisali idealizacji warunków, czyli właśnie zadanej ontologii oraz brakowi problemów wynikających z szumów czy fizycznych ograniczeń robotów. Nawet w grze egoistycznej sukces, choć bez porównania wolniej niż w pozostałych grach, dążył do wartości maksymalnej, aczkolwiek słowniki agentów cechowała wtedy bardzo duża liczba synonimów i homonimów. Brak wspólnej uwagi oraz feedbacku skutkowało tu słabszą presją na ujednoznacznianie poznanych asocjacji – gracze pamiętali więc wszystkie, z którymi się spotkali (stąd wysoki poziom sukcesu) z mniej więcej równymi wagami.

Vogt [2000, s. 181] podsumowuje więc swoje wyniki stwierdzeniem, że dla wyłonienia się spójnego systemu komunikacji jego agentów pierwszorzędą rolę odgrywa mechanizm wspólnej uwagi, a w przypadku jego braku niezbędny staje się feedback. Wspólna uwaga umożliwia szybsze uczenie się, ale to feedback pozwala utworzyć efektywniejszy (bliższy optymalnemu) leksykon. Autor zwraca uwagę, że kwestia, do jakiego stopnia w procesie nabywania języka wykorzystuje się sygnały niewerbalne i inne wskazówki, pojawiła się już w kontekście problemu ubóstwa bodźców (*poverty of the stimulus argument*), czyli pytania, jak w ogóle możliwe jest nauczenie się (pełnego) języka, skoro zapoznajemy się tylko z małym jego fragmentem i jak to się dzieje, że potrafimy generować i rozumieć zupełnie nowe wypowiedzi? Dalej Vogt prezentuje bardzo ciekawą dyskusję swoich wyników na tle badań psycholingwistycznych, dotyczących akwizycji słownictwa przez dzieci. Vogt cytuje między innymi różne opinie na temat braku tak zwanego negatywnego

feedbacku (*no negative feedback evidence*), czy nawet feedbacku w ogóle, oraz o początkowym stosowaniu nadmiernych uogólnień (*overgeneralizations*) przez dzieci, a szczególnie o wpływie wspólnej uwagi na nabywanie języka. W tym kontekście Vogt [2000, s. 194 i 195] powołuje się między innymi na rezultaty badań Michaela Tomasello, który z jednej strony znalazł pozytywną korelację między okresami wspólnej uwagi a osiąganą potem wielkością słownika (co potwierdził także Martyn Barrett), a z drugiej zauważył, że uczenie się leksykonu może następować zarówno w ostensywnych, jak i nieostensywnych kontekstach (w szczególności zaś nie jest do tego konieczne wskazywanie – o ile występuje feedback). Prawdopodobnie zatem jest tak, że dzieci wykorzystują w zależności od sytuacji różne dostępne informacje, tak lingwistyczne, jak i ekstralingwistyczne, dopasowując odpowiednio stosowane strategie kojarzenia słów ze znaczeniami (w tym także inne niż omówione powyżej, jak choćby uzupełnianie luk proponowane przez Clark, por. s. 121). Vogt sugeruje więc zaprojektowanie takich agentów, które zależnie od sytuacji w różnych interakcjach komunikacyjnych grają w różne gry językowe.

Vogt i Coumans [2003, par. 5.4] zauważają też, że wolniejsza zbieżność gry egoistycznej jest zgodna z obserwacjami, według których dzieci w sytuacji rzadszego występowania epizodów wspólnej uwagi (typowej ponoć dla kultur Wschodu) uczą się wolniej swoich pierwszych słów. Dalej [par. 5.5], odnosząc się też do zjawiska szybkiego mapowania (*fast mapping phenomenon*), czyli do obserwacji psycholingwistycznej, że znaczenia nowych słów często są nabywane błyskawicznie, już po jednej czy dwóch ekspozycjach, autorzy skonstatowali, że zjawisko to może występować tylko w sytuacji użycia wspólnej uwagi lub feedbacku, jak w grach obserwacyjnej lub w zgadywanie, gdyż uczenie się w grze egoistycznej przebiega zbyt wolno. Ta ostatnia gra nie wydaje się też właściwym mechanizmem tłumaczącym powstanie języka i początki jego funkcjonowania jako środka komunikacji symbolicznej. W symulacjach, w których stopniowo zwiększana była liczba graczy, zbieżność gry egoistycznej do stanu koherencji językowej całej populacji dramatycznie spadała, inaczej niż w grze obserwacyjnej czy w zgadywanie. Wśród naczelnych człekokształtnych człowiek jest najprawdopodobniej jedynym gatunkiem wykazującym się niezbędnym dla ustalenia wspólnej uwagi zrozumieniem strategii interakcji społecz-

nych oraz intencji innych osobników, jak też stopniem kooperacji koniecznym dla rozwijania języka [Vogt, Coumans 2003, par. 5.13 i cytowania tamże]. Dlatego na przykład szympanse byłyby ograniczone do stosowania gry egoistycznej jako jedynej strategii nabywania języka, co jak wynika z symulacji, jest bardzo nieefektywne. Może to być jedną z (niewątpliwie licznych) przyczyn tego, że inne naczelne – poza człowiekiem – nie rozwinęły języka. Jednakże kiedy w warunkach doświadczalnych badacz angażuje szympansa w zadania wymagające wspólnej uwagi, to zwierzę jest w stanie opanować w pewnym stopniu komunikację symboliczną (może być wtedy wykorzystywana gra osten-sywna lub obserwacyjna). Z kolei zaobserwowany przypadek nabycia symbolicznych znaków komunikacyjnych przez szympansiątko bonobo, nietrenowane w tym kierunku, lecz tylko towarzyszące swojej matce, z którą przeprowadzano treningi komunikacji, odpowiadałby jednak grze egoistycznej.

Autorzy [Vogt, Coumans 2003, par. 5.17] zwracają też uwagę, że stosowana do adaptacji słowników strategia hamowania obocznego, polegająca tu na wzmacnianiu wybranej asocjacji, przy jednoczesnym osłabianiu pozostałych, zgodna jest z zasadą kontrastu leksykalnego, wprowadzoną przez Clark („Every two forms contrast in meaning” [1987, s. 2]; zob. też s. 121 i 177). W grze egoistycznej, czyli bez wspólnej uwagi i feedbacku, strategia ta działa jednak w ograniczonym zakresie, gdyż w sytuacji, gdy znaczenie komunikatu nie jest jednoznacznie ustalone, hamowane są wszystkie elementy niewystępujące w danym kontekście (a te z kontekstu są wzmacniane), przez co konkurencja między nimi jest słaba i selekcja nie działa zbyt efektywnie. Innym jeszcze mechanizmem, który można by tu stosować, jest na przykład stopniowe zapominanie najsłabszych asocjacji (*forgetting mechanism*).

*

We wcześniejszej prezentacji gry w nazywanie już kilkakrotnie cytowana była bardzo znacząca praca Andrei Baronchellego *et al.* [2006b]. Autorzy, głównie fizycy i matematycy, oprócz prezentacji wyników swoich symulacji, przedstawili też ich analityczne oszacowania i pogłębioną

dyskusję **dynamiki semiotycznej** (albo dynamiki semiozy). Zdefiniowali oni wariant gry w nazywanie znany jako minimalny. Model jest tak skonstruowany, aby wymagał możliwie najmniejszej mocy przetwarzania. Inaczej niż w innych modelach osiągnięcia konsensusu w populacji, agenty nie przechowują tutaj informacji o frekwencji czy liczbie sukcesów poszczególnych słów ani nie stosują żadnych heurystyk w rodzaju wyboru „najlepszego” (pod jakimś względem) słowa czy też uczenia się międzysytuacyjnego. Autorzy zrezygnowali z bardziej wyrafinowanych czy realistycznych strategii po to, aby model był jak najprostszy, co umożliwiło przeprowadzenie jego ściślejszej teoretycznej analizy. Proste reguły działania pozwoliły prześledzić ewolucję badanego modelu i opisać jego dynamikę semiotyczną, czyli pokazać kolejne etapy i zasady rządzące makroskopowym procesem semiozy, w którym populacja rozwija wspólny, efektywny system komunikacji w oparciu o mikroskopową dynamikę interakcji agentów. Proces ten następuje wyłącznie dzięki samoorganizacji systemu, bez żadnej ingerencji z zewnątrz, jak również bez żadnego wewnętrznego centralnego sterowania systemem.

Przypomnijmy szczegóły strategii **minimalnej gry w nazywanie** (zob. też s. 110). Wszystkie agenty mają na początku puste słowniki. Mówca komunikuje słuchaczowi słowo odpowiadające obiektowi wybranemu jako temat interakcji (jeśli nie ma takiego w słowniku, to tworzy nowe). Jeśli słuchacz ma przekazane mu słowo w swoim słowniku (przyporządkowane temu samemu obiektowi), to interakcja kończy się sukcesem i obaj gracze pozostawiają w swoich słownikach tylko to jedno zwycięskie słowo, usuwając wszystkie pozostałe (dla danego obiektu). W przeciwnym przypadku interakcja kończy się porażką i tylko słuchacz modyfikuje swój słownik, dodając do niego asocjację nowo poznanego słowa z danym obiektem. Zakłada się przy tym, że każdy z agentów może grać z każdym innym, czyli populacja jest homogeniczna i nie ma żadnej określonej struktury, a ujmując to topologicznie, rozmieszczona jest na grafie pełnym. Ponadto zakłada się (konsekwencje tego omawiane już były na s. 119), że liczba możliwych słów jest tak duża, że prawdopodobieństwo dwukrotnego utworzenia tego samego słowa dla różnych obiektów jest praktycznie zaniedbywalne, wobec czego nie będą występować tu homonimy. Z kolei w takiej sytuacji, gdy zbiory słów odpowiadających różnym obiektom są roz-

łączone, proces ustalania wspólnego słowa dla danego obiektu przebiega zupełnie niezależnie od analogicznych procesów dla innych obiektów. Można więc bez utraty ogólności rozważać przyjąć, że w modelu dany jest tylko jeden obiekt, co jeszcze bardziej upraszcza ten model, zarówno na poziomie reprezentacji, jak i przetwarzania: w słownikach nie trzeba już przechowywać asocjacji, a tylko listę słów dla jednego obiektu, a agenty nie muszą już dopasowywać słów do obiektów czy odwrotnie, tylko sprawdzają i ewentualnie modyfikują tę jedyną listę. Porażka następuje tylko wówczas, gdy słuchacz nie znajdzie na tej liście zakomunikowanego mu słowa (i wtedy dopisuje je do listy), a sukces – gdy już ma to słowo (wówczas usuwa z listy wszystkie inne i tak samo postępuje też mówca).

W trakcie symulacji zmierzono wartości różnych parametrów systemu i wyznaczono ich zmienność w czasie. Okazało się, że przebieg zmienności sukcesu komunikacyjnego, czyli odsetka interakcji zakończonych sukcesem, odpowiada **krzywej S** (krzywej sigmoidalnej, inaczej logistycznej, reprezentującej często przebieg dyfuzji innowacji). Sukces, startując z poziomu zerowego, po okresie bardzo powolnego wzrostu gwałtownie rośnie i asymptotycznie osiąga wartość maksymalną. System podlega więc w pewnym momencie skokowej zmianie: jest to **przejście fazowe** ze stanu nieuporządkowanego do uporządkowanego (*disorder/order transition*). Badanie liczby wszystkich słów w systemie oraz liczby różnych słów potwierdziło, że (zaczynając od pustych słowników) po długo trwającym stanie, w którym jednocześnie funkcjonuje mnóstwo synonimów (rzędu połowy liczebności populacji), nagle następuje bardzo szybkie przejście do stanu, w którym wszystkie agenty mają w słownikach dokładnie jedno i to samo słowo (a zanikają wszelkie jego synonimy); jest to więc stan pełnej koherencji językowej populacji, w którym każda interakcja kończy się sukcesem. W tym momencie system osiąga swój **stan absorpcyjny**, czyli taki, który już nie ulega dalszym zmianom (inaczej mówiąc, prawdopodobieństwo pozostania w nim wynosi 1). Stan absorpcyjny jest tu więc stanem, w którym jedno ze słów powstałych w toku ewolucji tego systemu wygrało rywalizację z pozostałymi i zostało przyswojone przez całą populację jako wspólna dla niej konwencja. Warto zauważyć, że do momentu przejścia istnieje wiele (tyle, ile synonimów) takich potencjalnych stanów absorpcyjnych, z których żaden nie jest w jakikolwiek

sposób wyróżniony. Jednak w pewnym momencie system samorzutnie wybiera jedną z tych równoważnych opcji, można więc przyjąć, że zachodzi tu przejście fazowe, w którym następuje tak zwane **spontaniczne złamanie symetrii**.

Badacze, dokonując oszacowań pewnych wielkości, przedstawiają argumenty świadczące o tym, że powyższy stan absorpcyjny jest w istocie tak zwanym **atraktorem**, to znaczy, że ewolucja tak zdefiniowanej gry w nazywanie zawsze prowadzi do takiego właśnie stanu. Przy dynamicznych regułach tego modelu stan pełnej koherencji językowej jest właściwie jego jedynym możliwym stanem stabilnym. Autorzy szacują, że stan ten jest osiągany z prawdopodobieństwem równym jedności, jak sami jednak przyznają, brakuje na razie formalnego dowodu tej własności. Nawiasem mówiąc, tego rodzaju dowód został przedstawiony dla pewnej transformacji owego modelu z formy probabilistycznej typu *turn-based*, gdzie losowo wybrane pary agentów wchodzi w kolejne interakcje, do formy deterministycznej typu *sampling-response*, gdzie agenci próbują stan populacji i odpowiednio wzmacniają swoje zachowania, polegające na eliminacji synonimów; pokazuje się tu, że taka lokalnie stosowana tendencja prowadzi finalnie do stanu globalnego o tejże własności (to jest bez synonimów) [De Vylder, Tuyls 2006]. Choć istotnie wydaje się, że obie formy modelu są równoważne, nie został jednak przeprowadzony ścisły dowód tej tezy.

Następnie Baronchelli *et al.* [2006b] analizują zachowanie modelu, próbując przede wszystkim określić skale czasowe odpowiadające trzem wyróżnionym fazom jego rozwoju, zgodnym z uzyskaną krzywą S . W układzie N agentów pierwszy etap, w którym ich interakcje są jeszcze zupełnie nieskorelowane, będący przede wszystkim fazą tworzenia nowych słów, ma czas trwania (mierzony jako liczba interakcji) rzędu N . W kolejnym etapie, w którym następuje stopniowe budowanie korelacji między agentami, oraz w ostatnim, gdy system gwałtownie (a nie, jak można by intuicyjnie sądzić, nadal sukcesywnie) osiąga stan pełnej korelacji, obowiązują już **prawa potęgowe**: zarówno całkowita liczba słów w systemie, jak i czas, w którym ta liczba osiąga swoje maksimum, i wreszcie czas zbieżności systemu (do stanu pełnej koherencji) skalują się jak $N^{3/2}$. Ponadto z porównania krzywych sukcesu komunikacyjnego dla różnych wartości parametru N okazało się, że przejście ze stanu nieuporządkowanego (z zerowym poziomem sukce-

su, czyli brakiem komunikacji) do uporządkowanego (z maksymalnym poziomem sukcesu, czyli niezawodną komunikacją) wraz ze wzrostem liczności populacji zachodzi coraz gwałtowniej.

Zbadany został też rozkład popularności słów (częstotliwości ich występowania w słownikach agentów) względem ich rangi (kolejności, według której najpopularniejsze słowo ma pierwszą rangę) w różnych momentach ewolucji systemu przed przejściem fazowym. I znów okazuje się, że rozkłady te są potęgowe (a więc mamy tu jakby analogi **prawa Zipfa** [1945] dla rywalizujących synonimów) ze zmiennym w czasie wykładnikiem. Z tej ogólnej reguły zdecydowanie wyłamuje się jednakże słowo o pierwszej randze, które w okresie bezpośrednio przed przejściem błyskawicznie zwiększa swoją popularność, stając się w końcu znane wszystkim lub prawie wszystkim agentom.

Autorzy proponują też ciekawą interpretację zachowania modelu w kategoriach **analizy sieciowej**. Otóż można rozważać układ agentów jako sieć, której każde dwa węzły są połączone osobnymi krawędziami dla każdego wspólnego słowa znanego obu agentom. Każde słowo w systemie jest więc reprezentowane przez klikę (podgraf, w którym każdy z węzłów jest połączony z każdym z pozostałych). Taka sieć zmienia się oczywiście po każdej interakcji. Po porażce następuje dodanie jednego węzła (słuchacza) do klikli odpowiadającej użytemu słowu, natomiast po sukcesie usuwane są odpowiednie węzły (mówcy i słuchacza) ze wszystkich klikli odpowiadających słowom „zapominanym” przez oba agenty. Ewolucja systemu do stanu koherencji przebiega najwyraźniej w sposób multiplikatywny, coraz bardziej zwiększając popularność jednego słowa kosztem innych. Interakcja, w której zostanie użyte najpopularniejsze słowo, ma duże szanse zakończyć się sukcesem i stąd klika reprezentująca to słowo ma tendencję do wzrostu, podczas gdy pozostałe będą tracić krawędzie. Autorzy szacują, że tuż przed przejściem fazowym, gdy praktycznie wszystkie agenty znają już najpopularniejsze słowo, liczba krawędzi usuwanych po sukcesie skaluje się z wielkością populacji jak $N^{5/4}$. Tłumaczy to ich zdaniem wspomnianą wyżej obserwację, że wraz ze wzrostem populacji przejście ze stanu nieuporządkowanego do uporządkowanego następuje coraz szybciej. Jak z zadowoleniem konkludują, z punktu widzenia ewentualnych zastosowań (na przykład dla systemów komunikacji wyłaniających się

samorzutnie w układach softwarowych agentów) zachowanie badanego modelu prezentuje bardzo pożądane cechy, a przede wszystkim dowodzi, że odpowiednio dobrane mikroskopowe reguły działania jednostek pozwalają na efektywne uzyskiwanie globalnego efektu końcowego także w przypadku bardzo dużych populacji (innymi słowy, model jest **skalowalny** do wielkich systemów).

3.

Ewolucyjny model gry w nazywanie

*The origin of language
is the last of the major evolutionary transitions.*

Eörs Szathmáry

W niniejszym rozdziale przedstawiony został pierwszy z modeli własnych autorki, a mianowicie ewolucyjny model gry w nazywanie. Charakterystyczna dla tej gry horyzontalna kulturowa transmisja języka w obrębie jednorodnej i jednopokoleniowej populacji jest tu skojarzona z wertykalną (kulturową i genetyczną). Populacja podlega tu bowiem także procesom biologicznym: osobniki rodzą się, rozmnażają, podlegają mutacjom, umierają. W procesie ewolucji presja selekcyjna wywierana jest na umiejętności komunikacyjne agentów, a ich adaptacja prowadzi do rozwoju zdolności uczenia się języka, co może być przejawem tak zwanego efektu Baldwina. W wyniku sprzężenia procesów ewolucyjnych i kulturowych następuje w systemie nagłe biolingwistyczne przejście, czyli jednoczesny gwałtowny wzrost zarówno dokonania językowych agentów, jak i ich zdolności uczenia się. System samoorganizuje się, wyłaniając wspólny dla całej populacji język, a agenty stają się biegłe w jego nabywaniu.

3.1. Podejście hybrydowe

Jak wiadomo, dwa podstawowe typy modeli, które są wykorzystywane w wieloagentowych modelach ewolucji języka, to modele gier językowych oraz modele iterowanego uczenia się (por. s. 60). Charakterystyczna dla tej drugiej klasy modeli jest **wertykalna transmisja** języka [Kirby, Hurford 2002; Smith *et al.* 2003; Kirby *et al.* 2014]. Jest on przekazywany między kolejnymi generacjami agentów, które sukcesywnie pełnią najpierw rolę uczniów, a następnie nauczycieli dla kolejnej generacji (i proces ten jest wielokrotnie iterowany). Nauczyciele komunikują sygnały odpowiadające zadanym zestawom znaczeń, a uczniowie przyswajają język, stosując statystyczne techniki uczenia się (na przykład, jako sieci neuronowe). Badano w ten sposób między innymi zjawisko wyłaniania się języka kompozycyjnego z holistycznego [Kirby 2002a; Brighton 2002]. Ponadto wertykalna transmisja języka między potomkami a ich rodzicami (ewentualnie całą grupą genetycznych przodków, czyli wyselekcjonowanych, najlepiej dostosowanych osobników, które uzyskały szansę na reprodukcję) zachodzi również w modelach ewolucyjnej teorii gier [Nowak *et al.* 1999; Nowak, Komarova 2001]. W obu tych typach modeli następuje **kulturowy przekaz** języka. Z przekazem wertykalnym mamy jeszcze do czynienia w modelach ewolucji genetycznej (por. s. 75), jednakże w ich przypadku zachodzi **genetyczna transmisja** języka. Dodajmy, że w pewnych modelach badana była także (kulturowa) **transmisja diagonalna**, która odbywa się co prawda w obrębie tylko jednej generacji, ale znów wyłącznie jednokierunkowo, to znaczy od wyróżnionej grupy nauczycieli do grupy uczniów [Lenaerts *et al.* 2005].

Symulacje modeli iterowanego uczenia się zwykle są dość wymagające obliczeniowo, stąd liczba komunikujących się w nich agentów musi być raczej mała (często jest to tylko jeden agent w każdej generacji), trudno jest zatem analizować w ten sposób problem wyłaniania się koherencji językowej w populacji. Do tego celu znacznie lepiej nadają się natomiast modele gier językowych, a w szczególności gry w nazywanie. W tym przypadku bada się **homogeniczną populację** agentów próbujących ustalić wspólny słownik dla pewnej liczby obiektów obecnych w ich środowisku. Następuje tu wyłącznie **horyzontalna transmisja** języka. Nie stosuje się w tym przypadku wymiany pokoleń, gdyż współ-

ny słownik wyłania się wyłącznie jako konsekwencja porozumiewania się ze sobą, jak równy z równym, agentów niepodzielonych na kolejne generacje (ani na jakieś odrębne grupy) nauczycieli i uczniów, lecz mogących pełnić każdą z tych ról, dzięki czemu wielokrotnie bywają i mówcami, i słuchaczami [Steels 1995, 2002; Zuidema, Westermann 2003; Baronchelli *et al.* 2006b; Wellens 2012].

Te dwa typy modeli reprezentują więc przeciwstawne podejścia, jeśli chodzi o kierunek transferu języka: wertykalny *versus* horyzontalny. W pierwszym z nich główną rolę odgrywają zmiany pokoleniowe użytkowników języka oraz proces statystycznego uczenia się języka przez kolejne generacje od poprzednich (a więc interakcje międzypokoleniowe), natomiast w drugim kluczowe są procesy komunikacji zachodzące w ramach całej, na ogół stałej, populacji (czyli interakcje kulturowe w obrębie pokolenia). Nie ulega kwestii, że w ewolucji języka te dwa procesy występują łącznie i niewątpliwie oba są relewantne, zatem pożądane byłyby modele, które obejmując obydwie te mechanizmy, umożliwiają ich jednoczesną symulację.

Z kolei wiele badań w dziedzinie ewolucji języka opiera się, jak wiadomo, na założeniu o biologicznej adaptacji i selekcji naturalnej jego użytkowników, jako procesów decydujących o rozwoju języka i ukształtowaniu się jego podstawowych cech. Uznaje się w nich, że przynajmniej niektóre cechy języka miały pewną adaptacyjną wartość oraz że ich stopniowy rozwój jest bardziej prawdopodobny niż skokowy (saltacjonistyczny). Zatem proces ewolucji biologicznej to kolejny aspekt, który również należałoby uwzględnić w modelowaniu.

I właśnie taka próba **hybrydowego połączenia** procesów osobniczych, intrapokoleniowych (kulturowych), międzypokoleniowych i ewolucyjnych została podjęta w prezentowanym poniżej ewolucyjnym modelu gry w nazywanie [Lipowski, Lipowska 2008, 2009a; Lipowska 2011]. Agenty w tym modelu próbują ustalić wspólny słownik, tak jak w typowej grze w nazywanie, ale ponadto jeszcze rozmnażają się, mutują i umierają. Są one też wyposażone w pewną cechę podlegającą adaptacji ewolucyjnej, mianowicie zdolność uczenia się (a ściślej uczenia się języka). Owa zdolność, podobnie jak pewna ograniczona część języka, jest dziedziczona (z ewentualnymi mutacjami). Język jest więc do pewnego stopnia przekazywany genetycznie (wertykalnie), ale zasadnicza jego transmisja jest kulturowa i zachodzi w ramach gry

w nazywanie (czyli horyzontalnie). W rezultacie procesy ewolucyjne (związane z dziedziczeniem), kulturowe (przekaz języka między agentami) i osobnicze (przyswajanie języka) wzajemnie na siebie wpływają. Kiedy komunikacja między agentami następuje dostatecznie często, procesy kulturowe wytwarzają rodzaj niszy ekologicznej, w której agentom opłaca się posiadanie większych zdolności uczenia się języka. Z kolei wzrost tych zdolności ułatwia i przyspiesza zachodzenie procesów kulturowych. W wyniku tego sprzężenia następuje w modelu nagłe biolingwistyczne przejście, przy którym zarówno dokonania językowe, jak i zdolności agentów gwałtownie się zmieniają. Natomiast jeśli przyjąć sensowne, jak się wydaje, założenie, że intensywność procesów komunikacyjnych rośnie z czasem, to owo gwałtowne przejście zastąpione zostaje serią łagodniejszych przemian. Można chyba więc uznać, że proponowany model pokazuje, że procesy biologiczne i lingwistyczne w jakimś momencie historii człowieka, po przekroczeniu pewnej granicy, mogły zacząć na siebie bardzo silnie oddziaływać, nakręcając spiralę coraz szybszego rozwoju naszych zdolności kognitywnych oraz języka, co niewątpliwie musiałyby się przyczynić do eksplozyjnego rozwoju naszego gatunku. „Language [...] evolved rather recently, and it was responsible for the dramatic changes that have occurred in the past 100 000 years” [Maynard Smith, Szathmáry 1995, s. 276]. Można też przyjąć, że fakt, iż uczenie się w tym modelu modyfikuje warunki przystosowania (*fitness landscape*) agentów oraz umożliwia genetyczne nabywanie zdolności uczenia się, jest przejawem szeroko dyskusowanego efektu Baldwina [Yamauchi 2004; Turney 1996]. Omawiany model ujmuje więc wszystkie trzy wymienione wyżej podstawowe aspekty ewolucji języka: osobnicze uczenie się, transmisję kulturową i ewolucję biologiczną, co jest zgodne z paradygmatem, w którym język traktowany jest jako złożony system adaptacyjny (s. 36 i n.).

3.2. Charakterystyka modelu

Rozważany model składa się ze zbioru agentów rozmieszczonych na węzłach sieci kwadratowej o długości boku L . Agenty wyposażone są w słowniki (listy słów, początkowo puste). Agenty starają się uzgodnić nazwę dla pojedynczego obiektu obecnego w ich otoczeniu. Jak wia-

domo (por. s. 119 i 131), założenie, że interakcje językowe agentów dotyczą tylko jednego obiektu, nie ogranicza ogólności rozważań i jest powszechnie stosowane w badaniach rozmaitych modeli gry w nazywanie [Baronchelli *et al.* 2006b; De Vylder, Tuyts 2006, i in.], czy też modeli zmian językowych [Nettle 1999a,b].

W każdym kroku symulacji losowo wybrany agent przyjmuje rolę mówcy komunikującego słowo wybrane ze swojego słownika słuchaczowi, wybranemu również losowo spośród najbliższych sąsiadów mówcy. Ze względu na prostotę implementacji, rolę słów w symulacji modelu pełnią liczby naturalne. Słuchacz stara się rozpoznać zakomunikowane mu słowo, to znaczy sprawdza, czy posiada je w swoim słowniku. Pozytywny lub negatywny wynik tej weryfikacji oznacza odpowiednio sukces lub porażkę danego aktu komunikacji. W omawianym w podrozdziale 2.6 modelu minimalnej gry w nazywanie [Baronchelli *et al.* 2006b; Dall’Asta *et al.* 2006b] sukces oznacza, że oba agenty pozostawiają w swoich słownikach tylko zakomunikowane słowo, natomiast w przypadku porażki słuchacz dodaje to słowo do swojego słownika (rys. 3.1).

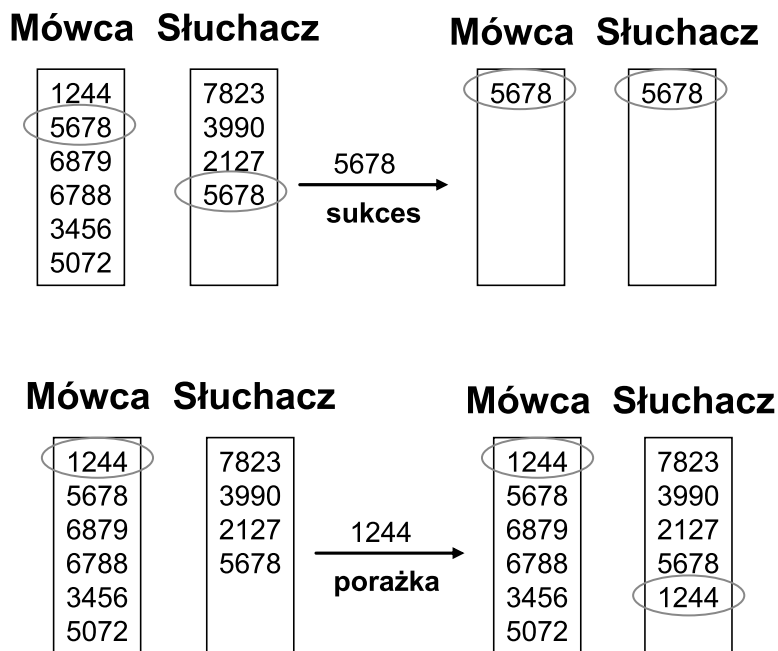
W niniejszym modelu zastosowana została jednak strategia nie-minimalna, czyli wykorzystująca wagi; przy ich aktualizacji natomiast używany jest parametr reprezentujący zdolność uczenia się agenta. Wagi przypisane są poszczególnym słowom ze słownika (i -temu słowu odpowiada waga w_i , będąca dodatnią liczbą rzeczywistą). Mówca (k -ty agent) wybiera słowo ze swojego słownika z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do jego wagi (jest to tak zwane losowanie ruletkowe; jego bardzo efektywny algorytm zaprezentowany został w pracy [Lipowski, Lipowska 2012]). Prawdopodobieństwo p_{ik} wyboru i -tego słowa przez k -tego agenta wynosi natomiast:

$$p_{ik} = w_i/W_k, \quad (3.1)$$

gdzie

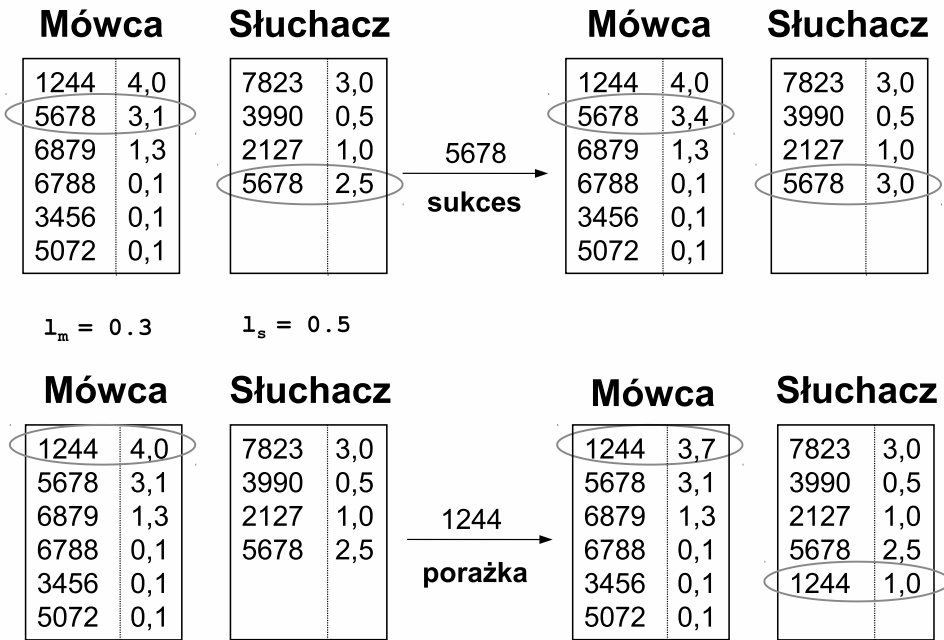
$$W_k = \sum_j w_j \quad (3.2)$$

to suma wag wszystkich słów ze słownika k -tego agenta. W przypadku, gdy słownik mówcy jest pusty, agent generuje słowo losowo (z wagą jednostkową).



Rys. 3.1. Aktualizacja słowników w następstwie sukcesu lub porażki aktu komunikacji w minimalnej grze w nazywanie. W przypadku sukcesu, czyli występowania w słowniku słuchacza słowa wybranego przez mówcę, oba agenty pozostawiają w swoich słownikach wyłącznie to słowo, zaś w przeciwnym przypadku słuchacz dodaje to słowo do swojego słownika

Ponadto każdego agenta charakteryzuje jego zdolność uczenia się, której poziom określa liczba rzeczywista l_k z przedziału $0 < l_k < 1$. Parametr ten stosowany jest do modyfikowania wag przypisywanych poszczególnym słowom. Mianowicie w przypadku sukcesu zarówno mówca, jak i słuchacz zwiększają swoje wagi dla zakomunikowanego słowa odpowiednio o wartości swoich zdolności uczenia się. Natomiast w przypadku porażki mówca zmniejsza wagę danego słowa o wartość swoich zdolności. Jeśli w wyniku tej operacji waga słowa staje się zerowa lub ujemna, słowo to jest usuwane z jego słownika. Z kolei słuchacz w przypadku porażki, to znaczy wtedy, gdy nie posiada przekazanego mu słowa w swoim słowniku, dołącza do niego to słowo z wagą jednostkową (rys. 3.2). Jak widać, stosowana tu strategia nieminimalna to rodzaj strategii częstotliwościowej (por. s. 99).



Rys. 3.2. Aktualizacja słowników w następstwie sukcesu lub porażki aktu komunikacji w ewolucyjnym modelu gry w nazywanie. Słowom przypisane są wagi (liczby rzeczywiste w prawej kolumnie słownika). W przypadku sukcesu, czyli występowania w słowniku słuchacza słowa wybranego przez mówcę, oba agenty zwiększają wagi dla tego słowa o wartości swoich zdolności uczenia się (tu: mówca zwiększa o $l_m = 0,3$, a słuchacz o $l_s = 0,5$). W przeciwnym przypadku mówca zmniejsza wagę tego słowa o wartość swojej zdolności uczenia się (przy czym słowa z wagą niedodatnią są usuwane ze słownika), zaś słuchacz dodaje dane słowo do swojego słownika z wagą jednostkową

Poza procesami komunikacji agenty w tym modelu podlegają również procesom ewolucyjnym, zgodnie z określoną dynamiką populacji, a mianowicie rozmnażają się, mutują i ostatecznie umierają. Intensywność zachodzenia tych procesów wyznaczona jest przez prawdopodobieństwo komunikacji p : z tym właśnie prawdopodobieństwem p wybrany agent k staje się mówcą, zaś z prawdopodobieństwem $1-p$ podlega wspomnianym procesom życiowym, co powoduje aktualizację stanu populacji. Po pierwsze, sprawdza się, czy agent przeżywa, co zachodzi

z prawdopodobieństwem p_{surv} (zaś z prawdopodobieństwem $1 - p_{surv}$ agent umiera), przy czym prawdopodobieństwo to określone jest wzorem

$$p_{surv} = e^{-at}[1 - e^{-bW_k/\langle W \rangle}], \quad (3.3)$$

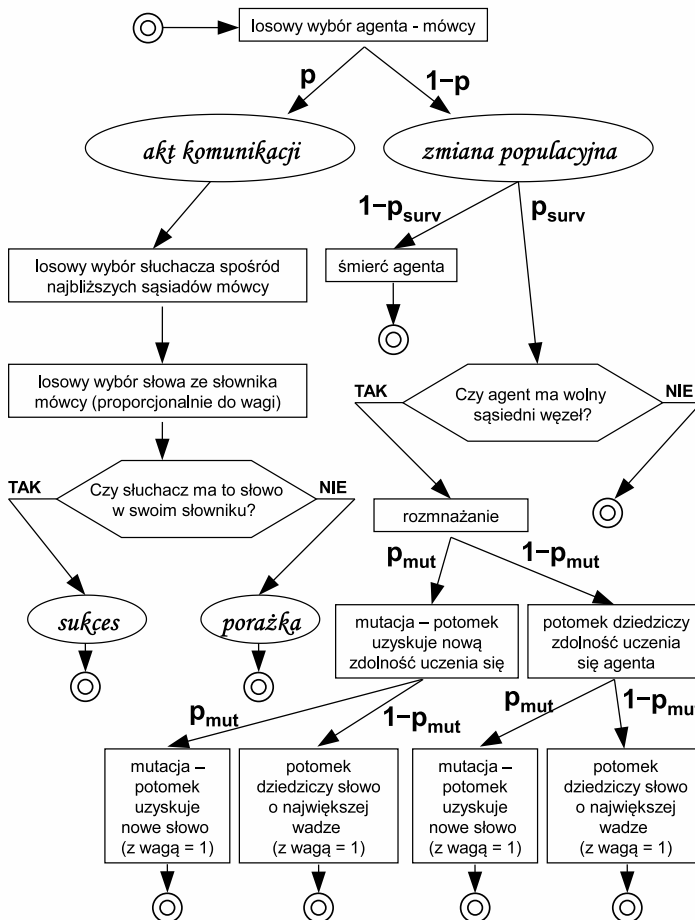
gdzie $0,01 \leq a \leq 0,05$ i $b = 5$ to pewne parametry, których rolą jest zapewnienie odpowiedniego tempa przemian populacyjnych, natomiast t jest wiekiem agenta k , W_k jest sumą wag wszystkich słów agenta k (por. definicję (3.2)), zaś $\langle W \rangle$ jest średnią sumą wag po wszystkich agentach:

$$\langle W \rangle = \frac{\sum_{k=1}^n W_k}{n}, \quad (3.4)$$

gdzie n to liczebność populacji. Tak więc formuła (3.3), określająca prawdopodobieństwo przeżycia agenta, uwzględnia zarówno jego wiek (w taki sposób, rzecz jasna, że prawdopodobieństwo przeżycia agenta maleje wraz z jego wiekiem), jak i jego dokonania językowe. Sprawność językowa agenta określona jest przez liczbę jego sukcesów komunikacyjnych. Z kolei im większa będzie liczba jego sukcesów, tym większa będzie jego suma wag W_k . Jak widać z formuły (3.3), prawdopodobieństwo przeżycia agenta rośnie wraz ze wzrostem jego sprawności językowej, wyrażonej przez W_k , a dokładniej przez $W_k/\langle W \rangle$ – czyli właściwie bierze się tu pod uwagę to, jak dokonania komunikacyjne agenta wypadają na tle całej populacji (im lepiej agent się porozumiewa – w porównaniu z innymi – tym ma większe szanse przeżycia).

Jeśli agent w danym momencie przeżywa, a w jego bezpośrednim sąsiedztwie jest wolny węzeł, to wówczas agent się rozmnaża. Potomek zwykle dziedziczy zdolność uczenia się l_k rodzica oraz początkowo wyposażony jest w słownik zawierający tylko jedno słowo: to o najwyższej wadze ze słownika rodzica (przy czym w słowniku potomka słowo to ma przypisaną wagę równą 1).

Istnieje też niewielkie prawdopodobieństwo p_{mut} zajścia mutacji, w wyniku której potomek uzyskuje nową, losowo ustaloną zdolność uczenia się. Z tym samym prawdopodobieństwem p_{mut} może też ulec losowej zmianie dziedziczone słowo, stanowiące początkowy leksykon potomka. Diagram ilustrujący działanie opisanego tu modelu przedstawiony jest na rysunku 3.3.



Rys. 3.3. Schemat blokowy elementarnego kroku symulacji modelu ewolucyjnego gry w nazywanie. Wybrany losowo agent albo staje się mówcą (z prawdopodobieństwem komunikacji p), albo podlega procesom życiowym. W pierwszym przypadku komunikuje słuchaczowi, wybranemu losowo spośród jego sąsiadów, słowo wylosowane ruletkowo ze słownika (czyli z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do jego wagi). Następstwa tego aktu komunikacji w razie jego sukcesu lub porażki (czyli odpowiednio występowania lub nie danego słowa w słowniku słuchacza) opisane są bardziej szczegółowo w tekście (zob. też rys. 3.2). Procesy życiowe to albo przeżycie (z prawdopodobieństwem p_{surv} – zob. formułę (3.3)), albo śmierć. Agent, który przeżywa i ma wolne sąsiednie miejsce, rozmnaża się. Potomek dziedziczy język (słowo o największej wadze) i zdolność uczenia się agenta, chyba że w jednym lub w drugim przypadku zajdzie mutacja (z prawdopodobieństwem p_{mut})

Cały opisany wyżej proces, któremu podlega pojedynczy agent, nazywamy elementarnym krokiem symulacji (rys. 3.3). Upływ czasu w trakcie symulacji, a więc i wiek agentów, mierzony jest natomiast w jednostkach zwanych krokami symulacji, które zdefiniowane są jako L^2 kroków elementarnych, gdzie L^2 jest liczbą węzłów sieci. W ten sposób podczas jednego kroku symulacji każdy węzeł zostanie (przebiegnie) jednokrotnie zaktualizowany.

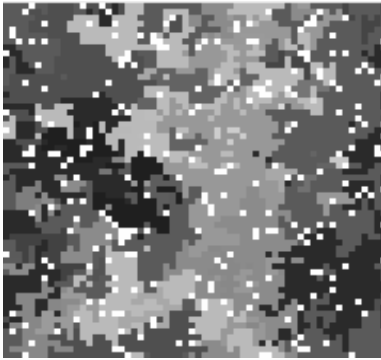
Jak pokazują symulacje, przedstawiony model jest w dużym stopniu odporny na pewne modyfikacje obowiązujących w nim zasad. Przykładowo, zachowanie modelu (opisane w podrozdziale 3.3) nie ulega jakościowej zmianie w przypadku modyfikacji wartości parametrów a i b , wykorzystywanych w równaniu (3.3), czy też dla innej postaci tejże formuły, określającej wartość prawdopodobieństwa przeżycia p_{surv} (pod warunkiem, że będzie ona nadal przedstawiać malejącą funkcję wieku agenta t i rosnącą funkcję jego umiejętności językowych W_k), czy wreszcie przy zmodyfikowanych regułach rozmnażania się lub mutacji.

W celu zbadania własności modelu wykonane zostały odpowiednie symulacje numeryczne. Większość wyników uzyskano dla ustalonych wartości długości boku sieci (na której umieszczone są agenty) $L = 60$ oraz prawdopodobieństwa mutacji $p_{mut} = 0,001$. Symulacje przeprowadzane dla wartości takich jak $L = 80$ czy $p_{mut} = 0,01$ dały podobne wyniki, jeśli chodzi o zachowanie modelu. Konfigurację początkową symulacji stanowił układ, w którym wszystkie węzły sieci były zajęte przez agenty wyposażone w losowo ustalone zdolności uczenia się oraz w słowniki zawierające losowo wybrane pojedyncze słowa o wadze równej 1. W następnych podrozdziałach przedstawione zostały wyniki przeprowadzonych symulacji.

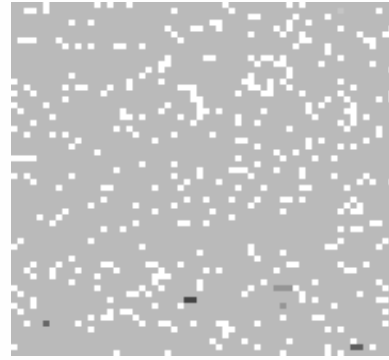
3.3. Przejście biolingwistyczne

Najistotniejszą rolę w zachowaniu modelu odgrywa parametr p , czyli prawdopodobieństwo podejmowania przez agenty prób komunikacji (przy czym ich niepodejmowanie oznacza poddawanie się zmianom populacyjnym, czyli procesom życiowym, takim jak rozmnażanie, mutacja czy śmierć).

JĘZYKI



$p = 0,15$



$p = 0,3$

Rys. 3.4. Dystrybucja języków w ewolucyjnym modelu gry w nazywanie na sieci wielkości $L = 60$ i z prawdopodobieństwem mutacji $p_{mut} = 0,001$ – przykładowe konfiguracje dla różnych wartości prawdopodobieństwa komunikacji p ; agenty używające tego samego języka przedstawione są na diagramie tym samym odcieniem szarości.

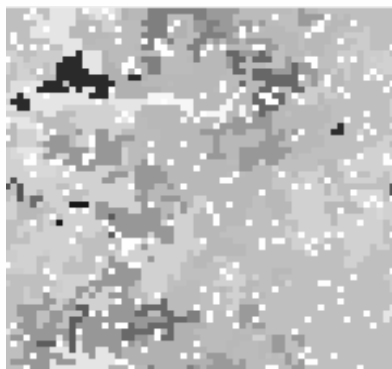
Lewy panel ($p = 0,15$): dla mniejszej wartości prawdopodobieństwa komunikacji p komunikacja zachodzi rzadko i model pozostaje w fazie niekoherentnej językowo (układ wielojęzykowy, w którym klasterzy agentów o wspólnym języku są niewielkie). W tej fazie średnia zdolność uczenia się l oraz wskaźnik sukcesu s także pozostają niskie (por. rys. 3.5, 3.6 i 3.7).

Prawy panel ($p = 0,3$): dla większej wartości prawdopodobieństwa komunikacji p w wyniku intensywniejszej komunikacji wyłania się wspólny dla większości agentów język i model przechodzi w fazę koherentną językowo (układ prawie jednojęzykowy, w którym klaster odpowiadający dominującemu językowi obejmuje prawie całą populację)

W omawianym modelu język agenta został zdefiniowany jako słowo o największej wadze w jego słowniku. Taka definicja oznacza, że agenty używające tego samego języka, komunikując się ze sobą, będą zwykle (choć nie zawsze) stosować słowa wzajemnie rozpoznawalne, co zapewni im stosunkowo dużą liczbę sukcesów.

Symulacje pokazały, że dla małych wartości prawdopodobieństwa komunikacji p układ pozostaje w fazie lingwistycznego chaosu z nie-

ZDOLNOŚĆ UCZENIA SIĘ



p = 0,15



p = 0,3

Rys. 3.5. Dystrybucja zdolności uczenia się agentów l_k w ewolucyjnym modelu gry w nazywanie na sieci wielkości $L = 60$ i z prawdopodobieństwem mutacji $p_{mut} = 0,001$ – przykładowe konfiguracje dla różnych wartości prawdopodobieństwa komunikacji p ; agenty posiadające te same zdolności przedstawione są na diagramie tym samym odcieniem szarości, przy czym im ciemniejszy jest piksel, tym większej zdolności uczenia się odpowiada (kolor biały to $l_k = 0$, kolor czarny to $l_k = 1$).

Lewy panel ($p = 0,15$): dla mniejszej wartości prawdopodobieństwa komunikacji p komunikacja zachodzi dość rzadko, a zdolności uczenia się agentów pozostają raczej niewielkie i są dość zróżnicowane (układ niehomogeniczny, w którym klasterzy agentów o tych samych zdolnościach są małe – podobnie jak klasterzy agentów o wspólnym języku, por. rys. 3.4).

Prawy panel ($p = 0,3$): dla większej wartości prawdopodobieństwa komunikacji p w wyniku intensywniejszej komunikacji zdolności uczenia się agentów bardzo się ujednolicają (układ homogeniczny, w którym prawie cała populacja stanowi jeden klaster agentów o takich samych zdolnościach uczenia się), osiągając zarazem bardzo wysokie wartości

wielkimi tylko klasterami agentów (czyli grupami rozmieszczonymi na sąsiadujących węzłach), które posiadają wspólny język, przy dużej różnorodności używanych języków. Nazywamy to fazą niekoherentną. Typową dystrybucję języków w fazie niekoherentnej pokazuje lewy panel

na rys. 3.4; agenty używające tego samego języka przedstawione są na diagramie tym samym odcieniem szarości.

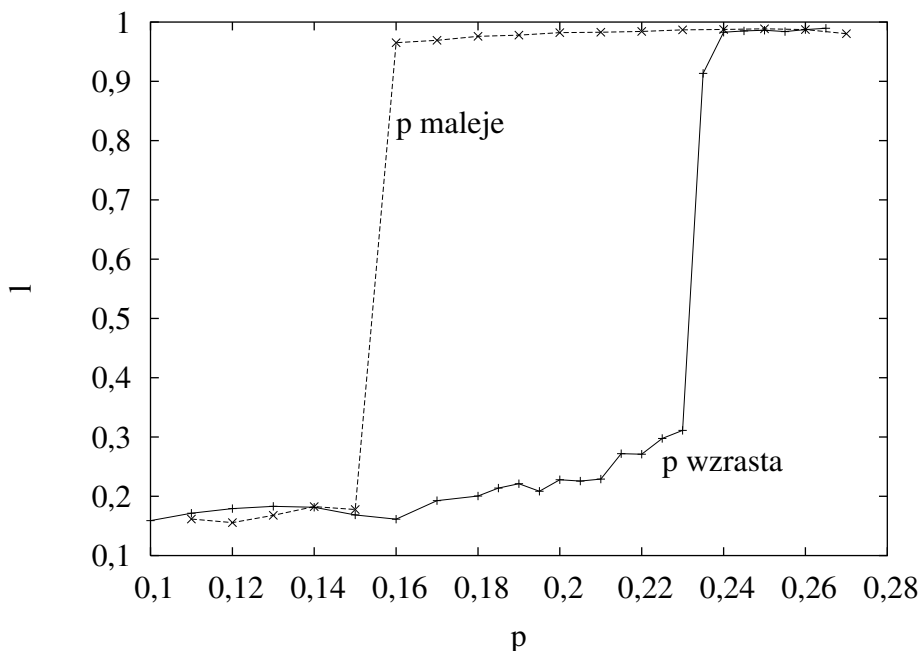
W miarę wzrostu wartości prawdopodobieństwa komunikacji p klastry agentów o tym samym języku stopniowo nieznacznie się powiększają. Dopiero po przekroczeniu pewnej granicy następuje gwałtowna zmiana w zachowaniu modelu i przechodzi on w fazę lingwistycznej koherencji, w której prawie wszystkie agenty dysponują tym samym językiem (prawy panel na rys. 3.4).

Na diagramie 3.5 odcienie szarości reprezentują zdolności uczenia się poszczególnych agentów: im ciemniejszy jest piksel, tym większej zdolności uczenia się odpowiada (kolor biały to $l_k = 0$, kolor czarny to $l_k = 1$). W przypadku, gdy prawdopodobieństwo komunikacji p jest małe, klastry agentów o tych samych zdolnościach są niewielkie, a przy tym zdolności mają niskie wartości (lewy panel na rys. 3.5).

Natomiast dla dużych wartości p , czyli w sytuacji, gdy rośnie częstotliwość aktów komunikacyjnych, nie tylko wyłania się wspólny dla większości agentów język (rys. 3.4), ale także ujednocniają się ich zdolności uczenia się, przy czym osiągają one wówczas wysokie wartości (prawy panel na rys. 3.5).

W celu dokładniejszego określenia natury tego przejścia zmierzono zostały w trakcie symulacji pewne wielkości, a mianowicie średnia zdolność uczenia się l oraz wskaźnik sukcesu, czyli średnie prawdopodobieństwo sukcesu komunikacyjnego s (średnie względem liczby agentów i czasu symulacji, a obliczane jako stosunek liczby sukcesów do liczby wszystkich podejmowanych aktów komunikacyjnych). Wyniki pomiarów obu tych wielkości, l oraz s , jako funkcji prawdopodobieństwa komunikacji p przedstawione są na rysunkach odpowiednio 3.6 oraz 3.7.

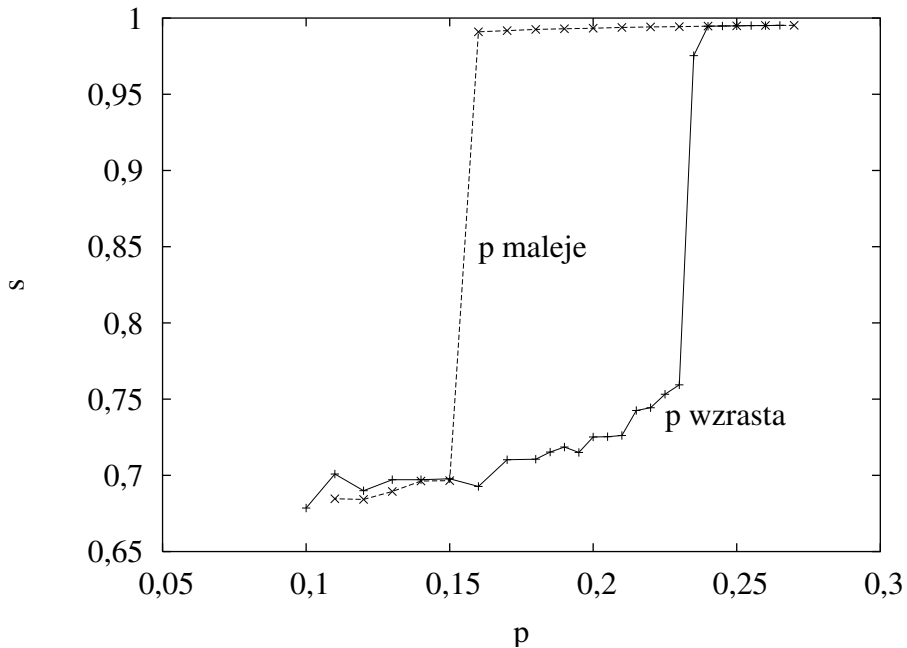
Jak widać na wykresach obu funkcji, kiedy zwiększamy wartość p , to około $p = 0,23$ następuje skokowy wzrost ich wartości. Mamy tu więc do czynienia nie tylko z gwałtownym progresem pewnej własności lingwistycznej (s), ale także z raptownym rozwojem pewnej cechy biologicznej (l), dlatego też określamy to **przejście** jako **biolingwistyczne**. Zademonstrowana tu zbieżność obu rodzajów przejścia nie jest bynajmniej oczywista i zasadniczo przejścia te mogłyby zachodzić oddzielnie. Mechanizm odpowiedzialny za uzyskaną tu zgodność omówiony jest w podrozdziale 3.5.



Rys. 3.6. Średnia zdolność uczenia się l w funkcji prawdopodobieństwa komunikacji p w ewolucyjnym modelu gry w nazywanie na sieci wielkości $L = 60$ przy prawdopodobieństwie mutacji $p_{mut} = 0,001$. Czas symulacji dla każdej wartości p wynosił 10^5 kroków, z czego początkowe $3 \cdot 10^4$ kroków było pomijane w ramach relaksacji systemu. Krok symulacji jest zdefiniowany jako pojedyncza (średnio rzecz biorąc) aktualizacja każdego węzła sieci, czyli L^2 kroków elementarnych (zob. rys. 3.3). Dla symulacji z malejącym prawdopodobieństwem komunikacji p system został najpierw zrelaksowany do stanu lingwistycznej synchronizacji (jednojęzykowego, z parametrami s i l bliskimi jedności) [diagram za: Lipowska 2011]

Jak widać na diagramach 3.6 i 3.7, kiedy wartość prawdopodobieństwa komunikacji p jest obniżana, to odpowiednie przejście fazowe następuje przy dużo niższej wartości p , mianowicie około $p = 0,15$, stąd obie krzywe mają kształt histerety. W układach fizycznych, takich jak magnetyki czy ciecze, tego rodzaju zachowanie interpretowane jest jako tak zwane nieciągłe przejście fazowe.

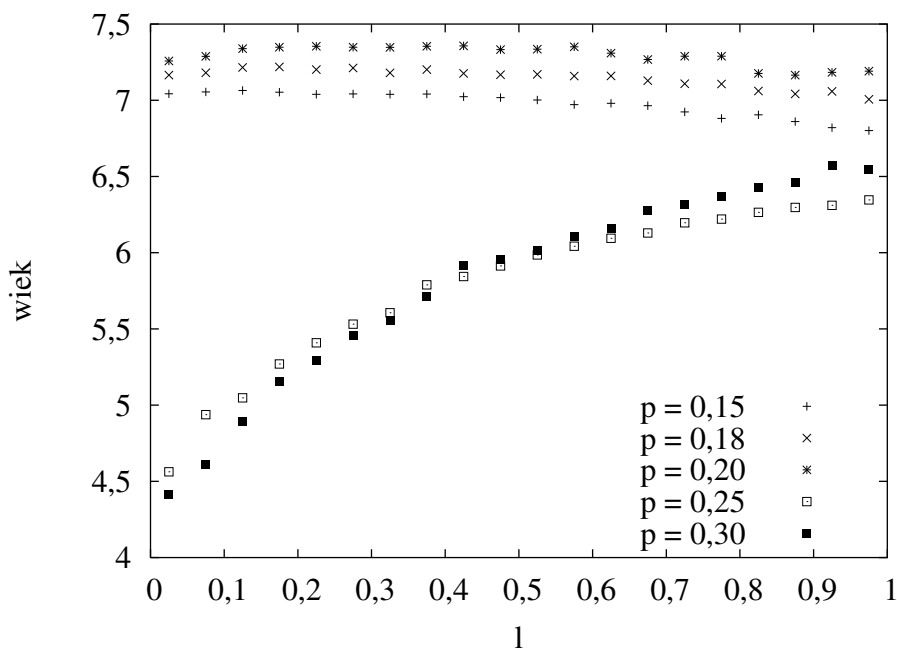
Wyraźna różnica w zachowaniu modelu w fazach o małym i dużym prawdopodobieństwie komunikacji p przejawia się także dla zależności długości życia agentów od ich zdolności uczenia się. Diagram 3.8



Rys. 3.7. Wskaźnik sukcesu s (czyli średnie prawdopodobieństwo sukcesu komunikacyjnego) w funkcji prawdopodobieństwa komunikacji p . Szczegóły symulacji jak na rys. 3.6

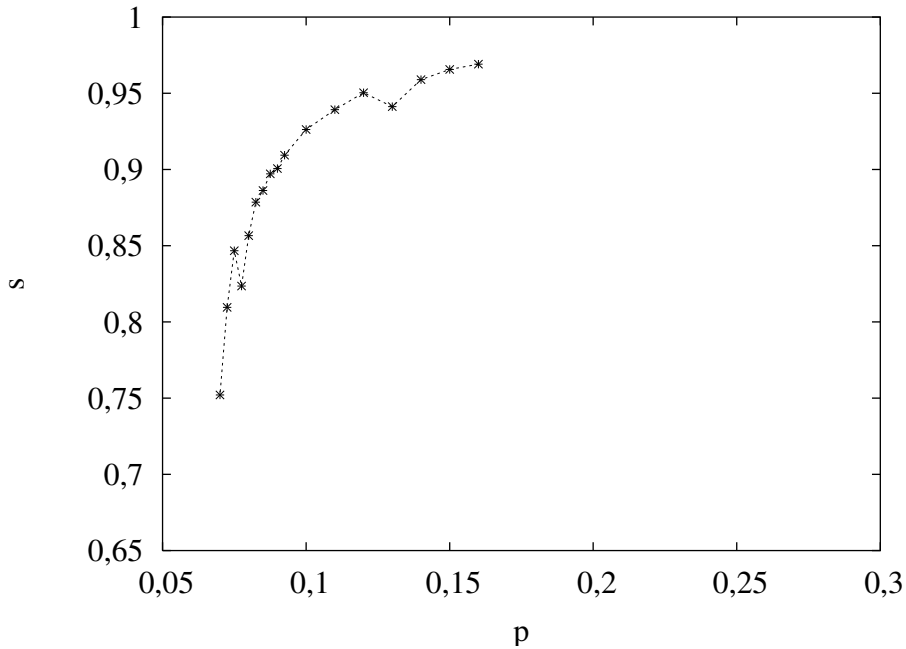
przedstawia przebieg tych funkcji dla kilku różnych wartości p . W fazie niekoherentnej językowo, czyli dla małych wartości p ($p < 0,23$), środowisko lingwistyczne agenta ulega częstym zmianom i wówczas, w tak chaotycznym otoczeniu, długość życia agenta jest prawie niezależna od jego zdolności uczenia się. Natomiast w fazie koherentnej językowo, to znaczy dla większych wartości p ($p > 0,23$), sąsiadujący agenci z dużym prawdopodobieństwem używają tego samego języka i w tej sytuacji duże zdolności uczenia się są skorelowane z dłuższym życiem agenta, zapewne dlatego, że w niezmiennym środowisku lingwistycznym szybsze uczenie się oznacza lepsze dostosowanie (innymi słowy, „opłaca się” lepiej uczyć).

Należy tu jeszcze zauważyć, że nagłe przejścia w modelach lingwistycznych były już odnotowane w niektórych pracach, na przykład [Nowak, Krakauer 1999; Nowak, Komarova 2001; Baronchelli *et al.* 2006b; Schulze *et al.* 2008] (zob. też s. 129).



Rys. 3.8. Średnia długość życia agentów w funkcji zdolności uczenia się l dla kilku wartości prawdopodobieństwa komunikacji p . W fazie koherentnej językowo ($p > 0,23$), a więc w środowisku lingwistycznie niezmiennym, najwyraźniej opłaca się posiadać duże zdolności uczenia się, gdyż wraz z ich wzrostem wydłuża się życie agentów. Natomiast w fazie niekoherentnej, czyli w środowisku lingwistycznie przypadkowym (zmiennym), długość życia agentów jest prawie niezależna od ich zdolności uczenia się [diagram za: Lipowska 2011]

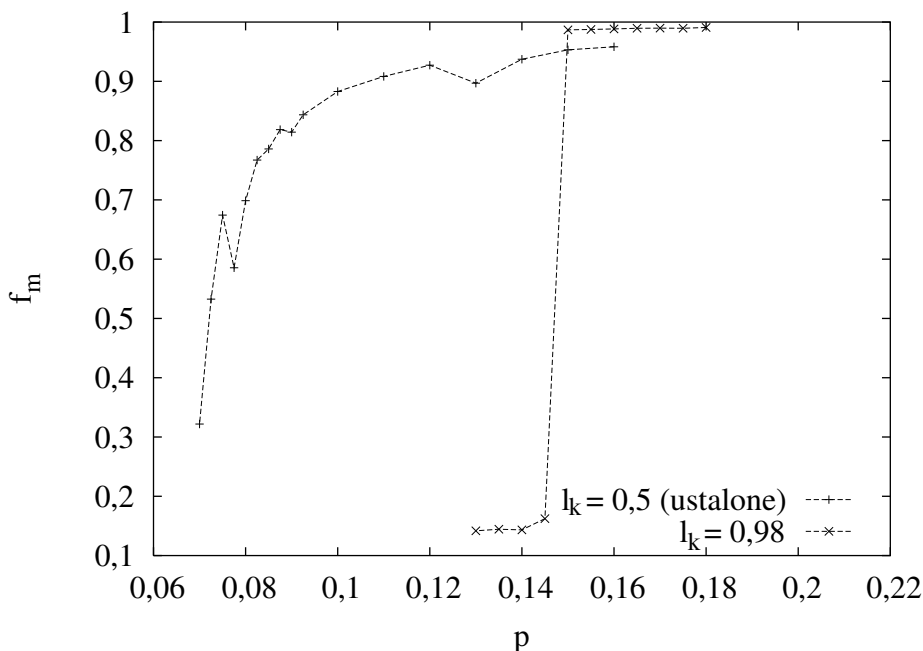
Zbadane zostało również zachowanie modelu w sytuacji, gdy zdolność uczenia się agentów jest stała w trakcie symulacji (nie podlega mutacjom). Na diagramie 3.9 przedstawiony jest ponownie wskaźnik sukcesu s w funkcji prawdopodobieństwa komunikacji p , tym razem wyznaczony właśnie dla przypadku z niezmienną wartością zdolności uczenia się l_k . Także tutaj obserwujemy przejście między fazą niekoherentną językowo a fazą koherentną ($p \approx 0,07$), tyle że w tym przypadku przejście to jest dużo łagodniejsze i nie ma znamion histerezy.



Rys. 3.9. Wskaźnik sukcesu s (czyli średnie prawdopodobieństwo sukcesu komunikacyjnego) w funkcji prawdopodobieństwa komunikacji p w symulacjach przeprowadzonych ze stałą wartością zdolności uczenia się $l_k = 0,5$. Szczegóły symulacji jak na rys. 3.6

Dla uzyskania dokładniejszego obrazu tej sytuacji zbadana też została zależność wartości parametru f_m od prawdopodobieństwa komunikacji p , przy czym f_m oznacza odsetek populacji agentów używających dominującego języka, czyli języka o największej liczbie użytkowników. Jak widać z diagramu 3.10, dla symulacji ze stałą wartością zdolności uczenia się wartość parametru f_m (tak samo jak wskaźnika sukcesu s) zmienia się płynnie w miarę wzrostu wartości p .

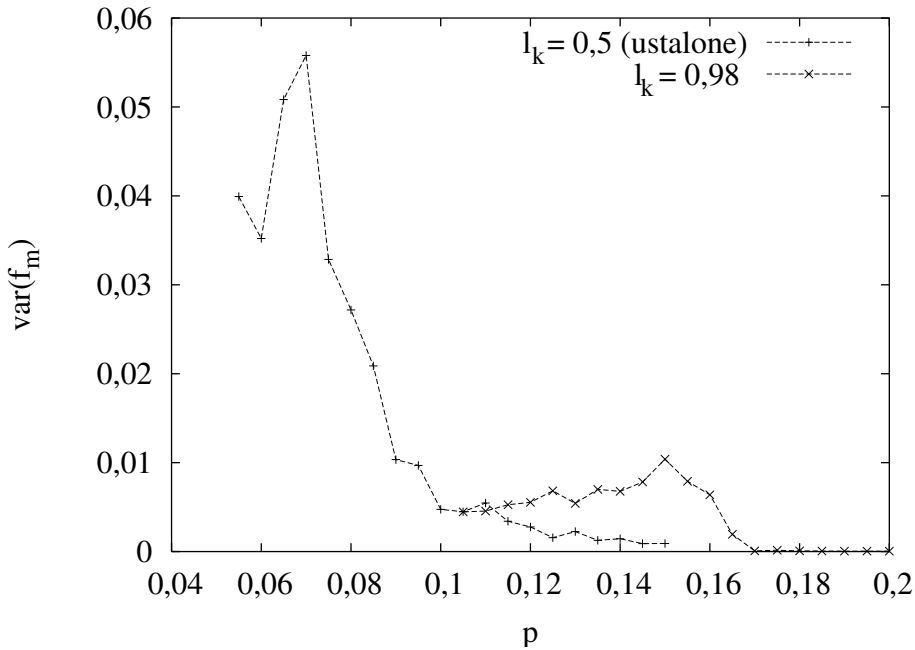
Co więcej, wariancja funkcji $f_m(p)$ ma wyraźny skok w punkcie przejścia, które następuje dla $p \approx 0,07$ (rys. 3.11); podobnie zresztą zachowuje się wariancja dla wskaźnika sukcesu s . Duże fluktuacje obu tych funkcji w pobliżu punktu przejścia, jak również brak gwałtownego skoku wartości funkcji w tym punkcie sugerują, że może to być tak zwane przejście ciągłe (zob. też podrozdział 3.6).



Rys. 3.10. Parametr f_m , czyli odsetek agentów w populacji używających dominującego języka (to znaczy języka o największej liczbie użytkowników) w funkcji prawdopodobieństwa komunikacji p . Krzywa w lewym górnym rogu diagramu odpowiada symulacjom przeprowadzonym ze stałą wartością zdolności uczenia się $l_k = 0,5$. Druga krzywa odpowiada symulacjom (z malejącym p) przeprowadzonym dla ewoluującej zdolności uczenia się, startującym z konfiguracji początkowej, w której wszystkie agenty wyposażone były w identyczne jednowyrazowe słowniki oraz tę samą zdolność uczenia się $l_k = 0,98$; taki stan początkowy odpowiada relaksacji systemu do stanu koherentnego językowo (por. symulacje przedstawione na rysunkach 3.6 i 3.7) [diagram za: Lipowska 2011]

3.4. Dynamika modelu

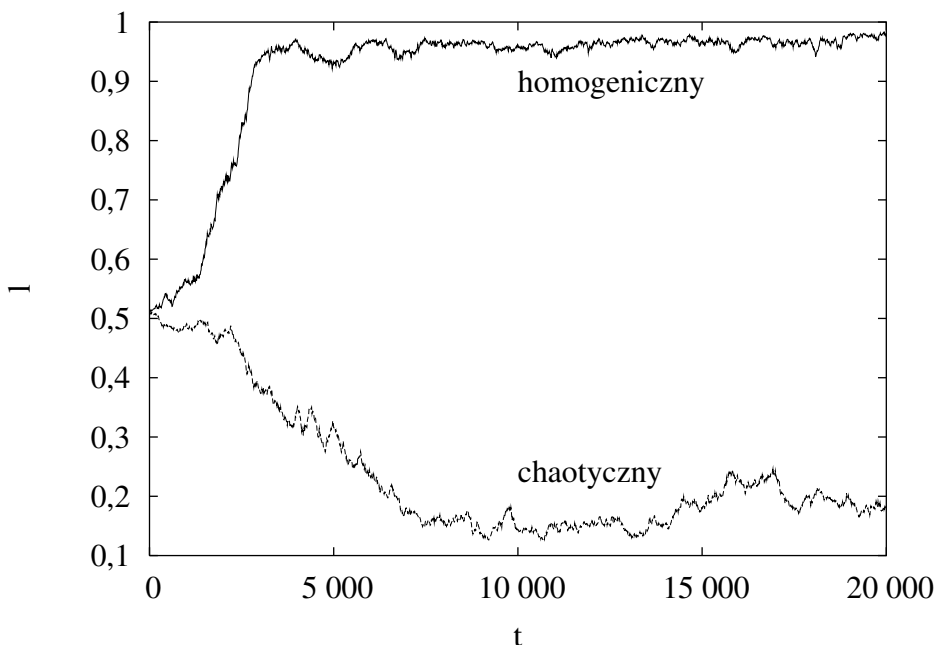
Ponieważ każdy agent jest charakteryzowany przez swoją zdolność uczenia się, to stany homogeniczne, czyli takie, w których większość agentów mówi tym samym językiem, nie są równoważne, jeśli dysponują oni różnymi zdolnościami. Dlatego też ewolucja modelu w dość skomplikowany sposób zależy od początkowej konfiguracji oraz od pa-



Rys. 3.11. Wariancja funkcji $f_m(p)$; szczegóły symulacji jak na rys. 3.10. Wyraźny skok wariancji funkcji w punkcie przejścia ($p \approx 0,07$) przy jednoczesnym braku gwałtownej zmiany wartości samej funkcji $f_m(p)$ (rys. 3.10) świadczy o tym, że może to być przejście ciągłe [diagram za: Lipowska 2011]

parametrów p (prawdopodobieństwa komunikacji) i p_{mut} (prawdopodobieństwa mutacji). Jest to szczególnie widoczne dla prawdopodobieństwa komunikacji p z przedziału $0,15 < p < 0,25$, w którym model przejawia zachowanie hysteretyczne.

Przykład zależności przebiegu ewolucji modelu od jego konfiguracji początkowej przedstawiony został na diagramie 3.12. W centrum sieci o rozmiarze $L = 60$ utworzony został początkowy klaster 100 agentów o tych samych zdolnościach uczenia się $l_k = 0,98$ oraz o tym samym języku (tym samym słowie w ich słownikach). Pozostałe 3500 agentów ma mniejsze zdolności uczenia się $l_k = 0,5$. Ewolucja systemu, jak wynika z diagramu 3.12, zależy w tym przypadku od tego, czy owe agenty poza centrum używają tego samego języka co agenty w centrum (przypadek homogeniczny), czy też ich słowniki zawierają różne losowe słowa (przypadek niehomogeniczny – chaotyczny). W pierwszym



Rys. 3.12. Ewolucja średniej zdolności uczenia się l w czasie t w modelu na sieci o krawędzi $L = 60$, w którym centralny klastrowy 100 agentów o zdolnościach $l_k = 0,98$ i używających wspólnego języka jest otoczony przez pozostałe 3500 agentów o mniejszych zdolnościach uczenia się $l_k = 0,5$. Przebieg ewolucji zależy od początkowego stanu słowników otaczających agentów: w przypadku homogenicznym, gdy zawierają one to samo słowo co słowniki agentów w centrum, układ przechodzi w stan koherentny językowo i o dużej wartości parametru l (górną krzywą diagramu), zaś w przypadku chaotycznym, gdy zawierają one losowe słowa, układ przechodzi w stan wielojęzyczny i o małej wartości parametru l (dolną krzywą diagramu) [diagram za: Lipowska 2011]

przypadku model przechodzi w stan językowo koherentny, w którym większość agentów używa tego samego języka i ma takie same duże zdolności uczenia się ($l = 0,98$). Natomiast w drugim przypadku model ewoluuje do stanu wielojęzycznego, w którym agenci dysponują dużo mniejszymi zdolnościami uczenia się.

Dla omawianego układu istotnym parametrem, który może wpływać na przebieg ewolucji, jest nie tylko wielkość centralnego klaste-

ra, ale także poziom zdolności uczenia się otaczających go agentów. Na przykład w przypadku homogenicznym, ale przy mniejszych zdolnościach uczenia się agentów spoza centrum ($l_k = 0,3$), model ewoluuje jednak do stanu wielojęzycznego.

3.5. Efekt Baldwina

Fakt, że wskaźnik sukcesu s oraz średnia zdolność uczenia się l rosną skokowo dla tej samej wartości prawdopodobieństwa komunikacji p , świadczy o tym, że procesy lingwistyczne i biologiczne w omawianym modelu mocno oddziałują wzajemnie na siebie, co prowadzi do ich jednoczesnego i gwałtownego przejścia fazowego. Osiągnięcie wysokiego poziomu sukcesów komunikacyjnych w tym modelu wymaga uczenia się. Nowo „narodzony” agent, komunikując się ze starszymi agentami, które wypracowały już pewien wspólny w danej grupie język, zwiększa stopniowo wagę odpowiedniego słowa używanego w tej grupie. W wyniku tego w kolejnych aktach komunikacyjnych agent używa tego słowa coraz częściej, aż wreszcie, kiedy jego waga przekracza już zdecydowanie wagi pozostałych słów, w praktyce tamte wychodzą już zupełnie z użycia, a komunikowane przez agenta jest odtąd wyłącznie to dane słowo, zwane dalej też jego językiem.

W jaki sposób owo uczenie się może stać się cechą ewolucyjną, podlegającą presji selekcji naturalnej? Wyjaśnienie tego zjawiska znane jest jako **efekt Baldwina** [Baldwin 1896] i omówieniu tego zagadnienia poświęcony jest niniejszy podrozdział. W jego pierwszej części przedstawiono tenże proces (zwany także ewolucją baldwinowską) oraz jego dyskusję, jak również przykłady wykorzystujących go modeli i ich symulacji, natomiast część druga demonstruje działanie efektu Baldwina w modelu autorki. Choć pozornie efekt ten sprawia wrażenie lamarckowskiego (a lamarckizm dawno już został zdyskredytowany), to w istocie rzeczy ma charakter czysto darwinowski [Yamauchi 2004; Hinton, Nowlan 1987]. James M. Baldwin zauważył, że chociaż cechy nabyte przez danego osobnika rzeczywiście nie mogą być dziedziczone przez jego potomstwo, to nie oznacza to jeszcze, że takie osobnicze adaptacje wynikające z **fenotypicznej plastyczności** organizmów (której szczególnym przypadkiem jest zdolność uczenia się) nie mają w ogóle

żadnego wpływu na ewolucję. Otóż kiedy osobniki jakiegoś gatunku regularnie stają przed jakimś ekologicznym wyzwaniem, któremu mogą sprostać przez wyuczenie się pewnego rodzaju zachowania (albo wykształcenie pewnej cechy, jak w znanym przykładzie z powstawaniem u strusi zgrubień skóry w miejscach narażonych na powtarzające się ocieranie), to z jednej strony ponoszą jakieś koszty tej nauki (czy innej zmiany), a z drugiej – przynosi im ona określone korzyści. W takiej sytuacji pojawia się swoiste ciśnienie selekcyjne, faworyzujące te osobniki, które stosunkowo więcej zyskują lub stosunkowo mniej tracą. W ten sposób procesy selekcji i adaptacji prowadzą stopniowo do wykreowania gatunku, dla którego owo zachowanie, które wymagało wcześniej ontogenetycznego uczenia się, będzie **zachowaniem instynktownym**, a więc zdolnością wrodzoną, zakodowaną genetycznie (co jest rozwiązaniem tańszym i prawdopodobnie skuteczniejszym). Należy tu zdecydowanie podkreślić, że nie odbywa się to drogą dziedziczenia owych wyuczonych zachowań, gdyż jest to po prostu niemożliwe (to byłby właśnie lamarkizm). Dziedziczona jest jedynie **zdolność do nauczenia się** odpowiedniego zachowania czy też preferencja do pewnego typu zachowań [Turney 1996; Turney *et al.* 1996].

Koncepcja ewolucji baldwinowskiej miała (i ma) zarówno swoich zwolenników, jak i przeciwników. Promował ją na przykład Julian Huxley [1942] jako część nowoczesnej syntezy ewolucyjnej. Termin „efekt Baldwina” ukuł George G. Simpson [1953], który precyzując go i dyskutując możliwe przykłady, pozostał jednak sceptyczny co do jego realnego działania. Conrad Waddington [1975] niezależnie badał zbliżone scenariusze procesów tak zwanej kanalizacji i **genetycznej asymilacji**, doskonaląc podbudowę teoretyczną tego typu zjawisk. Kolejne ważne wyniki przedstawili Geoffrey E. Hinton i Steven J. Nowlan [1987], którzy przeprowadzając symulacje komputerowe, praktycznie wykazali możliwość skutecznego funkcjonowania mechanizmu ewolucji baldwinowskiej: kiedy kolejne generacje agentów spotykają się wciąż z takim samym problemem wymagającym uczenia się, a nauka ta wiąże się z pewnymi kosztami, to selekcja naturalna może stopniowo wyłonić populację, która będzie miała te niezbędne zachowania wrodzone (bo instynktowna wiedza, jak się zachować, jest „tańsza” niż kosztowny proces jej nabywania). Ponadto okazało się, że agenty uczące się

ewoluowały szybciej niż pozostałe. Praca ta zapoczątkowała nową falę zainteresowania tym zjawiskiem.

Już Conrad Waddington [1975] sugerował, że efekt Baldwina mógł odegrać istotną rolę w ewolucji języka i objaśnił, jak mechanizm nabywania języka (LAD – *Language Acquisition Device*, czyli hipotetyczna struktura w mózgu człowieka) mógł się wykształcić w procesie genetycznej asymilacji. Steven Pinker i Paul Bloom [1990] uważali, że efekt Baldwina pomógł ukształtować nasz wrodzony moduł gramatyczny (*language organ*), którego istnienie postulował Noam Chomsky [1965]. Z kolei Terrence Deacon krytykował ideę wrodzonego LAD czy gramatyki uniwersalnej: „Whatever learning predispositions are responsible for the unprecedented human facility with language, they specifically cannot depend on innate *symbolic* information. No innate rules, no innate general principles, no innate symbolic categories can be built in by evolution” [Deacon 1997, s. 339]. Jakkolwiek twierdził, że ewolucja języka musiała być skorelowana z ewolucją mózgu, być może właśnie poprzez działanie efektu Baldwina (por. s. 27), to jednak według jego argumentacji efekt ten nie oddziaływał bezpośrednio na zdolność językową, ale raczej na prostsze zdolności kognitywne, na przykład uwagę, imitację czy inne predyspozycje niezbędne dla rozwoju języka. Przeciwnie stanowisko zajął natomiast Frederic Newmeyer [2000], który zwrócił uwagę na to, że efekt Baldwina może występować w sytuacji, gdy nauka jest trudna, a jej koszt wysoki. Zapewne dzieje się tak w przypadku akwizycji języka przez młodego osobnika, zwłaszcza o ile musi go nabywać od podstaw (czyli bez żadnej wrodzonej wiedzy). Gdyby niepowodzenie w nabywaniu języka obniżało radykalnie jego dostosowanie, to efekt Baldwina mógłby redukować takie niebezpieczeństwo przez stopniową genetyczną asymilację pewnych ułatwiających tę naukę uwarunkowań, przez co w toku ewolucji ukształtowałyby się wrodzona gramatyka uniwersalna.

Przeprowadzone zostały także różnego rodzaju symulacje komputerowe. William Turkel [2002] na przykład modelował ewolucję systemu P&P (*Principles-and-Parameters* [Chomsky 1981]) przy pomocy wariantu wspomnianego wcześniej modelu Hintona i Nowlana, czyli pewnego rodzaju algorytmu genetycznego. Pokazał między innymi, że gdy występuje uczenie się, to wspólny dla populacji system parametryczny może się dość szybko wyłonić dzięki selekcji naturalnej, mimo że

jego przejściowe formy nie przynoszą jeszcze korzyści adaptacyjnych. W dyskusji problemu powstania języka pojawiały się argumenty, że język nie mógł istnieć w jakichś formach pośrednich między jego zupełnym brakiem a w pełni rozwiniętym językiem (gdyż nie dawałyby one żadnych korzyści selekcyjnych w środowisku, w którym nie ma jeszcze wspólnego ustalonego systemu komunikacji), zatem nie mógł wyewoluować stopniowo poprzez selekcję naturalną, ale powstał raczej przez egzaptację lub makromutację. Wyniki symulacji Turkela mogą stanowić kontrargument dla tej tezy, pokazując, że ewolucja może być odpowiednio ukierunkowana dzięki osobniczemu uczeniu się, czyli poprzez efekt Baldwina, co umożliwiałoby jednak stopniowy rozwój zdolności językowej. Warto tu przywołać dwie metafory, których używa autor, omawiając efekt Baldwina. Pierwsza mówi, że uczenie się w kontekście ewolucyjnym umożliwia rozwiązanie problemu, który można porównać do znalezienia igły w stogu siana, a druga, że uczenie się przyspiesza ewolucję (jedno i drugie zaś zachodzi poprzez modyfikację przestrzeni rozwiązań i ukierunkowanie jej przeszukiwania). Symulacje Turkela ujawniły według niego oba te aspekty badanego zjawiska.

Ted Briscoe [2003] w swojej pracy używa terminu **asymilacja gramatyczna** jako skrótowego określenia genetycznej asymilacji informacji gramatycznych do mechanizmu nabywania języka (LAD). Autor dyskutuje różne argumenty za i przeciw istnieniu takiego zjawiska, jak również dokonuje przeglądu dotychczasowych modeli oraz symulacji komputerowych asymilacji genetycznej i gramatycznej. Dotychczas nie zaproponowano jeszcze żadnego matematycznego modelu, który opisywałby analitycznie asymilację genetyczną jako system dynamiczny, dostępne są więc wyłącznie modele genetyczne z ewoluującą populacją uczących się osobników. Briscoe omawia oczywiście model Hintona i Nowlana oraz wymienia kilka następnych (Ackleya i Littmana, Cecconi'ego, Menczera i Belew oraz Frencha i Messingera, wszystkie z lat dziewięćdziesiątych XX wieku), jako badania potwierdzające możliwość działania genetycznej asymilacji w sytuacji, gdy środowisko pozostaje niezmiennie, a uczenie się jest kosztowne. Wśród modeli asymilacji gramatycznej Briscoe wymienia (omówiony wyżej) model Turkela i pewne jego kontynuacje (Kirby'ego i Hurforda oraz Yamauchiego) i wreszcie własny model koewolucyjny, w którym następuje zarówno selekcja lingwistyczna wariantów języków (w oparciu o kryteria ich wyuczal-

ności, analizowalności składniowej i mocy wyrażania), jak i selekcja naturalna wariantów LAD (w oparciu o sukces komunikacyjny). Autor przedstawia pozytywne wyniki swoich symulacji i zauważa między innymi, że asymilacja gramatyczna występuje tylko wówczas, gdy reprodukcja jest skorelowana z dostosowaniem komunikacyjnym osobników, jednakże selekcja naturalna oparta na sukcesie komunikacyjnym nie gwarantuje z kolei asymilacji warunków funkcjonalnych. Ponadto asymilacja następowała także w środowisku do pewnego stopnia zmiennym, wtedy gdy zmiany językowe następowały w tempie pozwalającym utrzymać wspólnotę komunikacyjną (zdefiniowaną przez średni sukces komunikacyjny nie niższy niż 90%). Briscoe przyznaje także, że patrząc z perspektywy koewolucyjnej, czyli uznając, że języki zarówno same się adaptują pod względem cech funkcjonalnych, jak również podlegają zmianom historycznym, trzeba również zgodzić się z tezą, że przynajmniej część własności gramatycznych języków kształtowała się w procesie ich kulturowej transmisji poprzez ogólne (a nie tylko językowo specyficzne) mechanizmy uczenia się. Briscoe konkluduje, że prezentowany przez niego przegląd argumentów i modeli sugeruje, iż asymilacja genetyczna jest aktualnie najbardziej przekonującym wyjaśnieniem ewolucji LAD.

Bardzo obszernie problematykę efektu Baldwina, ze szczególnym uwzględnieniem jego działania w ewolucji języka, przedstawił w swojej rozprawie doktorskiej wspomniany w poprzednim akapicie Hajime Yamauchi [2004]. Jako jeden z głównych problemów, na który wskazały wcześniejsze symulacje, Yamauchi wymienił konieczną dla właściwego działania tego efektu, a ściślej genetycznej asymilacji, bardzo ścisłą korelację genotypowo-fenotypową (określaną też jako bliskie sąsiedztwo: fenokopie, czyli warianty fenotypu powstałe pod wpływem warunków środowiska, muszą być genetycznie bliskie wrodzonemu genotypowi). Inaczej mówiąc, mała różnica w fenotypach koresponduje z odpowiednio małą różnicą między genotypami. Niestety w przypadku ewolucji języka założenie to jest nie do przyjęcia, gdyż zdolność językowa jest na tyle złożoną własnością kognitywną, że zachodzenie takiej korelacji jest wysoce nieprawdopodobne. Yamauchi proponuje nowy mechanizm, nazywany przez niego niszą baldwinowską, który pomaga rozwiązać ten problem. Pokazuje, że komunikacja językowa stwarza taką właśnie niszę, a w jej warunkach efekt Baldwina działa we właściwy sposób, nie

wymagając ani modyfikacji zastanej puli genowej, ani tego, żeby geny odpowiedzialne za uczenie się języka znajdowały się w tych samych obszarach chromosomu (*loci*) co geny wrodzonej wiedzy lingwistycznej. Yamauchi demonstruje też działanie niszy baldwinowskiej w swoich symulacjach; autorka w dyskusji swojego modelu również odwołuje się do tego mechanizmu.

Także w omawianym już w podrozdziale 1.5 (s. 70) modelu [Munroe, Cangelosi 2002] testowane było działanie efektu Baldwina. Autorzy analizowali, jaki wpływ na to zjawisko miały koszty uczenia się (kary za jedzenie trujących grzybów w postaci obniżenia *fitness*) oraz zmiany językowe („mutacje” języka przekazywanego do wyuczenia potomstwu). Wyniki znów potwierdziły, że wyższe koszty wywołują stopniową asymilację genetyczną pewnych cech nabywanego języka (co sami badacze uznają za nierealistyczne w przypadku języka naturalnego, jednakże odzwierciedlające możliwe działanie tego mechanizmu w odniesieniu do innych zachowań). Natomiast w przypadku kulturowej zmienności językowej efekt Baldwina zamiast asymilacji cech językowych powodował raczej asymilację samej predyspozycji do nauczenia się dowolnego przedstawianego do nabycia języka. Potwierdza to z kolei wcześniejszą hipotezę Deacona [1997] o dziedziczeniu ogólnych zdolności kognitywnych, umożliwiających kolejnym pokoleniom nabywanie zastanego systemu językowego. Jak twierdzą badacze, nic w ich eksperymencie nie wskazuje na dziedziczenie czegoś tak skomplikowanego i specyficznego, jak postulowany przez Chomsky’ego genetycznie zaprogramowany mechanizm LAD, kodujący wiedzę lingwistyczną, ani też na baldwinowską asymilację zasad i parametrów syntaktycznych (P&P), co z kolei sugerował Steven Pinker [1994].

Interesujący model ewolucji języka proponują Daniel Dor i Eva Jablonka [2001; 2014]. W opozycji do ujęcia zarówno strukturalistycznego, jak i funkcjonalnego, opisują oni język jako wyspecjalizowany system komunikacyjny służący wyrażaniu (zaskakująco) ograniczonego zbioru typów znaczeń. Wykształcenie się takiego właśnie systemu tłumaczą przez złożone interakcje między ewolucją kulturową a genetyczną, oparte na mechanizmie kulturowo ukierunkowanej asymilacji genetycznej. Ewolucja kulturowa to toczący się nieustannie społeczny proces ciągłych innowacji językowych, produkcji języka, jego interpretacji, transmisji i propagacji konwencji językowych, w trakcie którego

coraz bardziej doskonałą się i komplikują dostępne środki wyrażania. Jednocześnie (choć w dłuższej skali czasowej) trwa ewolucja genetyczna użytkowników języka, podczas której zachodzi częściowa asymilacja genetyczna – jednak nie reguł gramatycznych czy innych własności języka, lecz takich zdolności kognitywnych, które umożliwiają łatwiejsze i efektywniejsze nabywanie języka i jego używanie (*linguistically-biased cognition*). W takim ujęciu dynamiczna natura języka oraz obserwowane zróżnicowanie (między)językowe to fundamentalne atrybuty języka wynikające z samej natury takiego koewolucyjnego procesu. Na każdym jego etapie otoczenie językowe tworzy środowisko, w którym pozytywnie selekcjonowane są geny przyczyniające się do efektywnego przetwarzania języka i jego transmisji. W największym zaś skrócie: „First we invented language, then language changed us” [Dor, Jablonka 2014, s. 16].

Dor i Jablonka podkreślali kluczową rolę, jaką w opisywanym zjawisku pełni fenotypiczna plastyczność (a przede wszystkim uczenie się) oraz opisali dynamikę jej zmienności w trakcie tego procesu. Dużą zgodność z ich przewidywaniami wykazały wyniki symulacji Watanabe *et al.* [2008]. Badacze ci opracowali model agentowy, implementowany przy użyciu rekurencyjnych sieci neuronowych, w którym kulturowa transmisja języka towarzyszy genetycznej ewolucji jego użytkowników. Transmisja następowała w ramach rozszerzonego wariantu iterowanego uczenia się (por. s. 60), w którym wertykalny przekaz języka (między generacjami) odbywał się naprzemiennie z horyzontalnym (w obrębie jednej generacji). Ewolucję biologiczną realizował algorytm genetyczny (por. s. 57). Populacja dzięki sprzężeniu dostosowania z osiąganymi sukcesami językowymi rozwinęła skuteczny system komunikacji, przy czym w jej ewolucji widoczne były dwa etapy. W pierwszym osobnicze uczenie się (plastyczność) wpływało na korzystne zmiany fenotypu, zwiększając dostosowanie agentów i ich szanse na przeżycie i reprodukcję. W drugim etapie następowała genetyczna asymilacja, czyli ewolucja znajdowała takie cechy wrodzone, które mogły z powodzeniem zastępować własności wcześniej wyuczane. Plastyczność początkowo rosła razem z dostosowaniem (to ona gwarantowała więcej sukcesów komunikacyjnych, więc osobniki o większej plastyczności stopniowo rozprzestrzeniały się w populacji). Jednak na kolejnym etapie (w trakcie asymilacji) plastyczność zmalała do pewnej średniej wartości (wobec

zmniejszonej potrzeby uczenia się, zamiast nacisku selekcyjnego na tę cechę działał losowy dryf genetyczny). Jak wskazują autorzy, jest to obraz typowy dla efektu Baldwina (i jak już wyżej wspomniano, zgodny z jego charakterystyką podaną przez Dora i Jablonkę). Badacze zauważyli również, że wystąpienie efektu Baldwina wcale nie wymagało absolutnie niezmiennego środowiska językowego, a jedynie stosunkowo stabilnego. Inaczej mówiąc, jeśli przekaz kulturowy języka nie powoduje nadmiernej jego zmienności, to nie musi blokować asymilacji genetycznej.

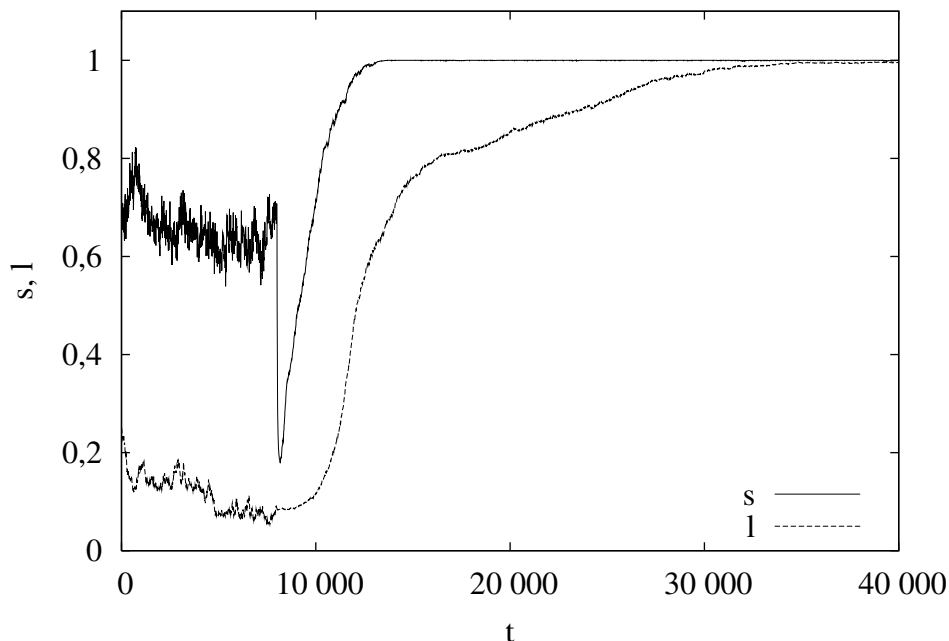
Ten ostatni aspekt sprawdzili dokładniej w symulacjach swoich modeli Nick Chater *et al.* [2009] i Morten Christiansen *et al.* [2009]. W tym przypadku agenty podlegały selekcji ze względu na szybkość uczenia się języka, który reprezentowany był przez binarny wektor „zasad” (*principles* – jak w teorii P&P; choć jednak bardziej by tu chyba pasowało określenie: wektor „parametrów” – *parameters*). Uczenie przebiegało metodą prób i błędów, ale było tendencyjnie sterowane genomem: każdej zasadzie odpowiadał jeden gen, występujący w jednej z trzech form (alleli), które decydowały o tendencji działającej przy uczeniu się tej zasady, czyli o większym prawdopodobieństwie wyboru albo pierwszej, albo drugiej z dwóch możliwych wartości zasady, albo też o wyborze neutralnym. Taki wybór dokonywany był przez każdego osobnika wielokrotnie w trakcie uczenia się zasad językowych metodą prób i błędów; dostosowanie osobnika mierzone było liczbą prób potrzebnych mu do poprawnego opanowania języka. Przy niezmiennym układzie zasad językowych, w toku ewolucji populacji obserwowano ich genetyczną asymilację: geny (czyli reprezentowane przez nie tendencje) dokładnie odpowiadały poszczególnym zasadom, ostatecznie więc czas uczenia się języka był minimalizowany (język został zakodowany w genach). Kiedy jednak język podlegał zmianom, to efekt Baldwina był redukowany (tym bardziej, im szybsze było tempo zmian językowych), albo nawet w ogóle eliminowany. Jak wiadomo, zmiany diachroniczne w językach zachodzą dość szybko (w skali historycznej nieporównywalnej w ogóle ze skalą czasu ewolucji; można tu przykładowo przywołać ogromne zróżnicowanie, jakiemu uległy języki indoeuropejskie w ciągu zaledwie 10 000 lat). Autorzy wykluczają więc taką ewentualność, aby efekt Baldwina był mechanizmem genetycznej asymilacji arbitralnych językowych własności, które początkowo są kulturowymi konwencjami wy-

magającymi nauki. Ich zdaniem żaden językowy „moduł”, „instynkt”, „organ” ani też uniwersalia językowe nie mogły się wykształcić poprzez adaptację biologiczną, gdyż ewolucja kulturowa języków przebiega zbyt szybko, aby ewolucja biologiczna była w stanie ją dogonić (tak zwany uciekający cel). Taka konkluzja nie wyklucza jednak genetycznej adaptacji do takich aspektów języka, które są stabilne z powodu wymagań funkcjonalnych (tak jak na przykład aparat mowy mógł ulec zmianom pod wpływem nacisku na produkcję łatwiejszych do odbioru i zrozumienia wokalizacji). Ogólnie jednak badacze sądzą, że to nie mózg dostosował się do języka, lecz odwrotnie – to języki dopasowywały się do mózgu w procesie ewolucji kulturowej (piszą o tym szerzej Christiansen i Chater [2008]).

Zapewne więc efekt Baldwina mógł odegrać ważną rolę w ewolucji języka, jednakże wiele szczegółów dotyczących jego (ewentualnego) funkcjonowania pozostaje jeszcze niejasnych. Jest to ciągle koncepcja kontrowersyjna i na pewno wymagająca dalszych badań [Mayley 1996; Yamauchi 2004]; niestety zarazem jest to hipoteza trudna do empirycznej weryfikacji oraz rygorystycznej analizy naukowej. Ciekawy przegląd rozważań i obserwacji na jej temat znajdziemy na przykład w pracy Webera i Depew [2003]. Ponadto może to być zaledwie jedna spośród różnych ewolucyjnych zasad wchodzących w grę wówczas, gdy łączy się i oddziałuje na siebie kilka złożonych systemów adaptacyjnych, a tak na pewno jest w przypadku języka (por. s. 36) [Wiles *et al.* 2002; Deacon 2003a,b; Ritchie, Kirby 2005]. Wczesniejsze badania skupiały się głównie na interakcjach między uczeniem się a ewolucją genetyczną, natomiast w przypadku języka niewątpliwie należy jeszcze uwzględnić jego ewolucję kulturową [Kirby, Hurford 1997; Smith 2002; Ritchie, Kirby 2006]. Osobnicze uczenie się jest kluczowym aspektem akwizycji języka; język nabywany jest od innych członków populacji, co skutkuje jego kulturową zmiennością; wreszcie populacje ewoluują. Efekt Baldwina być może pozwoli połączyć w spójną całość te ontogenetyczne, kulturowe i filogenetyczne aspekty języka.

*

Jak należy sądzić, także w omawianym tu modelu autorki przejawia się efekt Baldwina. Rozważmy najpierw populację agentów, dla których prawdopodobieństwo komunikacji p jest niższe od punktu prze-



Rys. 3.13. Ewolucja średniej zdolności uczenia się l (dolna krzywa) oraz wskaźnika sukcesu s (górną krzywą) w czasie t w modelu na sieci o krawędzi $L = 40$ i z prawdopodobieństwem mutacji $p_{mut} = 0,001$. System startuje z prawdopodobieństwem komunikacji $p = 0,1$, które w momencie $t = 8000$ zwiększone zostaje do $p = 0,98$. Tak duża jego wartość oznacza, że agenci głównie się komunikują, co pozwala zauważyć, że szybkie procesy kulturowe (wzrost wskaźnika sukcesu s) wyprzedzają wolniejsze zmiany ewolucyjne (wzrost zdolności uczenia się l). Przejściowy spadek wskaźnika sukcesu zaraz po gwałtownym wzroście prawdopodobieństwa komunikacji p jest nieistotnym numerycznym efektem, który znika, gdy zamiast skoku wartości parametru p wprowadza się jego ciągłą zmianę [diagram za: Lipowski, Lipowska 2008]

ścia (inaczej punktu krytycznego, który ma tu wartość około 0,23). W takim przypadku zdolność uczenia się pozostaje na raczej niskim poziomie (rys. 3.13); ponieważ klastery agentów używających tego samego języka są małe, to nie opłaca się być uzdolnionym w kierunku nauki języka sąsiadów. Po pierwsze, dochodzi do zbyt małej liczby aktów komunikacji, a po drugie, zbyt niewielka ich liczba kończy się sukcesem, aby miało to istotny wpływ na prawdopodobieństwo przeżycia

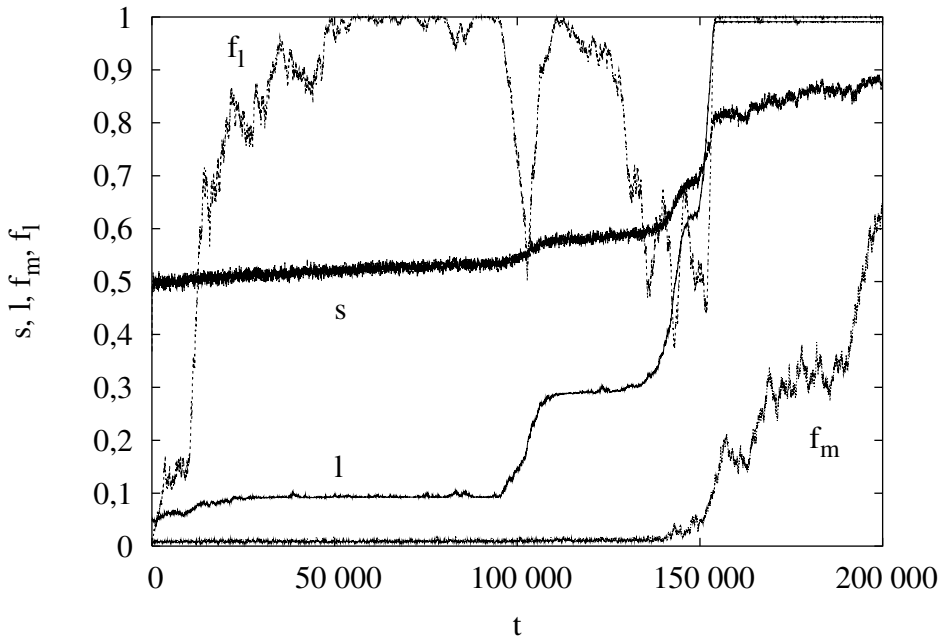
p_{surv} (por. formułę (3.3)). Natomiast w przypadku, gdy wartość prawdopodobieństwa komunikacji p przekracza wartość krytyczną, znacznie częściej podejmowane przez agenty akty komunikacji diametralnie zmieniają zachowanie modelu. Najwyraźniej homogeniczne językowo klustery agentów stają się dostatecznie duże, tak że opłaca się posiadać duże zdolności uczenia się, ponieważ zwiększa to liczbę sukcesów komunikacyjnych, a co za tym idzie – prawdopodobieństwo przeżycia p_{surv} . Przypomnijmy, że prawdopodobieństwo p_{surv} przeżycia agenta k zależy bardziej od jego lingwistycznych dokonań (od sukcesów komunikacyjnych, a konkretnie od sumy jego wag $W_k = \sum_j w_j$, która wzrasta wraz z liczbą sukcesów tego agenta) niż od jego zdolności uczenia się l_k (formuła (3.3)). Tak samo właśnie dzieje się w ewolucji biologicznej: poziom dostosowania osobnika wyznaczony jest przez jego fenotyp, a nie genotyp. Tak więc klustery agentów o dużych osiągnięciach lingwistycznych (które są konsekwencją zachowania wyuczonego) mogą być uważane za nisze ekologiczne, które ukierunkowują ewolucję przez faworyzowanie agentów o dużych zdolnościach uczenia się – a to jest dokładnie efekt Baldwina. Można też zauważyć, że zmiany własności lingwistycznych interakcji między agentami (których tempo jest wyznaczone przez prawdopodobieństwo komunikacji p) zachodzą oczywiście dużo szybciej niż zmiany ewolucyjne (których przebieg określa prawdopodobieństwo mutacji p_{mut}); i taką właśnie sytuację obserwowano w trakcie symulacji. Jak widać na diagramie 3.13, od momentu $t = 8000$ (kiedy to prawdopodobieństwo komunikacji p zostało zwiększone do $p = 0,98$, co oznacza, że agenty głównie komunikują się ze sobą) następuje szybki wzrost wskaźnika sukcesu s i nieco wolniejszy wzrost średniej zdolności uczenia się l – zatem zmiany lingwistyczne (określane wskaźnikiem sukcesu), które można uważać za procesy kulturowe formujące nisze ekologiczne, wyprzedzają adaptację ewolucyjną (tu: zdolności uczenia się).

Występuje tu jak widać dodatnie sprzężenie zwrotne: wysoki poziom zdolności uczenia się ułatwia komunikację, co powoduje zwiększanie się klasterów (wspólnot komunikacyjnych), które z kolei faworyzują dalszy rozwój zdolności uczenia się. W wyniku owego sprzężenia zwrotnego następuje nieciągłe przejście zarówno dla wskaźnika sukcesu s , jak i dla średniego poziomu zdolności uczenia się l (rys. 3.7 i 3.6). Interesującym zagadnieniem pozostaje pytanie, czy zachowanie obserwowane

w modelu istotne jest w kontekście ewolucji człowieka i ewolucji języka naturalnego. Niewątpliwie rozwój języka, którego początki datuje się na około 100 000 lat temu, skorelowany był z ważnymi zmianami anatomicznymi, takimi jak fiksacja tak zwanego genu mowy (FOXP2), obniżenie krtani czy powiększenie mózgu [Holden 2004]. Ponadto jednak już we wczesnych populacjach hominidów występowały też zapewne jakieś lingwistyczne i inne kulturowe interakcje, które kształtowały w pewien sposób specyficzne nisze ekologiczne, ukierunkowujące dalszą ewolucję naszych przodków – a więc mogące wpływać na jej przebieg poprzez efekt Baldwina. Przedstawiony tu model sugeruje, że kiedy intensywność procesów lingwistycznych (czy ogólnie kulturowych) była dostatecznie duża, to mogło nastąpić przejście, w którym zarówno dokonania językowe, jak i biologicznie wrodzone uzdolnienia człowieka podlegały gwałtownym zmianom. Być może temu właśnie momentowi zawdzięczamy dalszy błyskawiczny rozwój cywilizacji ludzkiej. „Hominid and human evolution took place over millions and not billions of years, but with the emergence of language there was a further acceleration of time and the rate of change. With the emergence of civilization, the rate of change shifted from hundreds of thousands of years to millennia” [Thompson 2009]. Oczywiście potrzebne są dalsze badania, żeby móc stwierdzić, czy istotnie takie przejście miało miejsce i na ile dobrze może być ono objaśnione w ramach zaproponowanego modelu.

Rozsądnym wydaje się założenie, że interakcje lingwistyczne w historii ludzkości stawały się stopniowo coraz częstsze i odgrywały coraz ważniejszą rolę. Dlatego też przeprowadzone zostały symulacje omawianego modelu dla rosnącego z czasem prawdopodobieństwa komunikacji p . Ponieważ pod względem zdolności uczenia się ludzie stanowią populację bardzo jednorodną, pożądana jest taka dynamika modelu, która również prowadzi do stanu l -homogenicznego, to znaczy takiego, w którym większość agentów ma taką samą i raczej dużą zdolność uczenia się l (podczas gdy w populacji początkowej zdolności te byłyby, średnio rzecz biorąc, nieduże i zróżnicowane). Na marginesie dodajmy, że owa zdolność uczenia się języka, jako cecha dziedziczna oraz niezmienna w rozwoju osobniczym, teoretycznie może mniej więcej odpowiadać postulowanemu przez Chomsky’ego LAD (*Language Acquisition Device*) [Chomsky 1965]. Chociaż obecnie wiele języków zanika lub jest na skraju wymarcia i nie można zupełnie wykluczyć, że

w dalekiej przyszłości ludzkość będzie używać tylko jednego wspólnego języka, to jednak aktualnie istnieje jeszcze wiele różnych języków. Dlatego w końcowej fazie symulacji, lub przynajmniej w długotrwałej fazie przejściowej, w modelu powinno istnieć wiele języków (czy raczej stosunkowo dużo, biorąc pod uwagę ograniczenia symulacyjne). Wyniki tego typu symulacji przedstawia rys. 3.14.



Rys. 3.14. Ewolucja czterech parametrów w czasie t w modelu na sieci o krawędzi $L = 60$ w trakcie symulacji z rosnącym liniowo (od 0,1 do 0,5) prawdopodobieństwem komunikacji p . Mierzone parametry to: (1) wskaźnik sukcesu s , (2) średnia zdolność uczenia się l , (3) odsetek populacji agentów posługujących się językiem dominującym f_m , (4) odsetek populacji agentów o najpowszechniej występującej wartości zdolności uczenia się f_l . Około $t = 150\,000$ zarówno l , jak i f_l stają się bliskie jedności, co oznacza, że prawie każdy agent ma tę samą dużą zdolność uczenia się. Dalsza ewolucja stopniowo eliminuje języki o mniejszej liczbie użytkowników, co prowadzi do stanu, w którym prawie wszystkie agenty używają tego samego języka ($s, f_m \approx 1$) [diagram z: Lipowska 2011]

Diagram ten pokazuje, jak w trakcie symulacji (których czas wynosił $t = 200\,000$, zaś wartość prawdopodobieństwa komunikacji p rosła liniowo od 0,1 do 0,5) zmieniały się wartości czterech parametrów: wskaźnika sukcesu s , średniej zdolności uczenia się l , odsetka populacji agentów posługujących się językiem dominującym f_m oraz odsetka populacji agentów o najpowszechniej występującej wartości zdolności uczenia się f_l . Zdolności uczenia się l_k dla populacji początkowej zostały ustalone jako losowe wartości z przedziału $(0, 0,1)$.

Jak widać, około $t = 50\,000$ system został zdominowany (f_l bliskie 1) przez agenty o zdolności uczenia się około 0,1. Wraz z upływem czasu i dalszym wzrostem prawdopodobieństwa komunikacji p , tak małe zdolności najwyraźniej przestają być wystarczające i układ około $t = 120\,000$ zostaje zdominowany przez agenty o zdolności bliskiej 0,3. Przez cały ten czas wartość f_m pozostaje bliska zeru, co oznacza, że nawet język dominujący ma zaledwie kilku użytkowników (i jest wówczas wiele takich równorzędnych języków). Także wskaźnik sukcesu s niewiele się zmienia, choć bardzo powoli się podnosi. Około $t = 150\,000$ ma miejsce kolejne przejście, po którym w systemie dominują już (f_l ponownie bliskie 1) agenty o maksymalnych zdolnościach uczenia się (l bliskie 1). Wówczas także wartość f_m zaczyna rosnąć, co oznacza, że niektóre języki zyskują większą liczbę użytkowników, a inne zanikają. Wyraźnie też zaczyna się podnosić wskaźnik sukcesu s . Ostatecznie ewolucja systemu prowadzi zapewne do stanu, gdzie prawie wszystkie agenty używają tego samego języka (czyli f_m i s są bliskie 1), jakkolwiek czas potrzebny do osiągnięcia tego stanu może być bardzo długi.

Przebieg symulacji w czasie $150\,000 < t < 200\,000$ w pewnym stopniu przypomina aktualny stan ewolucji języków naturalnych: w obu przypadkach mamy do czynienia z jednakową i wysoką wartością zdolności uczenia się dominującą w całej populacji oraz z pewną liczbą (niezbyt dużą ani niezbyt małą) używanych języków.

Jak widać z diagramu 3.14, przed osiągnięciem tego stanu w ewolucji modelu można wyróżnić kilka okresów stabilizacji, między którymi następują stosunkowo szybkie przejścia. Takie zachowanie modelu różni się od sytuacji przedstawionej na rysunkach 3.6 i 3.7, w której następuje tylko jedno gwałtowne przejście dla symulacji przeprowadzonych dla prawdopodobieństwa komunikacji p rosnącego w skończonej liczbie

kroków, ale stałego w poszczególnych okresach pomiarów. Prawdopodobnie tutaj to wielokrokowe zachowanie modelu jest właśnie konsekwencją ciągłości wzrostu prawdopodobieństwa komunikacji p .

Zauważmy jeszcze, że podstawowe czynniki determinujące ewolucję języka wyznaczają pewne charakterystyczne skale czasowe dla odpowiednich procesów. Mianowicie uczenie się osobnika trwa dziesiątki lat, procesy kulturowe zajmują setki lat, a ewolucja biologiczna – prawdopodobnie dziesiątki tysięcy lat. Tempo wzrostu prawdopodobieństwa komunikacji p , które może być interpretowane jako tempo zmian kulturowych, odpowiada jeszcze jednej skali czasowej. Opisane tu wyniki symulacji wskazują na to, że i ona może mieć wpływ na ewolucję języka. Oczywiście potrzebne są jeszcze dalsze badania, żeby móc dokładnie przedstawić obraz skomplikowanych współzależności i wzajemnych powiązań między procesami uczenia się, kulturą a ewolucją biologiczną, oraz ich wspólnego wpływu na ewolucję języka.

3.6. Wnioski

Komputerowe symulacje modelu ewolucyjnej gry w nazywanie pokazały, że połączenie czynników lingwistycznych i ewolucyjnych wywołuje przejście nieciągłe oraz że proces uczenia się języka może ukierunkowywać ewolucję na wzrost zdolności uczenia się poprzez efekt Baldwina. Z kolei przy nieco bardziej realistycznym założeniu, a mianowicie o rosnącym w sposób ciągły prawdopodobieństwie komunikacji p , gwałtowne przejście zostaje zastąpione przez serię łagodniejszych przejść – a więc sposób zmiany (skokowy lub ciągły) parametru p także wpływa na dynamikę modelu. To pokazuje, że tempo i sposób zachodzenia zmian kulturowych może być jeszcze jednym czynnikiem wpływającym na ewolucję języka (i ustalającym dodatkową charakterystyczną skalę czasową).

Aktualny model nie jest bardzo wymagający obliczeniowo. Wydaje się więc możliwe konstruowanie i symulowanie jego różnych rozszerzeń i modyfikacji. Przykładowo, można wprowadzić więcej niż jeden obiekt jako temat „rozmów” agentów albo zbadać dodatkowo statystyczne własności symulowanych języków, na przykład dystrybucje liczby ich użytkowników czy długości życia, ewentualnie dokładniej prześledzić

przebieg dyfuzji języków lub tworzenia się rodzin języków oraz wpływ barier geograficznych na tego typu procesy. Takie problemy także były już badane, przykładowo modelowano współzawodnictwo między językami [Abrams, Strogatz 2003; Schulze *et al.* 2008; de Oliveira *et al.* 2008]. Być może jednak dynamika omawianego tu modelu, oparta na elementarnym akcie komunikacji, dałaby bardziej naturalny opis przebiegu rozwoju języków niż pewne inne proponowane modele, które używają reguł zdefiniowanych na poziomie populacji (a nie poszczególnych osobników).

Na koniec warto jeszcze wspomnieć, że zaproponowany model ma również pewne interesujące aspekty fizyczne, które należałoby dokładnie zbadać w przyszłości [Lipowski, Lipowska 2008]. Jak opisano to w podrozdziale 3.3, przejście między fazą koherentną językowo a niekoherentną w przypadku utrzymywania stałego poziomu zdolności uczenia się jest raczej przejściem ciągłym. Z drugiej strony przypomina ono tak zwane łamiące symetrię przejście w q -stanowym modelu Potts'a (który w dostatecznie niskiej temperaturze wpada w jeden z q stanów podstawowych, przy czym q odpowiadałoby tu liczbie wszystkich języków używanych przez agenty). Jednakże w przypadku dwuwymiarowym i dla dużych wartości q przejście w modelu Potts'a ma charakter nieciągły. Wyjaśnienie tej niezgodności wymagałoby jeszcze dalszych badań.

Prezentowany tu model spotkał się z zainteresowaniem, wyrażonym nie tylko cytowaniami w literaturze przedmiotu, ale także swoistą kontynuacją. Najpierw model ten został reimplementowany przez Torvalda Lekvama *et al.* [2014]. Ogólne zachowanie oryginalnego modelu zostało poprawnie odtworzone, a konieczny tu dłuższy okres jego ewolucji aż do osiągnięcia pełnej synchronizacji leksykonów należy przypisać według autorów możliwym różnicom w metodach wyznaczania wartości niektórych wielkości, na przykład wieku agentów. Ponadto kwestionują też oni pełną stabilność modelu, to znaczy odporność na zmiany wartości wyjściowych parametrów, na przykład prawdopodobieństwa komunikacji p czy mutacji p_{mut} (zdarzało się dla niektórych ich kombinacji, że populacja wymierała jeszcze przed synchronizacją; osiągnięcie tego stanu wymagało wtedy odpowiedniego dopasowania tych wielkości). Generalnie jednak działanie modelu, a w szczególności wystąpienie efektu Baldwina zostały potwierdzone. Konkludując, autorzy postulo-

wali włączenie do badanego modelu typowego algorytmu genetycznego, co ich zdaniem wzmocniłoby w nim działanie procesu selekcji naturalnej i ułatwiło przebieg asymilacji genetycznej, a zarazem zwiększyłyby stabilność modelu. Proponowali także przeprowadzenie badań dla populacji lokowanych na rozmaitych typach grafów, w tym także adaptacyjnych, jak również zmianę trybu interakcji na wielu słuchaczy, czy wreszcie generowanie wypowiedzi złożonych syntaktycznie.

Plany te częściowo zrealizował Lekvam [2014], który faktycznie zmodyfikował oryginalny model autorki, wprowadzając algorytm genetyczny jako mechanizm kierujący ewolucją biologiczną agentów. Stosowany w nim genom był co prawda tylko jednoelementowy (jedyne jego gen odpowiadał zdolności uczenia się), co można by uznać za przerost „formy nad treścią” (sam autor określił to jako *over-engineering*). Niemniej powstał w ten sposób system dość elastyczny, w którym stosunkowo łatwo byłoby wprowadzić inne jeszcze cechy podlegające selekcji naturalnej. Użycie algorytmu genetycznego pociąga za sobą oczywiście zmienioną dynamikę populacyjną, gdyż odpowiednie procesy życiowe nie są aplikowane sekwencyjnie do indywidualnych agentów, lecz etapowo i kolektywnie, to znaczy przez regularną wymianę (części) pokoleń, następującą każdorazowo po ustalonej liczbie interakcji komunikacyjnych. Zachodzi to tutaj w formie tak zwanej selekcji turniejowej, kiedy to z losowej puli agentów wybiera się pewną grupę zwycięzców, czyli agentów najlepiej dostosowanych (a rolę *fitness* pełni tu prawdopodobieństwo przeżycia), które następnie mogą się rozmnażać, podczas gdy reszta puli jest eliminowana. Nie następuje tu więc zastąpienie całego pokolenia kolejnym (jak na przykład w modelach iterowanego uczenia się), lecz pokolenia nadal częściowo się na siebie nakładają.

Mimo tej modyfikacji ogólny rozwój systemu przebiegał podobnie i prowadził do porównywalnych wyników jak w poprzedniej wersji. Autor przyznał jednak, że wymagało to odpowiedniego manipulowania dwoma parametrami (liczba interakcji na etapie komunikacji *versus* liczba wyselekcjonowanych agentów na etapie rotacji pokoleń), zamiast jednym, którym w oryginalnym modelu było prawdopodobieństwo komunikacji, określające skalę zachodzenia procesów biologicznych w stosunku do kulturowych. Ważną własnością „modelu Lipowskiej” jest według Lekvama właśnie możliwość badania relacji między transmisją kulturową a biologiczną oraz jednoczesne uwzględnienie wpływu

osobniczego uczenia się na te procesy, przejawiającego się w efekcie Baldwina.

Dodajmy jeszcze, że Lekvam opracował też kolejny model, będący z jednej strony rozszerzeniem powyższego (z bogatszym genomem, reprezentującym zamiast zdolności uczenia się trzy inne kognitywne własności agentów, na przykład wielkość pamięci), a z drugiej strony odwołujący się do innego modelu autorki, który zostanie przedstawiony w rozdziale 5. (z ewoluującą siecią połączeń między agentami zamiast stałej i regularnej, przy czym rozwój tej sieci sterowany jest pewnymi preferencjami komunikacyjnymi agentów). W ten sposób można badać koewolucję systemu komunikacyjnego i struktury społecznej w populacji. W tym przypadku populacja nie osiągała pełnego konsensusu, lecz dzieliła się na odrębne, wewnątrznie zsynchronizowane językowo grupy, co również odpowiada trybowi wielojęzycznemu opisanemu w podrozdziale 5.5. Autorowi niewątpliwie udało się zrealizować założony cel, a mianowicie zademonstrować różne możliwości zastosowania algorytmu genetycznego w badaniach niektórych aspektów ewolucji języka, co najważniejsze zaś wtedy, gdy wiążą się one z użyciem trzech różnych skal czasowych, czyli biologicznej, kulturowej i osobniczej. Tę ostatnią kwestię należy również podkreślić jako zasadniczą własność modelu autorki.

4.

Wieloobiektowa gra w nazywanie

Language evolution:

The hardest problem in science?

Morten H. Christiansen, Simon Kirby

W niniejszym rozdziale przedstawiony został drugi autorski model gry w nazywanie, a mianowicie model wieloobiektowy, pozwalający badać procesy powstawania i zanikania synonimów oraz homonimów w grze w nazywanie. Wyłaniający się w tym modelu język, pomimo występowania synonimii i homonimii, pozwala agentom na skuteczną komunikację. Zarazem dynamika modelu jest taka, że choć homonimia wydaje się negatywnie wpływać na efektywność procesów komunikacji, to jednak zjawisko to nie zanika, natomiast stopień synonimii wyraźnie maleje z biegiem czasu, dążąc praktycznie do poziomu zerowego. Taki stan jest zgodny z obserwacjami poczynionymi dla języków naturalnych, w których homonimia jest częsta, zaś (całkowita) synonimia rzadka. W modelu zbadano także wpływ szumu na komunikację, który okazuje się dwojaki, gdyż nie tylko redukuje on efektywność lokalnych interakcji, co nie jest wynikiem zaskakującym, ale długofalowo wpływa też pozytywnie na zróżnicowanie słownictwa i być może także na eliminację synonimii.

4.1. Synonimia i homonimia

Ujęcie problemu synonimów i homonimów w grach językowych było już omawiane w podrozdziale 2.6. dla kilku modeli, między innymi dla minimalnej gry w nazywanie na s. 130-131 (a dodatkowe przykłady omówiono jeszcze w podrozdziale 4.6). Jak zatem wiadomo, zasadniczo w grze w nazywanie nie dopuszcza się do przypadkowego pojawienia się homonimów (identycznych słów odnoszących się do różnych obiektów), natomiast z samego charakteru gry wynika, że występują w niej synonimy (różne słowa oznaczające ten sam obiekt). Celem gry jest jednak nie tylko wyłonienie się wspólnego dla całej populacji języka efektywnego (czyli bez homonimów), zapewniającego skuteczną komunikację, ale najlepiej także minimalnego (bez synonimów), zatem w sumie – optymalnego (wzajemnie jednoznacznego; por. s. 117) – i większość omawianych wcześniej strategii gry w nazywanie cel ten realizuje.

Język optymalny byłby idealny, „jednakże ideał ten prawdopodobnie nie jest zrealizowany w żadnym języku naturalnym” [Lyons 1976, s. 446]. W językach etnicznych występują oczywiście i synonimy, i homonimy. W kolejnych podrozdziałach przedstawiamy model gry w nazywanie, w którym zbadana została ewolucja takiego nieidealnego języka, jak również otrzymane w ramach tego modelu wyniki. Najpierw jednak prezentujemy pewne ogólne uwagi na temat zjawiska synonimii i homonimii w języku naturalnym, a następnie obserwacje dotyczące tego zagadnienia, pochodzące z badań wordnetów, i wreszcie na koniec rezultaty interesujących symulacji Jamesa R. Hurforda odnoszących się do tego problemu.

Homonimia to relacja między wyrazami (czy ogólniej wyrażeniami językowymi), które mając identyczną formę, reprezentują różne znaczenia; z **polisemią** zaś mamy do czynienia, gdy znaczenia wyrażenia wieloznacznego są ze sobą powiązane lub wywodzą się ze wspólnego źródła. Homonimy zwykle traktuje się jako odrębne jednostki, natomiast wyrażenie polisemiczne jako pojedynczą jednostkę, której odpowiada wiele sensów. Jak czytamy w *Encyklopedii językoznawstwa ogólnego*: „Różnica między polisemią a homonimią ma zatem charakter genetyczny, a więc diachroniczny. We współczesnym językoznawstwie, w którym rozróżnia się starannie synchroniczne i diachroniczne spojrzenie na język, podkreśla się, że z synchronicznego punktu widze-

nia odróżnianie polisemii od homonimii jest bezpodstawne” [Polański 1999, s. 447]. W dalszej części rozdziału rozróżnienie to jest już pomijane. Dodajmy jednak, że można na to zagadnienie spojrzeć też jako na zjawisko stopniowalne. Nie zawsze łatwo jest definitywnie rozgraniczyć homonimie od polisemii i niektórzy autorzy, zamiast tworzyć taki dychotomiczny podział, proponują traktować je jako przeciwległe końce pewnej ciągłej skali, na której można znaleźć także formy pośrednie, wykazujące cechy obu z nich [Utt, Padó 2011]. W językoznawstwie kognitywnym proponuje się jeszcze dłuższą skalę – od homonimów, przez wyrażenia polisemiczne, do niejednoznacznych (nieostrych) [Gries 2006].

Synonimia to relacja semantyczna zachodząca między wyrazami (czy ogólniej wyrażeniami językowymi), które posiadają to samo lub bardzo podobne znaczenie. Rozróżnia się synonimie **całkowitą** (albo absolutną) oraz **częściową** (bliskoznaczność). Z całkowitą mamy do czynienia wówczas, gdy jednostki językowe mogą zastępować się wzajemnie we wszystkich kontekstach bez zmiany znaczenia wypowiedzi, a częściowa występuje wtedy, gdy taka wymiana jest możliwa tylko w pewnych kontekstach. Można też uznawać bliskoznaczność za zjawisko stopniowalne, w którym pary synonimiczne stanowią elementy pewnego kontinuum, od synonimów absolutnych, przez synonimy częściowe (różnego stopnia), po plezjonimy (wyrażenia nierównoznaczne o zbliżonych znaczeniach) [Cruse 1986]. Jako źródła pojawiania się synonimów wskazuje się zwykle przenikanie do języka równoznacznych do już istniejących w nim elementów z gwar i dialektów, z gwar środowiskowych i socjolektów oraz z języków obcych, jak też tendencje do używania eufemizmów i wyrażen ekspresywnych.

Choć synonimia to relacja dobrze znana, wciąż jednak nie ma konsensusu co do jej definicji i statusu. Jurij D. Apresjan [1980] mówi o dwóch podejściach do definiowania synonimów: czysto semantycznym (identyczność znaczenia) i operacyjno-semantycznym, czyli dystrybucyjnym (wymienialność w kontekstach). To pierwsze wywodzi się jeszcze od Gottfrieda W. Leibniza, stosowali je także Wilhelm von Humboldt oraz Charles K. Ogden i Ivor A. Richards. Za kryterium wzajemnej substytucji w wersji silnej (we wszystkich kontekstach) opowiadali się na przykład Leonard Bloomfield czy Stephen Ullmann, w wersji

słabej (w niektórych kontekstach) – początkowo sam Apresjan, także John Lyons. Ten ostatni we *Wstępie do językoznawstwa* [Lyons 1976] przedstawił ciekawą koncepcję łączącą oba podejścia: z jednej strony wyróżnił **synonimię kompletną i niekompletną** (przy identyczności lub tylko podobieństwie cech semantycznych), a z drugiej strony **synonimię totalną i nietotalną** (przy substytucji w dowolnych lub tylko niektórych kontekstach). Ze skrzyżowania tych dwóch podziałów powstaje klasyfikacja synonimów na cztery kategorie. Z kolei w swojej *Semantyce* Lyons [1984] traktuje synonimy jako **wzajemne hiponimy** (jeśli A jest rodzajem B oraz B jest rodzajem A, to A jest synonimem B). Natomiast niektórzy leksykografowie, uznając, że zasada wzajemnej zamienialności ma ograniczony charakter, zaproponowali jeszcze inne operacyjne kryterium synonimii, mianowicie możliwość definiowania synonimów w jednakowy lub prawie jednakowy sposób. Zasadę porównywania definicji słownikowych, pod warunkiem jednak, że spełniają one pewne wymogi formalne, uznał za racjonalną także Apresjan [1980, s. 277–282], przyjmując ją jako efektywną procedurę sprawdzania synonimiczności.

Uwagę zwraca **dysproporcja** między stosunkowo dużą liczbą homonimów a małą synonimów całkowitych w językach etnicznych (zjawisko bliskoznaczości obserwowane jest rzecz jasna częściej). O tym, że synonimia absolutna, jeśli w ogóle istnieje, jest bardzo rzadka, zapewniają już Willard V.O. Quine [1951] i Nelson Goodman [1952]. William E. Nagy i Judith A. Scott [2000, s. 271] twierdzą, że: „Words often have more than one meaning, and the more frequent a word is in the language, the more meanings it is likely to have” i dalej: „However, true synonyms are rare, both within and between languages” [2000, s. 278] (nawiasem mówiąc, o tym, że częstotliwość występowania słów jest skorelowana z ich wieloznaczością, wiadomo przynajmniej od pracy George’a K. Zipfa [1945]). Reinhard R.K. Hartmann i Francis C. Stork [1972] także stwierdzają, że „Prawdziwe, czyli czyste, synonimy [...] są rzadkie” [cyt. za: Grodziński 1985, s. 15]. Również John Lyons [1976, s. 490] potwierdza, że „Prawdą jest niewątpliwie, że w języku istnieje bardzo niewiele takich [absolutnych] synonimów”. I jeszcze często cytowana wypowiedź Stephena Ullmanna [1976, s. 109]: „it is almost a truism that total synonymy is an extremely rare occurrence, a luxury which language can ill afford”. Podobnie niektórzy leksyko-

grafowie dowodzą, że żadne dwa słowa nie mają identycznych znaczeń (we wszystkich kontekstach), czyli że synonimia całkowita w ogóle nie istnieje: „there is no such thing as a true synonym” [Laurence Urdang, we wstępie do: Rodale 1978]. Magdalena Derwojedowa i jej współautorzy [2008a, s. 352] w swojej prezentacji używają sformułowań: „Synonimy, the unaccessible relation” oraz „The great illusion of (strict) synonymy”, zaś cytując w swoim artykule prace L. Bloomfielda, C.F. Hocketta, J. Lyonsa, P. Edmondsa i G. Hirsta, konstatują: „There is ample linguistic evidence that strict synonymy does not exist at all”. Z drugiej jednak strony Apresjan [1980, s. 287, 294] utrzymuje, że choć „istnieje szeroko rozpowszechniona opinia, że w językach naturalnych nie ma synonimów «absolutnych»”, to „jeżeli będziemy rozumieć synonimy dokładne w określonym wyżej sensie, to w językach naturalnych nie jest ich wcale tak mało” (przy czym postulowanym przez niego wcześniej warunkiem koniecznym i wystarczającym synonimii jest całkowite pokrywanie się definicji słownikowych wyrażanych w języku semantycznym oraz identyczność części mowy i walencji semantycznych).

Proponowane były różne wyjaśnienia faktu, iż synonimy całkowite są tak rzadko spotykane. Według niektórych autorów unikanie synonimii w językach naturalnych jest nam wrodzone. Na przykład Eve V. Clark, badająca głównie procesy akwizycji języka (zob. też s. 121), przypisuje to naturalnej tendencji ludzi do szukania i tworzenia raczej nowych znaczeń niż akceptowania tego samego znaczenia dla różnych form. Uzasadniając sformułowaną przez siebie **Zasadę Kontrastu**: „Every two forms contrast in meaning”, Clark [1987, s. 2] odwołuje się i do prawa różnicowania Michela Bréala (pojedyncze znaczenie wyrażane przez różne formy zwykle wiąże się mocniej z jedną z nich, podczas gdy pozostałe przyjmują odmienne znaczenia), i do Zasady Współpracy Paula Grice’a. Zasada Kontrastu jest regułą pragmatyczną, która ułatwia nam nabywanie języka ojczystego przez zawężanie zakresu możliwych znaczeń dla nowo poznanego wyrażenia językowego, ale jej implikacje nie ograniczają się tylko do procesu nabywania języka, lecz wpływają na samą strukturę systemu językowego; wynika z niej właśnie, że synonimów całkowitych nie ma lub są bardzo rzadkie: „As a result, speakers do not tolerate synonyms in language” [Clark 1990, s. 147].

Jak twierdzi Andrew Carstairs-McCarthy [1994, s. 737], zasada ta jest ogólnie akceptowana przez psycholingwistów. Jest też wykorzystywana przez lingwistów i to nie tylko w zakresie leksyki, ale i morfologii, na przykład przez Marka Aronoffa (dla wytłumaczenia zjawiska blokowania morfologicznego) czy przez Paula Kiparsky'ego, który sformułował zresztą własną zasadę **Unikania Synonimii** (*Avoid Synonymy*): „The output of a lexical rule may not be synonymous with an existing lexical item” [1983, s. 15]. Max W. Wheeler [1980, s. 273] przywołuje natomiast tak zwane **Uniwersalium Humboldta**, które parafrazuje następująco: „One form tends to correspond to one meaning; that is, avoid synonyms; avoid ambiguity”.

Psycholożka rozwojowa Ellen Markman przyjmuje natywistyczne założenie, że dzieci dysponują pewną wrodzoną wiedzą wykorzystywaną w procesie akwizycji języka. Markman zauważyła u dzieci predyspozycję do zakładania, iż znaczenia różnych słów nie pokrywają się. Sformułowała to jako zasadę **Wzajemnego Wykluczenia** (*Mutual Exclusivity*: „Category terms will tend to be mutually exclusive”), która powoduje, że jeśli dziecko zna już nazwę jakiegoś obiektu, to odrzuci nową, a ściślej mówiąc, przypisze jej inne znaczenie, unikając w ten sposób synonimii [Markman, Wachtel 1988]. William E. Merriam *et al.* [1989] twierdzą zaś, że tendencja do korzystania z tej zasady utrzymuje się także u dorosłych i przedstawiają pewne argumenty na rzecz jej wartości adaptatywnej.

Również formalisci Kenneth Wexler i Peter W. Culicover [1980], formułując reguły akwizycji języka, uznali za jedną z wrodzonych **Zasadę Jednoznaczności** (*Uniqueness Principle*), która pozwala na wygenerowanie tylko jednej struktury powierzchniowej z dowolnej struktury głębszej i tym samym zapobiega przyswajaniu więcej niż jednej formy dla danego znaczenia. Zgadza się z tą zasadą także Steven Pinker [1984, s. 113], opowiadając się, podobnie jak niektórzy inni autorzy, za jej rozszerzeniem na przyswajanie jednostek leksykalnych.

Szerszą dyskusję powodów, dla których w językach naturalnych jest tak niewiele synonimów całkowitych, znajdziemy też w monografii M. Lynn Murphy [2003, s. 161–165]; autorka zaczyna ją sugestywnym cytatem z książki [Cruse 1986, s. 270]: „[natural] languages abhor absolute synonyms just as nature abhors a vacuum”. Generalnie dla wyrażen synonimicznych zauważyć można tendencję, że albo stopnio-

wo różnicują się ich znaczenia, albo któreś wychodzi z użycia. Nawet jeśli początkowo będą to synonimy absolutne, to w ujęciu diachronicznym ich drogi – „idiosyncratic paths through time and language” – stopniowo się rozejdą, na przykład, gdy jedno wyrażenie stanie się polisemiczne i przyjmie taki dodatkowy sens, którego nie będzie miało drugie z nich. Na współzależność i interakcje między polisemią i synonimią zwraca też uwagę Emma Skallman [2012], według której synonimia całkowita jest tak rzadka między innymi dlatego, że wiele słów jest polisemicznych, a wówczas mało prawdopodobne jest dokładne pokrywanie się wszystkich znaczeń takiego polisemicznego wyrażenia ze wszystkimi znaczeniami innego, choćby bliskoznacznego.

*

Ciekawe obserwacje wynikają także z badań **wordnetów**, czyli elektronicznych baz leksykalno-semantycznych, które można traktować jako słowniki, tezauryusy albo ontologie (taksonomie pojęciowe). Oryginalny WordNet (Princeton WordNet – PWN) [Miller 1995; WordNet 2010] utworzono w USA dla języka angielskiego, a następnie i w innych krajach powstały kolejne wordnety dla różnych języków. Każdy wordnet stanowi **sieć**, której węzłami są tak zwane **synsety**, czyli zbiory wyrażających to samo znaczenie jednostek leksykalnych (rozumianych tu jako pary leksem-znaczenie). Można powiedzieć, że synset jest reprezentantem znaczenia, które niosą należące do niego jednostki leksykalne. Do synsetu należą więc synonimy, i choć mogą być to synonimy częściowe, to większość synsetów jest jednak jednoelementowa (na przykład od około 53% dla rzeczowników do 62% dla przymiotników w PWN oraz od 77% do 87% w plWordnecie, inaczej w Słowsieci, czyli w polskiej wersji tej bazy [Słowsieć 2014]). Pozostałe synsety są głównie dwu- lub trzejelementowe, a tych o większej liczbie synonimów jest, znów zależnie od części mowy, zaledwie od sześciu do dziesięciu procent w PWN oraz od dwóch do pięciu procent w Słowsieci.

Poszczególne znaczenia wyrazów wieloznacznych (homonimicznych oraz polisemicznych – bez rozróżnienia) reprezentowane są w wordnetach przez odrębne jednostki leksykalne, należące do różnych synsetów. Ogółem te wyrazy polisemiczne stanowią około jednej czwartej całego zasobu leksykalnego [Słowsieć 2014; Vetulani *et al.* 2010], przy czym w PWN 3.0 mają one średnio po: 2,8 (rzeczowniki), 2,7 (przymiotni-

ki) oraz 3,6 (czasowniki) znaczenia [WordNet 2010] (i odpowiednio: 2,5, 2,7 oraz 3 znaczenia w Słownosieci, zaś 3,16 znaczenia (sumarycznie) w PolNecie, czyli drugim polskim wordnetem [Vetulani *et al.* 2010]). Jak się wydaje, taki stopień polisemii można uznać za zaskakująco wysoki, zwłaszcza w porównaniu z poziomem synonimii (tu z kolei można by oczekiwać wyższego). Dla pełności tych statystyk dodajmy jeszcze, że Słownosieć zawiera już ponad 170 tys. rzeczowników, czasowników i przymiotników, reprezentujących niemal 250 tys. znaczeń, które pogrupowane są w ponad 180 tys. synsetów; jest to już więcej niż w PWN i prawdopodobnie Słownosieć jest obecnie największym wordnetem na świecie, przy czym nieustannie się rozrasta.

Synsety połączone są różnymi **relacjami leksykalno-semantycznymi**, z których najważniejsze to: hiperonimia/hiponimia (reprezentowane przez największą liczbę krawędzi, tworzących razem jakby zasadniczy szkielet sieci w formie hierarchicznego **drzewa**), meronimia/holonimia oraz antonimia. Dla porównania, liczby krawędzi w Słownosieci 2.0 (w grudniu 2010) wynosiły około: 38 tys. dla hiperonimii/hiponimii, 12 tys. dla meronimii/holonimii i 2 tys. dla antonimii (oraz jeszcze kilka tysięcy dla kilkunastu dodatkowych relacji, których w Słownosieci jest więcej niż w PWN) [Maziarz *et al.* 2011]. Tak powstała sieć odzwierciedla system leksykalny języka, w którym każda jednostka leksykalna uzyskuje znaczenie przez odniesienie do innych jednostek leksykalnych w jego obrębie (poprzez relacje, w jakie z nimi wchodzi).

Interesującą dyskusję pojęć synonimii i synsetu, jakie funkcjonują w ramach wordnetów, możemy znaleźć w pracach twórców Słownosieci [Maziarz *et al.* 2013; Derwojedowa *et al.* 2008a,b]. Zwracają oni uwagę na pewne związane z nimi problemy metodologiczne i praktyczne, przede wszystkim cyrkularność ich definicji oraz kwestię prymarności. W PWN, jak również i w EWN (EuroWordNet), o synonimii rozstrzyga słabe kryterium wymienialności (w niektórych kontekstach – niekoniecznie wszystkich), a więc elementy synsetów nie muszą być synonimami absolutnymi. Stosowane tu kryterium rodzi różne problemy, na przykład często dla słów o różnych denotacjach, a więc niebędących synonimami, można znaleźć konteksty, w których są one wzajemnie wymienialne (dotyczy to między innymi par typu hiperonim/hiponim). Z drugiej strony są też pary niewątpliwie synonimiczne, które jednakże

w praktyce są niewymienialne, na przykład ze względów stylistycznych (jak synonimy chronologiczne, czyli wyrazy przestarzałe i ich współczesne odpowiedniki). Zatem wyznaczanie synsetów nie zawsze musi być proste, może wymagać złożonych semantycznych rozważań, a więc dużego nakładu pracy leksykografów (albo ankietowania dużej liczby rodzimych użytkowników języka, jak w przypadku szwedzkiego wordnetu).

Wspomniani już autorzy Słowsieci traktują synsety inaczej niż twórcy pozostałych wordnetów, dla których, po uprzednim wyznaczeniu synsetów, stanowią one podstawowe elementy, z jakich dopiero następnie buduje się całą sieć. Jak piszą Marek Maziarz *et al.* [2013, s. 770]: „Synonimy is intended as the cornerstone of a wordnet, hypernymy – its backbone, meronymy – its essential glue”. Żadna z tych relacji nie zachodzi jednakże pomiędzy synsetami, toteż należy przenieść punkt ciężkości z synsetów na jednostki leksykalne. Znając zachodzące między nimi relacje, można wówczas wyznaczać synsety jako zbiory tych jednostek, które wchodzą w identyczne relacje z pozostałymi. Modyfikując definicję Lyonsa (synonimy to wzajemne hiponimy [Lyons 1984, 9.4]), proponuje się przyjąć pewien zestaw relacji konstytutywnych, definiujących synonimię. Aktualnie w Słowsieci będą to hiperonimia/hiponimia i holonimia/meronimia (oraz pewne dodatkowe relacje w przypadku czasowników). Synonimiczne jednostki leksykalne muszą przede wszystkim posiadać wspólny hiperonim oraz te same meronimy (o ile takowe istnieją); inaczej mówiąc, są to jednostki zajmujące identyczne miejsce w sieci powiązań wordnetu. Taka definicja obejmuje zarówno synonimy całkowite, jak i niektóre częściowe. Synset staje się w ten sposób naturalną konsekwencją topologii sieci; można go traktować jako **klasę równoważności** wyznaczoną w zbiorze jednostek leksykalnych ze względu na identyczność relacji konstytutywnych, w jakich te jednostki uczestniczą. Synonimia jest w ten sposób zredukowana do pozostałych relacji leksykalno-semantycznych, które wydają się być bardziej definitywne czy obiektywne, a więc łatwiejsze do wyznaczania i mniej podatne na błędy wynikające z subiektywności ocen. Rozróżnianie poszczególnych sensów wyrazów polisemicznych również jest w plWordNecie wspomagane badaniem sieci ich powiązań i konsekwencji tych powiązań (w rodzaju dziedziczenia własności hiperonimów).

Przyjęcie takich założeń przyniosło wymierne skutki dla organizacji całej Słownosieci. Spowodowało to bowiem (w stosunku do PWN) wzrost liczby jednostek polisemicznych, które trafiają do większej liczby synsetów, mających teraz przeciętnie mniejszą liczbę elementów, a często tylko jednoelementowych. Z kolei drzewo hiperonimii stało się głębsze, czyli bardziej wielopoziomowe, a z drugiej strony często wiele kohiperonimów ma w nim wspólny hiperonim. W dodatku pominięcie synonimii jako głównego kryterium budowania wordnetu sprawia, że jest on mniej zależny od skomplikowanych rozważań semantycznych wymagających ciągłej introspekcji jego redaktorów, dotyczącej bliskości czy identyczności znaczeń. Zamiast tego możliwe jest automatyczne, czy choćby półautomatyczne, konstruowanie synsetów jako zbiorów jednostek leksykalnych o tych samych połączeniach w danej sieci.

Frapujące wyniki badań oryginalnego WordNetu zaprezentowali natomiast Mariano Sigman i Guillermo A. Cecchi [2002]. Ograniczając się do podsystemu rzeczownikowego WordNetu, przeanalizowali strukturę tej sieci, jak też jej pewnych podgrafów odpowiadających poszczególnym relacjom semantycznym lub ich kombinacjom, zachodzącym między znaczeniami rzeczowników. Uwzględnili relację hiperonimii, meronimii, antonimii i polisemii (nazywając tak relację posiadania przez różne znaczenia wspólnej formy wyrazowej). Dla tych różnych podsieci wyznaczone zostały ich podstawowe charakterystyki, takie jak: rozkład stopni wierzchołków grafu, średnia odległość w grafie, współczynnik klasteryzacji czy pośrednictwo węzłów, które pozwalają określić własności sieci.

Rozkład stopni wierzchołków obrazuje homogeniczność grafu. Dla trzech z wymienionych relacji (oprócz bardzo rzadkiej antonimii) otrzymane rozkłady okazały się **potęgowe**, co świadczy o bezskalowości tych sieci. Własność ta jest charakterystyczna dla wielu systemów samoorganizujących się. Większość węzłów ma niski stopień, czyli niewiele połączeń z innymi, ale oprócz pewnej liczby węzłów o dowolnych pośrednich stopniach występują też nieliczne węzły o stopniu wyjątkowo wysokim, czyli o ogromnej liczbie połączeń z innymi węzłami (tak zwane *huby*). Jak pokazują analizy, tego rodzaju układy są bardzo wrażliwe na utratę *hubów*, gdyż bardzo mocno zaburza to ich funkcjonowanie.

Porównanie **średnich odległości** między węzłami sieci oraz ich **współczynników klasteryzacji** (które określają poziom występowania odrębnych klasterów w sieci) w podgrafach z samą hiperonimią lub z dodanymi pozostałymi – jedną lub więcej – relacjami pokazało, że największe zmiany powoduje relacja polisemii. Podczas gdy relacja hiperonimii reprezentowana jest przez strukturę drzewiastą (w której średnia odległość jest duża), to dodanie do niej polisemii znacznie skraca odległości między węzłami (ze średniej 11,9 do 7,4, co jest już zbliżone do słynnych sześciu stopni separacji; w dodatku odległości te przestają silnie zależeć od głębokości węzłów w drzewie). Ponadto włączenie polisemii istotnie zwiększa klasteryzację sieci (o dwa rzędy wielkości!). Tak więc dodanie polisemii zmienia strukturę sieci na „zgronowaną” (grona, czy inaczej **klastery**, to grupy węzłów bardzo silnie wzajemnie ze sobą powiązanych) oraz o niezbyt odległych od siebie węzłach (między dowolnymi dwoma można przejść, średnio rzecz biorąc, w kilku krokach). Oznacza to, że polisemia przekształca wyjściowe drzewo w tak zwaną **sieć małych światów**. Jest to ważna własność niektórych sieci złożonych (na przykład sieci społecznych lub WWW): mimo że są to sieci rzadkie (to znaczy liczba ich krawędzi jest nieduża w stosunku do liczby węzłów), to jednak jest w nich „wszędzie blisko” (ich średnie odległości międzywęzłowe są małe), a ponadto ich węzły mają tendencję do grupowania się na zasadzie „przyjaciel mojego przyjaciela jest moim przyjacielem”, tworząc gęsto połączone skupiska.

Pośrednictwo węzła jest miarą jego centralności w sieci, a wiąże się z liczbą przechodzących przez niego dróg. Jeśli badamy przesył informacji lub innych zasobów w sieci, to węzły o dużym pośrednictwie są tymi najbardziej aktywnymi w sieci, o największym natężeniu „ruchu” (ang. *traffic* albo *betweenness*). W drzewie hiperonimii, nawet po dodaniu do niego antonimii i meronimii, największe pośrednictwo mają węzły o najwyższej liczbie hiponimów (nawet do 400). Jednakże dodanie polisemii także i w tym przypadku zmienia charakter sieci, gdyż tymi najaktywniejszymi stają się wówczas węzły odpowiadające znaczeniom najbardziej polisemicznych wyrazów, jak na przykład: *head* (32 znaczenia), *line* (29) czy *point* (24). Ponieważ relacja posiadania wspólnej formy wyrazowej jest symetryczna i przechodnia, to grupy węzłów sieci odpowiadających różnym znaczeniom danego słowa tworzą tak zwane **kliki**, czyli podgrafy spójne, w których wszystkie

węzły są ze sobą wzajemnie połączone. I właśnie takie największe kliki tworzące się dzięki polisemii przejmują rolę „centrów ruchu” w sieci WordNet, mimo że nie zawierają one węzłów o najwyższym stopniu.

Komentując te wyniki, badacze przypominają, że wszystkie znane języki są polisemiczne. Dlaczego tak jest, skoro dekodowanie języka jednoznacznego byłoby trywialnym problemem? Nie jest jasne, czy polisemia to „historyczny przypadek”, niedogodność, której idealne (sztuczne?) języki powinny unikać, czy też może ona odgrywać jakąś istotną rolę w naszych procesach przetwarzania języka, myślenia bądź organizacji wiedzy (tu autorzy nawiązują do badań George’a Lakoffa nad metaforą [Lakoff, Johnson 1980]). Podsumowując uzyskane rezultaty, podkreślają, że wszystkie zbadane relacje semantyczne są **bezskałowe**, co jest typowe dla **sieci samoorganizujących się** oraz że dołączenie polisemii do pozostałych relacji powoduje drastyczną reorganizację sieci, przekształcając ją w sieć małych światów, w której znaczenia są sobie bliższe niż w hierarchicznym drzewie, a najaktywniejsze w sensie pośrednictwa stają się polisemiczne kliki, odpowiadające formom najbardziej wieloznacznym (a więc o najwyższej frekwencji [Zipf 1945]). Sigman i Cecchi uważają, że ich wyniki wspierają tezę, iż **polisemia jest kluczowa** dla myślenia metaforycznego, obrazowości języka i uogólniania, oraz pomagają zrozumieć jej powszechność w językach etnicznych. Sugerują też, że ich ustalenia mogą być przydatne także w kontekście badań psycholingwistycznych, w szczególności dotyczących mentalnych reprezentacji znaczenia i nawigacji po nich. Badacze cytują tu pewne badania dotyczące zjawiska torowania, w tym także torowania podprogowego, jak też mechanizmów wyszukiwania leksykalnego, które wydają się być zgodne z tezą, że polisemia (albo nawet jej rozszerzenie z relacji posiadania identycznej formy do posiadania bardzo podobnej formy) pozwala niezwykle efektywnie zorganizować zbiór znaczeń, tak że pomimo ogromnej ich liczby i przy stosunkowo małej ilości połączeń między nimi bardzo łatwo jest po tym zbiorze nawigować (na dotarcie do dowolnego znaczenia wystarcza kilka kroków). Jakakolwiek byłaby neuronowa implementacja takiej struktury, jej organizacja w formie małych światów byłaby w najwyższym stopniu funkcjonalna, umożliwiając szybkie przeszukiwanie zasobów leksykalnych czy pojęciowych. Dodajmy, że do bardzo podobnych wyników i wniosków dochodzili też inni badacze, na przykład Adilson E. Motter

et al. [2002], analizując sieć językową utworzoną na podstawie tezauryusa, również wykazali jej bezskalowość oraz strukturę małych światów, a także zwrócili uwagę na ważną rolę pełnioną w niej przez homonimy, dzięki którym tworzą się w tej sieci „drogi na skróty”.

Co do **częstości** występowania **wyrażeń wieloznacznych**, możemy też przytoczyć wyliczenia Bruce’a K. Brittona [1978]: z 257 słów z losowo wybranych stron słownika angielskiego, 44% miało więcej niż jedno znaczenie – większość dwa lub trzy, ale znalazły się też słowa o 22, a nawet o 30 znaczeniach. Z kolei według analizy stu słów angielskich o najwyższej frekwencji użycia (które łącznie stanowią 47% słownictwa z tekstów angielskich), liczba ich znaczeń wynosi od 1 do 31 (z medianą równą 7), przy czym 93% słów z tej listy ma więcej niż jedno znaczenie. Bardziej konserwatywne szacunki dla tych samych stu najczęstszych słów, po odrzuceniu bardzo rzadko używanych znaczeń i znaczeń idiomatycznych oraz „sklejeniu” podobnych znaczeń, wykazały, że mają one od 1 do 9 znaczeń (z medianą równą 3), a więcej niż jedno znaczenie ma 85% tych słów. Obie metody estymacji prowadzą do wniosku, że ponad 40% słów z tekstów angielskich ma więcej niż jedno znaczenie. Oczywiście dla różnych języków dane ilościowe nie muszą być jednakowe, na przykład porównując homonimie w języku angielskim i arabskim [Ameer, Altaie 2010], autorzy stwierdzają, że podczas gdy w angielskim liczba znaczeń homonimu jest ograniczona do kilku, to w arabskim mogą to być dziesiątki znaczeń.

Dla języka polskiego ciekawe dane na ten temat podają Marek Świżdziński *et al.* [2002], którzy opracowali statystykę obserwacyjną homonimii i synkretyzmów w słowniku i tekście polskim. Wyniki uzyskane zostały metodą automatycznego przetwarzania dużych korpusów tekstu polskiego. Przykładowo, w podzbiorze Korpusu Języka Polskiego PWN, liczącym ponad 2 mln słów, znaleziono prawie 45% form mających więcej niż jedną interpretację, z czego niecała jedna trzecia to formy należące do różnych leksemów, czyli „prawdziwe” formy homonimiczne; pozostałe dwie trzecie zaś, czyli większość z nich, to formy synkretyczne (należące do jednego leksemu). Z kolei słownik analizatora morfologicznego AMOR, zawierający prawie 1,4 mln słów, wykazuje prawie połowę z nich jako formy o co najmniej dwóch interpretacjach, ale tylko niewiele ponad jedną setną jako formy homonimiczne (nie-synkretyczne). Natomiast według *Słownika frekwencyjnego polszczy-*

znej współczesnej, liczącego pół miliona słów, aż 58% form jest wieloznacznych. Oczywiście, jak podkreślają autorzy [Świdziński *et al.* 2002, s. 195], oszacowanie „stopnia homonimiczności” danego języka zależy od przyjętej teorii, czyli od stosowanego opisu. Na przykład, im więcej postuluje się leksemów, albo też kategorii fleksyjnych lub ich wartości, tym więcej otrzymuje się homonimów i synkretyzmów.

Prawdopodobnie **wyrażeń monosemicznych** (o jednym tylko znaczeniu) jest rzeczywiście stosunkowo mało. Jak twierdzi William Croft [2002, s. 105], można je znaleźć głównie w specjalistycznej terminologii technicznej: „Monosemy is probably most clearly found in specialized vocabulary dealing with technical topics”. Niektórzy lingwiści są nawet zdania, że wszystkie wyrażenia są polisemiczne, przy czym lista ich znaczeń nie kończy się bynajmniej na tych standardowo wymienianych w słownikach, lecz może obejmować potencjalnie nieograniczoną ich liczbę, gdyż wyrażeniom można *ad hoc* nadawać przeróżne sensy, zrozumiałe w konkretnym kontekście i użyciu; dyskusję różnych stanowisk w tej kwestii znajdziemy na przykład we wstępie do wspomnianej już monografii [Murphy 2003].

Dysproporcje między skalą występowania synonimii i homonimii można też tłumaczyć, odwołując się do wymogów **kognitywnej i komunikatywnej efektywności**, jakie powinien spełniać język. W szczególności celem użytkowników języka jest przekazanie informacji w sposób możliwie precyzyjny, a zarazem ekonomiczny. William Croft, pisząc o paradygmatycznym izomorfizmie jako odpowiedniości między formami językowymi a znaczeniami, stwierdza, że jest on uwarunkowany właśnie wymogami **ekonomiczności i ikoniczności** języka. Jego zdaniem synonimia nie jest umotywowana ani ikonicznie (nie realizuje wzajemnie jednoznacznego odwzorowania wyrażen językowych na znaczenia), ani ekonomicznie (wprowadza nadmiarowe, zbędne w komunikacji środki) – stąd rzadkość synonimii całkowitej: „And in fact true synonyms are extremely rare, if they exist at all: there is almost always some subtle difference in denotation, connotation, stylistic register, dialect, etc. that distinguishes two words” [Croft 2002, s. 105]. Z kolei monosemia, choć jest umotywowana ikonicznie, to jednak nie ekonomicznie, gdyż wymagałaby zbyt dużej liczby różnych słów dla wyrażenia różnorodnych odrębnych znaczeń – a więc też nie jest powszechna (por. cytaty z monografii Crofta w poprzednim akapicie). Od-

wrotnie jest w przypadku homonimii: jest umotywowana ekonomicznie (jedna forma wyraża wiele znaczeń), ale nie ikonicznie, gdyż są to odrębne, niepowiązane ze sobą znaczenia. Zapewne właśnie ze względów ekonomicznych homonimia jest dość częsta, zwłaszcza wśród słów o najwyższej frekwencji. Jednakże najpowszechniejsza jest polisemia, umotywowana ekonomicznie w tym samym stopniu jak homonimia, lecz bardziej od niej umotywowana ikonicznie ze względu na związki między poszczególnymi znaczeniami danej formy. Croft tłumaczy tę różnicę tak, że w przypadku homonimii mamy odwzorowanie jednej formy w odrębne punkty w przestrzeni pojęciowej, a w przypadku polisemii – w jeden spójny obszar owej przestrzeni (czyli ikoniczna odpowiedniość zachodzi tu między pojedynczą formą a pojedynczą wiązką znaczeń) [Croft 2002, s. 102, 105-106].

*

Tak więc w językach etnicznych dość trudno jest znaleźć przykłady absolutnych synonimów, homonimy natomiast są dość powszechne. Ta **asymetria między rzadką synonimią a częstą homonimią** jest o tyle zagadkowa, że synonimia zasadniczo nie powinna zakłócać naszej komunikacji, podczas gdy homonimia faktycznie może prowadzić do niezrozumienia komunikatu lub jego błędnej interpretacji. Dlatego można by się spodziewać, że języki naturalne będą raczej tolerować synonimy, a nie będą akceptować homonimów. Zauważmy, że z taką właśnie sytuacją mamy do czynienia w językach programowania. Generalnie komputery nie mają problemu z przetwarzaniem synonimów (por. na przykład użycie aliasów jako alternatywnych nazw danych czy adresów), natomiast nie akceptują homonimów. Dzięki temu komputery są stworzone jako perfekcyjni i precyzyjni odbiorcy przekazywanych im instrukcji. Czy w takim razie ludzie są ukształtowani przez ewolucję na idealnych nadawców komunikatów?

Do takiej właśnie konkluzji doszedł James Hurford, wybitny lingwista ewolucyjny. Już w swoim pierwszym modelu [Hurford 1989], omówionym bardziej szczegółowo w podrozdziale 1.5 (s. 53), w którym badał wyłanianie się znaków saussure'owskich, zauważył, że w przypadku stosowania gwarantującej to strategii nie tworzą się synonimy, natomiast mogą pojawiać się homonimy. Obserwację tę poddał dokładniejszej analizie, przeprowadzając symulacje innego swojego modelu

[Hurford 2003b]. Realizował on pewnego rodzaju algorytm genetyczny oparty na modelu iterowanego uczenia się. Była to więc ewolucyjna wersja tego typu modelu, w której kolejne pokolenia agentów nie tylko uczyły się języka poprzedniej generacji, ale też podlegały selekcji ze względu na różnie zdefiniowany *fitness*. Agenty miały przy tym wrodzone predyspozycje do odrzucania bądź akceptowania synonimów lub homonimów, innymi słowy, genotyp każdego agenta determinował to, w jaki sposób uczył się on języka poprzedniej generacji.

System startował z losowo wybranego zestawu znaków, to jest par (znaczenie, forma), w którym mogły wystąpić i synonimy, i homonimy. Początkowa populacja obejmowała trzy równoliczne grupy o różnych genotypach: agentów, które odrzucały synonimy, agentów, które odrzucały homonimy, oraz agentów, które akceptowały i synonimy, i homonimy. Agenty uczyły się języka z podanego im zestawu znaków, przy czym napotykając w nim synonimy lub homonimy, zależnie od swoich wrodzonych predyspozycji, przyswajały tylko jeden z odpowiednich znaków albo wszystkie. Następnie agenty o największych wartościach *fitness* rozmnażały się, przekazując potomstwu swoje wrodzone predyspozycje oraz wyuczony zestaw znaków. Kolejne pokolenia miały zawsze tyle samo osobników i uczyły się języka z całkowitej puli znaków odziedziczonej po poprzedniej generacji. System ewoluował tak długo, aż w populacji pozostawał tylko jeden genotyp, eliminując dwa pozostałe.

Fitness agenta wyznaczany był zależnie od jego sukcesów: albo komunikacyjnych (jako nadawcy), albo interpretacyjnych (jako odbiorcy). Dokładniej mówiąc, było to średnie prawdopodobieństwo, że agent jako mówca byłby poprawnie zrozumiany przez pozostałe agenty – albo że jako słuchacz poprawnie rozumiałby wszystkie inne. Symulacje wykazały, że kiedy *fitness* zależy od sukcesu komunikacyjnego, to selekcja faworyzuje osobniki, które odrzucają synonimy, a tolerują homonimy. Odpowiednio też wyłaniają się wówczas języki, w których synonimia jest rzadka, a homonimia dość powszechna – tak jak w językach naturalnych. Natomiast gdy *fitness* jest sprzężony z sukcesem interpretacyjnym, to powstaje sytuacja odwrotna, to znaczy populacja jest zdominowana przez osobniki, które odrzucają homonimy, akceptując z kolei synonimy (i ich język zawiera oczywiście liczne synonimy, a mało homonimów – inaczej niż języki naturalne). Stąd właśnie konkluzja

Hurforda: wygląda na to, że raczej jesteśmy lepszymi **nadawcami** komunikatów niż ich odbiorcami – odwrotnie niż komputery. „Humans evolved to be well adapted as senders of messages; accurate reception of messages was less important in our prehistory. We may be primarily speakers, and secondarily listeners” [Hurford 2003b, s. 450].

W ciągle trwającej debacie na temat pochodzenia języka, a zwłaszcza jego **wartości adaptacyjnej**, podlegającej selekcji naturalnej, wyniki Hurforda umacniają więc argumentację za tym, że to jednak nadawcy komunikatów osiągalni większe korzyści niż ich odbiorcy. Zwolennicy często spotykanego odwrotnego stanowiska (to przecież słuchacz może spożytkować uzyskane w ten „darmowy” sposób informacje) mają zawsze problem z wyjaśnieniem, dlaczego właściwie ktośkolwiek miałby się dzielić z innymi swoją wiedzą, skoro jej zdobycie, a nawet sam akt mówienia, pociągają za sobą pewne koszty (zabierają czas, energię, mogą nawet narażać na jakieś niebezpieczeństwa). Gdyby transfer informacji do innych osobników nie przynosił żadnego zysku nadawcy, to jak się wydaje, bardziej faworyzowane powinny być osobniki egoistyczne, które raczej słuchały, niż mówiły. Czy jednak wówczas język miałby w ogóle szansę się rozwinąć? Najwyraźniej mówienie także musiało być opłacalne: być może powodowało wzrost atrakcyjności lub statusu mówiącego (na zasadzie handicapu, analogicznie jak pawi ogon), albo też umożliwiało manipulowanie innymi osobnikami lub ułatwiało zawiązywanie sojuszy. Tak czy inaczej, wyniki eksperymentu Hurforda najwyraźniej także wspierają tezę o uzyskiwaniu jakichś profitów przez mówców, skoro to właśnie sukces komunikacyjny, a nie interpretacyjny, powinien determinować *fitness* osobników, aby wyłaniający się język miał strukturę (w zakresie synonimii i homonimii) analogiczną do znanych nam języków naturalnych.

Możemy więc chyba przyjąć, że omawiana tu asymetria między rzadką synonimią i częstą homonimią jest ważną dystynktywną, można by nawet rzec rodzajową, cechą języków naturalnych, odróżniającą je od innych, na przykład od języków programowania. Wobec tego należą ją przyjąć za jedno z kryteriów poprawności i adekwatności komputerowych modeli powstania i rozwoju języka. Jak się okazuje, autorski model gry językowej, który przedstawiony jest w kolejnym podrozdziale, zdaje ten właśnie test. Oznacza to między innymi, że problem asymetrii między homonimią a synonimią może być objaśniony w ramach dość

prostego modelu gry w nazywanie, czyli układu samoorganizującego się, a przede wszystkim bez konieczności odwoływania się do złożonych argumentów ewolucyjnych, jak w przypadku modelu Hurforda. W kolejnych podrozdziałach zaprezentowane zostały kolejno: definicja modelu, wyniki jego symulacji, ujęcie kwestii synonimii i homonimii w tymże modelu, a następnie wpływ szumu na wyłaniający się język. Dla porównania, w końcowej części tego rozdziału omówiono jeszcze kilka innych modeli, w których także odnoszono się do omawianego tu problemu.

4.2. Charakterystyka modelu

Jak już uprzednio zostało objaśnione (s. 119), w większości wariantów gry w nazywanie zakłada się, że wszystkie generowane nazwy są nowe i odmienne od pozostałych, a więc nie ma możliwości przypadkowego pojawienia się form homonimicznych. Ponadto symulacje są na ogół przeprowadzane dla modeli jednoobiettowych, to znaczy w toku swoich dwustronnych interakcji agenty starają się uzgodnić wspólną nazwę dla jednego tylko znaczenia. Założenie to nie ogranicza ogólności rozważań i nie zmienia jakościowo dynamiki owego uzgadniania, gdyż przy standardowych postulatach przyjmowanych dla gry w nazywanie procesy negocjowania wspólnej formy przebiegają niezależnie dla poszczególnych znaczeń. Natomiast niewątpliwą korzyścią płynącą z tego założenia jest znaczne przyspieszenie przebiegu symulacji. Z drugiej jednak strony takie założenie wyklucza rzecz jasna homonimię. Dlatego też, skoro celem jest badanie dynamiki wyłaniania się homonimii i synonimii w grze w nazywanie, odpowiedni model musi być jednak wieloobiettowy. Z kolei dla uniknięcia nadmiernej złożoności obliczeniowej można wówczas ograniczyć liczebność populacji agentów, nawet do dwóch tylko osobników. I takie właśnie warunki zostały przyjęte w prezentowanym tu drugim autorskim modelu [por. też Lipowski, Lipowska 2009b].

Jak zawsze zakładamy, że agenty (w tym wypadku dwa) znajdują się we wspólnym środowisku, składającym się z n obiektów. Każdy z agentów dysponuje słownikiem, który zawiera dla każdego znaczenia (obiekту) listę odpowiadających mu form językowych (nazw). Agenty

na zmianę pełnią role mówcy i słuchacza. Mówca wybiera losowo jeden z obiektów, następnie ze swojego leksykonu wybiera jego nazwę i komunikuje ją słuchaczowi, który z kolei stara się odgadnąć jej znaczenie na podstawie własnego słownika. Następnie, w zależności od sukcesu lub porażki tego aktu komunikacji (jak zawsze przyjmujemy, że partnerzy mają możliwość weryfikacji tego wyniku, na przykład przez wskazanie odpowiedniego obiektu), agenty modyfikują swoje zasoby leksykalne – tak żeby zwiększyć prawdopodobieństwo sukcesu kolejnych aktów komunikacji – po czym zamieniają się rolami.

Dla celów uproszczenia implementacji modelu oraz przyspieszenia jego symulacji nazwy są w nim reprezentowane przez liczby całkowite z przedziału od 1 do r , choć bardziej naturalna ich reprezentacja jako ciągów liter oczywiście również byłaby możliwa. Parametr r możemy więc interpretować jako wielkość dostępnej „przestrzeni leksykalnej”, w sensie maksymalnej liczby potencjalnych słów, jakie mogą być wygenerowane przez agenty. Słownikowe listy nazw reprezentujących poszczególne znaczenia (a każdy z agentów ma ich oczywiście n , czyli tyle, ile jest obiektów w układzie) są określonej długości, a konkretnie każda może zawierać co najwyżej l elementów (jest to więc system z ograniczoną pamięcią). Każdej nazwie przypisana jest waga, będąca liczbą całkowitą, która odgrywa istotną rolę w stochastycznych procesach zarówno wyboru słowa z leksykonu przez mówcę, jak też interpretacji słowa przez słuchacza. Stosowana jest więc w tym modelu strategia nieminimalna (por. s. 98).

Symulacje modelu inicjowane były zawsze z losowej konfiguracji początkowej, w której każdy agent miał na wszystkich swoich listach słownikowych po jednej wybranej losowo nazwie o wadze jednostkowej. Alternatywnie można byłoby również startować z pustymi leksykonami, przyjmując zwykłą zasadę, że mówca nieznający żadnej nazwy dla obiektu, o którym chce mówić, generuje dla niego nowe słowo. Należy zaznaczyć, że przy generowaniu nazw nie stosuje się żadnego mechanizmu blokującego pojawienie się w układzie dwóch lub więcej identycznych form, a więc możliwe jest wystąpienie tego samego słowa na różnych listach. Jak już wspomniano, ze względów praktycznych użyto do symulacji minimalnej, bo dwuagentowej populacji, w związku z czym po każdej próbie komunikacji następuje zamiana ról agentów – mówca zostaje słuchaczem, a słuchacz mówcą. Oczywiście ten sam

model można zastosować dla dowolnej populacji N agentów ($N > 2$); w takim wypadku standardowo para mówca-słuchacz jest do każdej interakcji wybierana losowo. A oto szczegółowe reguły działania modelu, determinujące przebieg interakcji agentów.

1. Mówca produkuje komunikat:

- (a) wybiera losowo jeden spośród n obiektów – powiedzmy m -ty – jako znaczenie swojego komunikatu,
- (b) ze swojej m -tej listy słownikowej (listy znanych mu nazw tegoż obiektu) wybiera losowo jedną formę f^M , przy czym wybór ten zależny jest od wag przypisanych poszczególnym formom (ściśle mówiąc, stosuje się tu metodę losowania ruletkowego, w którym prawdopodobieństwo wyboru jest proporcjonalne do wagi [Lipowski, Lipowska 2012]),
- (c) przekazuje formę f^M słuchaczowi.

2. Słuchacz interpretuje komunikat:

- (a) dla każdej ze swoich n list słownikowych oblicza miarę jej podobieństwa P do formy f^M . Dla j -tej listy, zawierającej l_j elementów, miara ta obliczana jest według następującego wzoru:

$$P_j(f^M) = \sum_{i=1}^{l_j} \frac{w_i}{\varepsilon + |f_i - f^M|} \bigg/ \sum_{i=1}^{l_j} w_i, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

gdzie f_i to i -ta nazwa z tej listy, w_i to waga nazwy f_i , a sumowania przebiegają po wszystkich elementach j -tej listy;

- (b) traktując obliczone miary podobieństwa P_j jako wagi poszczególnych list ($j = 1, \dots, n$), słuchacz losuje ruletkowo jedną z nich – powiedzmy o numerze s – wybierając tym samym obiekt, któremu ta lista odpowiada (generalnie im większy stopień podobieństwa listy do formy f^M , tym większa szansa jej wyboru).

3. Weryfikowany jest wynik interakcji:

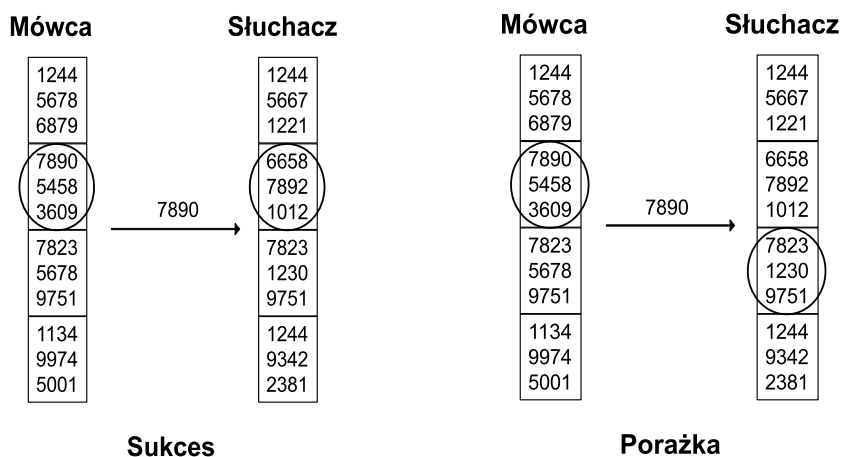
- sukces komunikacyjny następuje wówczas, gdy $s = m$, to znaczy słuchacz wybiera listę słownikową o tym samym numerze co mówca, czyli inaczej mówiąc, poprawnie odgaduje znaczenie przekazanej mu przez mówcę nazwy;
- w przeciwnym przypadku, to jest gdy $s \neq m$, akt komunikacji kończy się porażką.

4. Agenty modyfikują swoje leksykony:

- w przypadku sukcesu ($s = m$):
 - (a) mówca zwiększa wagę użytego słowa f^M o 1 (na liście m),
 - (b) słuchacz, o ile słowo f^M znajduje się na wybranej przez niego liście s , to również zwiększa jego wagę o 1, zaś w przeciwnym przypadku dodaje to słowo do listy s z wagą jednostkową; o ile jednak owa lista została już uprzednio zapełniona (to znaczy ma już l elementów), to agent najpierw usuwa z niej słowo o najmniejszej wadze;
- w przypadku porażki ($s \neq m$):
 - (a) mówca zmniejsza wagę użytego słowa f^M o 1 (na liście m),
 - (b) słuchacz, o ile słowo f^M znajduje się na jego liście o numerze m (czyli odpowiadającej znaczeniu wybranemu przez mówcę), to zwiększa jego wagę o 1, zaś w przeciwnym przypadku dodaje to słowo do listy m z wagą jednostkową; o ile jednak owa lista została już uprzednio zapełniona (to znaczy ma już l elementów), to agent najpierw usuwa z niej słowo o najmniejszej wadze.

Rysunek 4.1 przedstawia schematycznie przykładową próbę komunikacji w układzie o czterech obiektach ($n = 4$) – stąd oba agenty mają w swoich leksykonach po cztery odpowiadające tym znaczeniom listy (umieszczone na diagramie w kolejnych, rozmieszczonych wertykalnie przegródkach). Każda z list zawiera po trzy nazwy ($l = 3$), których

wagi zostały tu pominięte. Mówca wybiera jako znaczenie swojego komunikatu obiekt drugi ($m = 2$), a z odpowiadającej mu listy numer dwa wybiera nazwę $f^M = 7890$. Sukces komunikacyjny następuje, gdy słuchacz, porównując przekazaną mu nazwę z własnymi listami, również wybiera listę numer dwa ($s = 2$), czyli poprawnie dekoduje znaczenie nazwy (lewa strona diagramu). Ponieważ gra kończy się sukcesem, mówca zwiększy wagę użytego słowa, natomiast słuchacz dopisze je do swojej drugiej listy (najpierw jednak usuwając z niej inne słowo, gdyż lista jest już pełna). Natomiast gdy słuchacz wybiera inną listę (na przykład $s = 3$), gra kończy się porażką (prawa strona diagramu). W takim przypadku mówca zmniejszy wagę użytego słowa, a słuchacz dopisze je do swojej listy numer dwa (zaś gdyby ono już się tam znajdowało, to tylko zwiększyłby jego wagę). Jak widać, stosowana tu strategia nieminimalna to rodzaj strategii częstotliwościowej (por. s. 99).



Rys. 4.1. Gra w nazywanie w układzie o $n = 4$ i $l = 3$. Ilustracja sukcesu i porażki komunikacji w sytuacji, gdy mówca wybrał jako temat komunikatu obiekt numer dwa (szczegółowy opis w tekście głównym)

Należy jeszcze raz podkreślić, że zarówno wybór słowa przez mówcę, jak i jego interpretacja (wybór listy, a tym samym znaczenia) przez słuchacza nie są procesami deterministycznymi, lecz stochastycznymi. Zarazem ich przebieg nie jest absolutnie dowolny, lecz jest uwarunko-

wany wagami słów czy miarami podobieństwa list (im są one większe, tym większa szansa wyboru, gdyż wyznacza ją stosunek danej wagi do sumy wszystkich wag). Zmiany wag następujące w przypadku sukcesu lub porażki to system „nagród i kar”, odpowiadający tak zwanemu nauczaniu ze wzmacnianiem (ang. *reinforcement learning*). Jak zwykle działać tu będzie dodatnie sprzężenie zwrotne: sukces powoduje wzrost wagi słowa, dzięki czemu będzie ono częściej używane, co przyniesie dalszy wzrost jego wagi. Porażki tylko częściowo hamują ten wzrost popularności słowa, gdyż spadek wagi następuje w tym przypadku tylko u jednego partnera, a mianowicie u mówcy. Początkowo wszystkie słowa mają podobne szanse, żadne z nich nie jest w jakiś sposób preferowane względem innych (tworzą układ symetryczny), ale kiedy któreś z nich przypadkowo zdobędzie niewielką przewagę (nastąpi tak zwane spontaniczne złamanie symetrii), to prawdopodobnie będzie ją dalej zwiększać i ma szansę ostatecznie „zmonopolizować” układ, czyli zostać jedynym słowem używanym przez agenty jako nazwa danego obiektu. Taki proces prowadzi więc do wyłonienia się wspólnego języka.

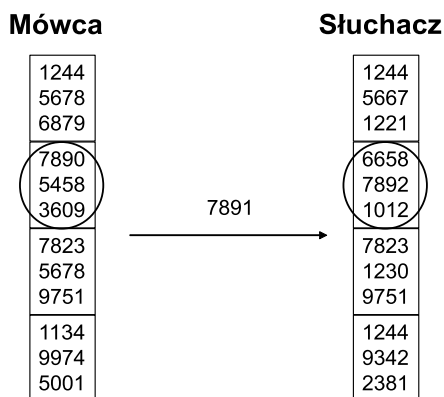
Rolę wag dla poszczególnych list słownikowych, spośród których słuchacz musi wybrać jedną, odpowiadającą (jego zdaniem) znaczeniu, które próbuje mu przekazać mówca, pełnią, jak już wspomniano, miary podobieństwa tych list do użytej w akcie komunikacji formy f^M . Wzór na owo podobieństwo (s. 192) można nieco inaczej zapisać w następujący sposób:

$$P_j(f^M) = \sum_{i=1}^{l_j} \frac{w_i/W}{\varepsilon + |f_i - f^M|}, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

gdzie $W = \sum_{i=1}^{l_j} w_i$.

Jak widać, miara podobieństwa listy do formy f^M jest sumą stopni podobieństwa każdej z nazw z danej listy do tej formy. Dla nazwy f_i ten stopień będzie tym większy, im bliższe sobie są wartości f^M i f_i (determinuje to moduł z ich różnicy w mianowniku ułamka), ale jest on także zależny od wagi formy f_i , a dokładniej mówiąc, jest tym większy, im większy jest stosunek tej wagi do sumy wszystkich wag nazw z tej listy (wagi normowane przez tę sumę występują w liczniku). Inaczej mówiąc, im jakieś słowo mniej się różni od użytego przez

mówcę oraz im większa jest jego waga w stosunku do wag pozostałych nazw dla tego samego znaczenia, tym większy przyczynek daje do miary podobieństwa całej listy. Rolą parametru ε z mianownika sumowanych ułamków jest zapewnienie ich skończoności w przypadku, gdy $f_i = f^M$, czyli gdy zakomunikowane słowo należy do danej listy. Oczywiście parametr ten przyjmuje zawsze bardzo małe wartości, na przykład z zakresu $10^{-5} \leq \varepsilon \leq 10^{-1}$. Przy tak małym ε lista, na której jest forma identyczna z użytą przez mówcę lub też niewiele się od niej różniąca, będzie miała bardzo dużą miarę podobieństwa, a co za tym idzie, bardzo duże szanse (graniczące z pewnością) na jej wybór przez słuchacza. Nie jest jednak tak, że aby lista została wybrana, musi koniecznie zawierać nazwę identyczną lub bardzo zbliżoną do zakomunikowanej słuchaczowi; ze względu na losowy charakter tej procedury może się przecież zdarzyć, że lista z dokładnie tą samą nazwą nie zostanie wybrana (choć prawdopodobieństwo tego jest niewielkie).



Sukces w obecności szumu

Rys. 4.2. Gra w nazywanie z towarzyszącym szumem w układzie o $n = 4$ i $l = 3$. Ilustracja sukcesu komunikacji w sytuacji, gdy mówca wybrał jako temat komunikatu obiekt numer dwa (szczegółowy opis w tekście głównym)

Jak już sygnalizowano, model przewidziany był do celów badania nie tylko struktury języka wyłaniającego się w wieloobektowej grze w nazywanie, ale także wpływu szumu na sam ten proces i jego końcowy rezultat. Wobec tego część symulacji przeprowadzona została z ta-

kim właśnie dodatkowym efektem zaburzenia komunikacji. Wprowadzony szum powoduje losowe zniekształcenie komunikowanego słowa. Szum występuje z prawdopodobieństwem p , wpływając na zmianę wartości wybranej przez mówcę formy f w taki sposób, że słuchaczowi przekazywana jest zamiast niej forma $f^M = f + \eta$, gdzie η jest losową liczbą całkowitą z przedziału $\langle -a, a \rangle$; jeżeli jednak ta nowa nazwa f^M nie mieści się w dostępnej przestrzeni leksykalnej (nie należy do przedziału $\langle 1, r \rangle$), to losowana jest inna wartość zaburzenia η . Natomiast z prawdopodobieństwem $1 - p$ słuchacz „słyszy” nazwę identyczną z tą wybraną przez mówcę ($f^M = f$). Rysunek 4.2 przedstawia schematycznie akt komunikacji w obecności szumu, który wprowadza zaburzenie $\eta = 1$. Przebieg tej interakcji jest prawie identyczny z opisanym na stronie 193 (a zilustrowanym na rys. 4.1). Jedyna różnica polega na tym, że zamiast wybranego przez mówcę słowa 7890 do słuchacza dociera jego zaszumiona wersja 7891, co jak widać, nie przeszkadza mu w tym przypadku w poprawnej interpretacji tego komunikatu.

4.3. Obliczenia numeryczne

Jak pokazały symulacje [Lipowski, Lipowska 2009b], również i ten model jest stabilny i odporny na pewne modyfikacje. Inaczej mówiąc, niewielkie zmiany wartości parametrów, czy też drobne zmiany reguł działania, nie zmieniają zasadniczo dynamiki systemu. Przykładowo, jakościowo takie same wyniki uzyskuje się zarówno w przypadku, gdy przyrosty wag mają stałą wartość, jak też gdy są zmienne odwrotnie proporcjonalnie do wartości wagi (to znaczy, im większa jest waga, tym mniejszym wahaniom podlega). Ogólnie rzecz biorąc, rezultaty symulacji dowodzą, że agenty korelują swoje leksykony i dzięki wyłonionemu w ten sposób wspólnemu językowi osiągają pełny sukces komunikacyjny.

W tabeli 4.1 zebrane zostały podstawowe parametry występujące w modelu. Oprócz skrótowego opisu ich znaczenia zostały tu także podane zakresy ich zmienności zastosowane w symulacjach modelu. Dla dokładniejszego zbadania zachowania modelu w trakcie eksperymentów mierzone były różne wielkości, uśredniane następnie w kolejnych przedziałach czasowych (dając w wyniku tak zwaną średnią kroczącą),

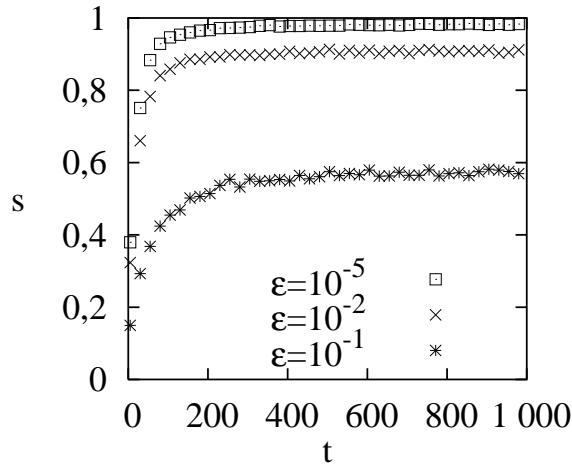
a także względem liczby niezależnych przebiegów symulacji. Jednostka czasu została tu zdefiniowana jako $2n$ aktów komunikacji, gdzie n to liczba obiektów w układzie, a zatem jest to taki okres czasu, w którym, średnio rzecz biorąc, każdy z dwóch agentów może się raz „wypowiedzieć” o każdym z obiektów.

Tab. 4.1. Parametry modelu wieloobektowego i zakresy ich wartości zastosowanych w symulacjach

Parametr	Opis	Wartości
n	liczba obiektów	$100 \leq n \leq 1000$
l	maksymalna liczba słów dla obiektu	$5 \leq l \leq 20$
r	zakres liczbowy dla słów	$500 \leq r \leq 10\,000$
ε	zapewnia skończoność miary podobieństwa	$10^{-5} \leq \varepsilon \leq 10^{-1}$
p	prawdopodobieństwo szumu	$0 \leq p \leq 0,05$
a	amplituda szumu	$0 \leq a \leq 10$

Podstawowym wskaźnikiem mierzonym w tego typu symulacjach jest zawsze średni sukces komunikacyjny, czyli stosunek liczby uzyskanych sukcesów do całkowitej liczby prób komunikacji. Rysunek 4.3 przedstawia, jak zmienia się sukces komunikacyjny w okresie czasu $t = 1000$, wyznaczony dla układów o $n = 500$, $l = 10$ i $r = 1000$ (por. tab. 4.1) dla trzech wartości parametru $\varepsilon = 10^{-1}$, 10^{-2} i 10^{-5} . Jak widać, wartości sukcesu po krótkim okresie szybkiego wzrostu (do około $t = 300$) stabilizują się już na maksymalnym poziomie, który zależy od wartości parametru ε . Przy jego maksymalnej wartości (0,1) najwyraźniej nie następuje pełna synchronizacja leksykonów agentów, gdyż poziom sukcesu pozostaje niewysoki (rzędu 60%). Po zmniejszeniu wartości parametru ε o jeden rząd wielkości (do 0,01) widać wyraźną poprawę jakości komunikacji (sukces na poziomie 90%), i wreszcie

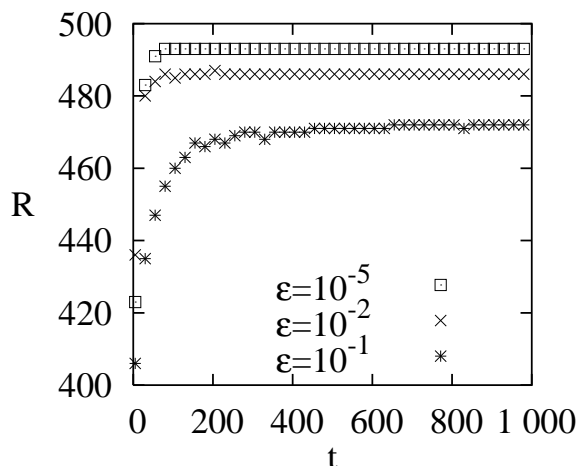
dla minimalnej wartości $\varepsilon = 0,00001$ układ osiąga maksymalny poziom sukcesu komunikacyjnego (100%) – a zatem agenty posługują się wspólnym językiem. Wielkość parametru ε wpływa na jakość pomiaru podobieństwa wybranego słowa do słów z danej ich listy: im jest mniejsza, tym porównanie słów jest dokładniejsze i pomiar daje rzetelniejsze wyniki, co jak widać, wpływa w istotny sposób na procesy komunikacji.



Rys. 4.3. Sukces komunikacyjny s w funkcji czasu t wyznaczony dla układów o $n = 500$, $l = 10$ i $r = 1000$ dla trzech wartości parametru $\varepsilon = 10^{-1}$, 10^{-2} i 10^{-5} [diagram za: Lipowski, Lipowska 2009b]

W celu dokładniejszej analizy przebiegu procesów komunikacji oraz struktury wyłaniającego się języka w symulacjach zmierzone zostały jeszcze inne wielkości. Przede wszystkim należy zwrócić uwagę na słowa o największych wagach na poszczególnych listach. Ponieważ możliwe jest wystąpienie takich samych form na różnych listach słownikowych, w trakcie symulowania modelu kontrolowana była liczba R różnych najcięższych słów, czyli tych o najwyższych wagach. Jak widać z rys. 4.4, w ewoluującym układzie liczba R dąży generalnie do liczby obiektów n , przy czym tempo wzrostu tej wielkości i jej maksymalna wartość znów zależą od parametru ε . Porównując te wyniki z rys. 4.3 (dla obu tych diagramów symulowane układy mają identyczne wartości poszczegól-

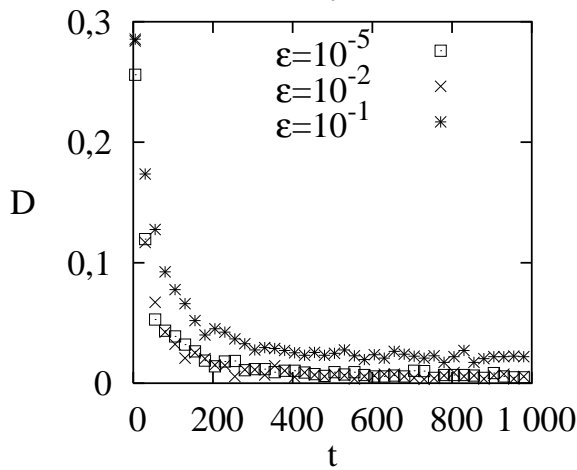
nych parametrów), widać, że w przypadku zbyt dużego ε komunikacja mocno się pogarsza w stosunku do przypadków z mniejszym ε ; niższy odsetek sukcesów idzie wtedy w parze z mniejszą liczbą różnych najcięższych słów.



Rys. 4.4. Liczba różnych słów o najwyższych wagach R w funkcji czasu t wyznaczona dla układów o $n = 500$, $l = 10$ i $r = 1000$ dla trzech wartości parametru $\varepsilon = 10^{-1}$, 10^{-2} i 10^{-5} [diagram za: Lipowski, Lipowska 2009b]

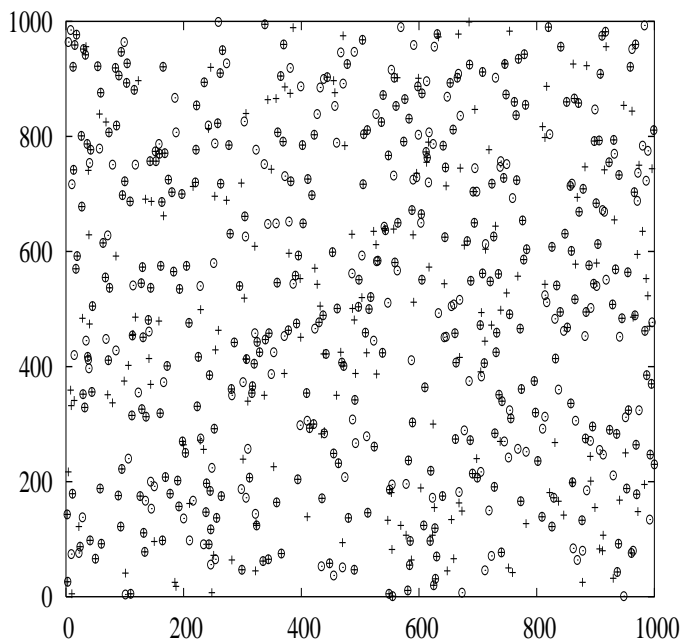
Dodatkowo sprawdzony został stopień wykorzystania w komunikacji słów o największych wagach na poszczególnych listach w porównaniu z pozostałymi słowami o niższych wagach. Otrzymane wyniki ilustruje rys. 4.5. Wykres ten przedstawia odsetek tych aktów komunikacji, w których zostało wykorzystane słowo prawie najcięższe, czyli o drugiej co do wielkości wadze na danej liście (dla układów o parametrach identycznych jak na rys. 4.3 i 4.4). Jak widać, liczba tego rodzaju interakcji spada stopniowo do zera, przy czym znów dla mniejszych wartości parametru ε spadek ten jest szybszy i prowadzi do niższych wartości.

Okazuje się więc, że w większości aktów komunikacji wykorzystywane są jednak słowa o największej wadze na danej liście. W takim razie, być może poza fazą początkową ewolucji modelu, typowa interakcja agentów będzie zwykle wyglądała następująco. Po wyborze obiektu mówca komunikuje partnerowi najcięższe słowo z odpowiedniej



Rys. 4.5. Odsetek aktów komunikacji z użyciem słów o drugich co do wielkości wagach D w funkcji czasu t , wyznaczone dla układów o $n = 500$, $l = 10$ i $r = 1000$ dla trzech wartości parametru $\epsilon = 10^{-1}$, 10^{-2} i 10^{-5} [diagram za: Lipowski, Lipowska 2009b]

listy. Obliczona przez słuchacza miara podobieństwa (według wzoru ze s. 192) będzie duża tylko dla listy zawierającej dane słowo (o ile jego waga nie będzie znikoma – a to na dalszym etapie gry nie powinno już mieć miejsca – oraz przy dostatecznie małej wartości parametru ϵ). Zarazem na ogół będzie to też lista odpowiadająca obiektowi wybranemu przez mówcę, dzięki czemu interakcja zakończy się sukcesem. Należy tu jeszcze raz odnotować, że im mniejsze jest ϵ , tym miara P jest precyzyjniejszym wskaźnikiem podobieństwa listy do komunikowanego słowa, a więc tym większa jest wówczas szansa poprawnego wyboru listy, a tym samym odgadnięcia właściwego znaczenia tego słowa. Niemniej, ponieważ ϵ jest dodatnie, to również wszystkie obliczone przez słuchacza miary podobieństwa są dodatnie, w związku z czym teoretycznie słuchacz zawsze może dokonać błędnego wyboru listy, co pociąga za sobą porażkę komunikacji (a innym jeszcze czynnikiem, mogącym także prowadzić do porażki, jest homonimia, omówiona bardziej szczegółowo w następnym podrozdziale). Wpływ parametru ϵ na jakość komunikacji jest wyraźnie widoczny na diagramach 4.3–4.5. Dla większych wartości parametru ϵ spada poziom sukcesu w grze, a zarazem liczba różnych słów o największych wagach (wiążąca się z poziomem homo-



Rys. 4.6. Dystrybucja słów o największych wagach (oś pozioma) i słów o drugich co do wielkości wagach (oś pionowa) wyznaczona dla układu o $n = 500$, $l = 10$, $r = 1000$ oraz $\varepsilon = 10^{-5}$ po czasie symulacji $t = 1000$. Różne symbole (kółka i plusy) odpowiadają różnym agentom. Symbol o współrzędnych (x, y) na diagramie oznacza, że agent ma na jednej z list słownikowych słowo x (o największej wadze) oraz słowo y (o drugiej co do wielkości wadze). Dość częste jest nakładanie się symboli kółka i plusa, co oznacza, że oba agenty mają na niektórych listach identyczne pary słów „najcięższych” [diagram za: Lipowski, Lipowska 2009b]

nimii, por. podrozdział 4.4) oraz udział słów o największych wagach w komunikacji.

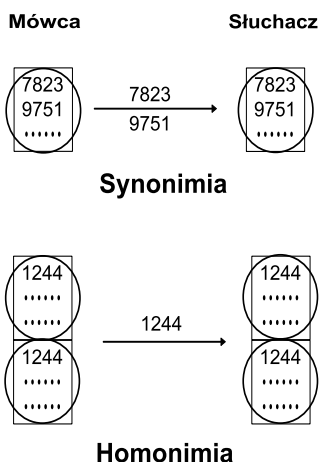
Rysunek 4.6 przedstawia dystrybucję par słów: nazw o największej wadze (wartości tych nazw odkładane są na osi poziomej) i nazw o drugiej co do wielkości wadze (odkładane na osi pionowej), zebranych ze wszystkich list słownikowych obu agentów; pary słów jednego z nich oznaczone są kółkami, a drugiego plusami. Innymi słowy, jeśli na diagramie znajduje się któryś z tych symboli w punkcie o współrzędnych (x, y) , oznacza to, że odpowiedni agent ma tę parę nazw na jednej ze

swoich list słownikowych, przy czym nazwa x ma na niej największą wagę, zaś nazwa y ma wagę drugą co do wielkości. Jak można zauważyć, dystrybucja tych słów jest dość jednorodna, czyli nie są one ze sobą skorelowane. Jest to zgodne z obserwacją, że formy synonimów zwykle nie są do siebie podobne. Ponadto na rys. 4.6 można też zobaczyć, że dość często dwa różne symbole (plus i kółko) nakładają się na siebie, co wskazuje, że oba agenty mają na niektórych swoich listach słownikowych identyczne pary „najcięższych” słów.

4.4. Synonimy i homonimy w modelu

W grach językowych z homonimią mamy do czynienia wtedy, gdy jedna nazwa odpowiada więcej niż jednemu obiektowi, a z synonimią, gdy jednemu obiektowi przypisana jest więcej niż jedna nazwa. Ponieważ reguły prezentowanego modelu działają w sposób stochastyczny, przyjęta tu definicja homonimii i synonimii została odpowiednio skorygowana, tak aby uwzględniać czynniki probabilistyczne. A zatem homonimem będzie słowo, które ze stosunkowo dużym prawdopodobieństwem może odnosić się do minimum dwóch obiektów. Z taką sytuacją mamy na pewno do czynienia wówczas, gdy pewna forma znajduje się na więcej niż jednej liście słownikowej agenta (a więc odpowiada różnym znaczeniom) jako słowo o największej wadze (a więc ma duże szanse, aby być wybranym przez agenta). Z kolei synonimami będą takie dwa słowa, które ze stosunkowo dużym prawdopodobieństwem mogą odnosić się do tego samego obiektu. Na pewno będzie tak w przypadku, gdy dwie różne formy będą należały do tej samej listy słownikowej (wówczas reprezentują to samo znaczenie) jako słowa o największej i drugiej co do wielkości wadze (przy czym owe wagi nie powinny się drastycznie różnić, tak aby obie te nazwy miały dość dużą szansę zostać wybrane przez agenta). Przykłady takich form synonimicznych i homonimicznych pokazane są na rys. 4.7. Zakłada się tu, że ewolucja układu doprowadziła już do synchronizacji leksykonów obu agentów i podane homonimy oraz synonimy należą do ich wspólnego języka wyłonionego w jej trakcie. Wówczas, bez względu na to, który z synonimów zostanie użyty w komunikacji przez jednego agenta, najprawdopodobniej zostanie poprawnie zrozumiany przez drugiego. Z kolei homonim może być

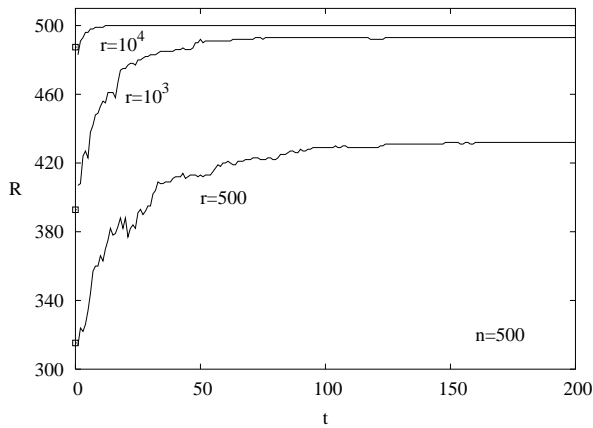
równie dobrze użyty przez mówcę jako nazwa każdego z dwóch obiektów i także dwojako zrozumiany przez słuchacza (w tym wypadku nie ma więc gwarancji sukcesu interakcji).



Rys. 4.7. Przykłady wystąpienia synonimii i homonimii. Dla większej przejrzystości diagramu podano tylko słowa o największych wagach, a w przypadku synonimii także drugich co do wielkości wagach. Pominięte są także wartości wag tych słów, ale zakłada się, że są one istotnie większe od pozostałych wag. W przypadku użycia zarówno nazwy 7823, jak i 9751 istnieje duże prawdopodobieństwo, że zostaną one zinterpretowane jako ten sam obiekt, są to więc synonimy. Z kolei słowo 1244 ma duże szanse zostać użyte i zinterpretowane jako nazwa dwóch różnych obiektów, jest to więc homonim

Skoro homonimia występuje, gdy różne listy słownikowe agenta zawierają identyczne formy, mające zarazem największe wagi na tych listach, to znaczy, że parametr R , będący sumaryczną liczbą odmiennych słów o największych wagach na wszystkich listach, jest miarą homonimii: im ta liczba R jest mniejsza, tym homonimia jest powszechniejsza. Wyniki pomiarów tej wielkości w trakcie ewolucji układu, przy różnych wartościach parametru r (reprezentującego wielkość dostępnej agentom „przestrzeni leksykalnej”, z której mogą czerpać słowa), pokazuje rys. 4.8. Jak widać, wskaźnik R rośnie z czasem, a zatem liczba homonimów stopniowo maleje. Im wyższa jest wartość parametru r , tym liczba różnych słów o największych wagach R bliższa jest liczbie obiektów n .

Dzieje się tak z oczywistych względów – im jest więcej słów do wyboru, tym mniejsze prawdopodobieństwo, że na dwóch listach znajdują się identyczne słowa o najwyższych wagach. Chociaż należy też pamiętać, że homonimia jest możliwa także w modelach o nieograniczonej przestrzeni leksykalnej, jak na przykład model Brigattiego i Roditiego [2009], co w naszym przypadku odpowiadałoby przedziałowi $\langle 1, r \rangle$ przy $r \rightarrow \infty$. W każdym razie dla dostatecznie dużych wartości parametru r (w stosunku do liczby obiektów) uzyskuje się język niemal bez homonimów.



Rys. 4.8. Liczba różnych słów o największych wagach R w funkcji czasu t wyznaczona dla układów o $n = 500$, $l = 10$ i $\varepsilon = 10^{-5}$ dla trzech wartości parametru $r = 500, 1000$ i $10\,000$. Trzy kwadraciki na osi pionowej reprezentują wartości obliczone probabilistycznie (objaśnienie w tekście). W ewoluującym układzie następuje redystrybucja słów o największych wagach, redukująca liczbę homonimów w języku. Liczba tych słów stabilizuje się jednak poniżej n , co oznacza, że homonimia jest stałą cechą języka [diagram za: Lipowski, Lipowska 2009b]

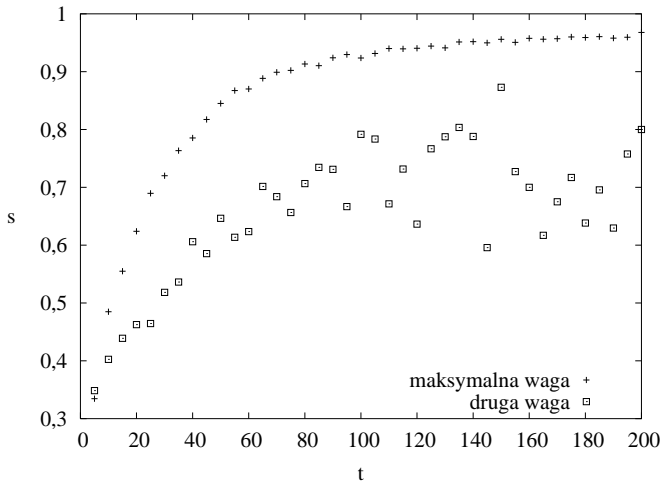
Mogłoby się wydawać, że liczbę różnych słów o największych wagach można wyznaczyć na podstawie elementarnych rozważań probabilistycznych. Należałoby wyliczyć, ile różnych wyników uzyskuje się przy losowaniu n liczb naturalnych z przedziału $\langle 1, r \rangle$. Zagadnienie to można sprowadzić do wyznaczenia średniej liczby niepustych urn przy losowym rozdeleniu n kul między r urn. Prawdopodobieństwo tego, że żadna kula nie trafi do danej urny, wynosi $[(r-1)/r]^n$, stąd szukana

średnia R_0 wynosi

$$R_0 = r \left[1 - \left(\frac{r-1}{r} \right)^n \right] \approx r (1 - e^{-n/r}).$$

Otrzymane wartości liczbowe (odpowiednio dla $r = 500, 1000$ i $10\,000$ oraz $n = 500$) zaznaczone są na rys. 4.8 jako kwadraciki na osi pionowej. Jak się okazuje, są one zgodne z wynikami pomiarów wskaźnika R , ale jedynie na początku symulacji. Dalsza ewolucja układu zmienia dystrybucję słów o największych wagach i liczba ich rośnie z czasem. Wielkości s i R , czyli poziom sukcesu komunikacyjnego i liczba różnych słów o największych wagach, zachowują się analogicznie (por. rys. 4.3 i 4.4), a więc wspomniana dystrybucja redukuje homonimie i usprawnia komunikację między agentami. Zarazem jednak, chociaż wskaźnik R dąży do wartości maksymalnej, jaką jest liczba obiektów w systemie, jego wartość stabilizuje się poniżej n . Oznacza to, że homonimia nie znika zupełnie i jest trwałą cechą wyłaniających się języków.

Jak pokazuje rys. 4.5, w niektórych interakcjach wykorzystywane są słowa o drugich co do wielkości wagach. Jeśli ich użycie zapewnia sukces komunikacji, oznacza to, że obiektowi, którego interakcja dotyczyła, można przypisać nie tylko nazwę o największej wadze z odpowiadającej mu listy słownikowej, ale także nazwę o drugiej z kolei wadze. Zgodnie z przyjętą definicją takie dwa słowa będą więc stanowiły synonimy. Potwierdzeniem istnienia w systemie takich synonimicznych par jest wykres z rys. 4.9, obrazujący odsetek sukcesów komunikacyjnych, jaki zapewnia użycie odpowiednio słów o największych wagach lub słów o drugich co do wielkości wagach. Średni sukces dla słów o największych wagach oczywiście szybko rośnie prawie do maksymalnej wartości, ale jak widać, słowa o drugich wagach także zapewniają stosunkowo dużą liczbę sukcesów (również rosnącą w początkowej fazie ewolucji systemu). Sukcesy te oznaczają, że do niektórych obiektów odnoszą się przynajmniej po dwie nazwy, które mogą być skutecznie stosowane przez agenty w ich komunikacji, a więc będące synonimami. Rysunek 4.5 pokazuje jednak również, że użycie słów o drugich co do wielkości wagach zanika z upływem czasu; jest to zresztą powodem narastających fluktuacji danych, odpowiadających na rys. 4.9 słowom o drugich wagach – fluktuacji będących właśnie konsekwencją statystyk, które pogarszają się w tym przypadku na skutek maleją-



Rys. 4.9. Średni sukces komunikacyjny s w funkcji czasu t (wyznaczony dla układu o $n = 500$, $l = 10$, $r = 1000$ i $\varepsilon = 10^{-1}$) otrzymany przy użyciu słów o największych (+) lub o drugich co do wielkości (□) wagach. Stosunkowo duży odsetek sukcesów uzyskanych przy użyciu słów o drugich wagach oznacza, że niektórym obiektom odpowiadają po dwie nazwy – uznawane wówczas za synonimy. Narastające z czasem fluktuacje danych dla słów o drugich wagach są konsekwencją pogarszających się statystyk, spowodowanych malejącą liczbą prób komunikacji przy użyciu tych słów – co zarazem oznacza, że synonimia z czasem zanika [diagram za: Lipowski, Lipowska 2009b]

cej z upływem czasu liczby wypowiedzi z użyciem słów drugich co do wielkości. W każdym razie fakt ten świadczy o tym, że rola synonimii z czasem maleje, a po dłuższym okresie czasu właściwie się kończy: słowa o wagach drugich co do wielkości stają się nieistotne, gdyż finalnie praktycznie cała komunikacja przebiega przy użyciu wyłącznie słów o największych wagach. Można by więc powiedzieć, że synonimia jest tylko przejściową własnością języka.

Istnienie synonimii ujawnia się także na rys. 4.6, gdzie w wielu punktach widoczne jest pokrywanie się symboli oznaczających pary słów z tej samej listy (odpowiednio o najwyższej i drugiej co do wielkości wadze) dla obu agentów. Nałożenie się plusa i kółka oznacza, że oba agenty mają na swoich listach jako dwa najcięższe słowa takie same pary nazw. Którakolwiek z tych nazw zostanie więc użyta

w komunikacji, z pewnością zapewni sukces interakcji, zatem należy te słowa uznać za synonimy. Zwróćmy jednak uwagę, że diagram 4.6 nie pokazuje wag poszczególnych słów, a jak potwierdziły analizy omawianego modelu, w trakcie ewolucji systemu wagi słów najcięższych na większości list (a po dostatecznie długich symulacjach prawdopodobnie na wszystkich listach) stają się tak dominujące w porównaniu z wagami pozostałych słów, że te ostatnie, w tym nawet te o drugich co do wielkości wagach, są już wówczas zupełnie nieistotne, gdyż praktycznie nigdy nie są wykorzystywane w komunikacji. Innymi słowy, synonimia z czasem zanika.

Podsumowując, można stwierdzić, że chociaż dokładniejsze ilościowe oszacowanie roli synonimii i homonimii w tym modelu zależy oczywiście od wartości jego poszczególnych parametrów, to jednak ewidentne jest, jak przedstawia się jakościowo jego zachowanie i jakie są jego podstawowe własności. Otóż homonimia, choć jest rzadka przy dużych wartościach parametru r , jest stałą cechą wyłaniającego się w modelu języka: po początkowym okresie ewolucji systemu, kiedy to jej poziom maleje, później wyraźnie się stabilizuje i częstotliwość jej wystąpienia już się raczej nie zmienia. Natomiast synonimia zdecydowanie zanika z upływem czasu. Jeśli spróbować odnieść omawiany model, a dokładniej mówiąc język, który się w nim wyłania po bardzo długim okresie ewolucji systemu, do języka naturalnego, to można odnotować podobieństwo ich własności strukturalnych dotyczących homonimii i synonimii, to znaczy: powszechność homonimii i rzadkość synonimii (zgodne z obserwacjami dla języków etnicznych, por. podrozdział 4.1). Jak już wspomniano (s. 189), J. Hurford sugerował, że rzadkość synonimii daje się wytłumaczyć asymetrią między korzyściami ewolucyjnymi osób mówiących i słuchających: nadawcy komunikatów najwyraźniej odnosili większe korzyści niż ich odbiorcy [Hurford 2003b]. Należy tu podkreślić, że prezentowany w tym rozdziale model nie ma ani charakteru ewolucyjnego (w sensie ewolucji biologicznej – nie wykorzystuje bowiem mechanizmu doboru naturalnego), ani nawet iterowanego uczenia (brak wymiany pokoleń i przekazu informacji między nimi). Jedyne procesy prowadzące tu do wyłonienia się języka i jego dalszego rozwoju to przekaz kulturowy w ramach stałej populacji. Uzyskane wyniki pokazują, że objaśnienie pewnych ważnych własności synonimii i homonimii można otrzymać w ramach modelu dużo prostszego, niż

proponowany wcześniej przez Hurforda, a w szczególności bez odwoływania się do argumentów ewolucyjnych w rodzaju działania presji selekcyjnej, kreującej mówców o lepszym przystosowaniu (*fitness*) niż słuchacze.

4.5. Szumy a dystrybucja słów

Proces komunikacji może napotykać rozmaite bariery prowadzące do zniekształcenia treści komunikatu. Wśród czynników utrudniających przekazywanie informacji wymienić należy przede wszystkim różnego rodzaju zakłócenia generowane w kanale komunikacyjnym (tak zwany **szum komunikacyjny**), powodujące transfer zniekształconego komunikatu do odbiorcy. Oczywiście może to być powodem błędnego zdekodowania tak przekazanej informacji. Przyczyną szumu komunikacyjnego mogą być fizyczne cechy kanału komunikacyjnego, jak również cechy samego nadawcy (na przykład niewyraźna wymowa lub pismo albo nieumiejętne posługiwanie się daną odmianą językową). Można chyba przypuszczać, że szum odgrywał również pewną (być może nie-małą) rolę w procesie powstawania i dalszego rozwoju języka, szczególnie na jego wczesnych etapach.

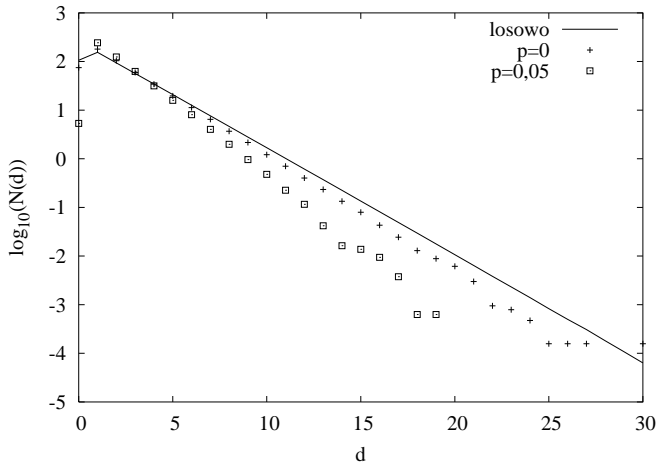
Jak już zapowiedziano w podrozdziale 4.2, prezentowany tutaj model pozwala na badanie nie tylko struktury języka wyłaniającego się w wieloobietkowej grze w nazywanie, ale także wpływu szumu na ten emergentny proces i jego finalny efekt. Przedstawione dotychczas wyniki uzyskane zostały przy „niezaszumionym” działaniu modelu, a więc przy założeniu, że proces komunikacji przebiega w sposób idealny i słowa przekazywane są słuchaczowi bez żadnych zakłóceń (czyli przy prawdopodobieństwie wystąpienia szumu $p = 0$). W niniejszym podrozdziale natomiast omawiamy wyniki uzyskane dla modelu z włączonym szumem ($p > 0$).

Zatem teraz w każdej interakcji z niezerowym prawdopodobieństwem p może pojawić się szum, który powoduje losowe zniekształcenie słowa wybranego przez mówcę do komunikacji. Jeśli mówca wytypował formę f , to w obecności szumu słuchacz odbiera zamiast niej formę $f^M = f + \eta$, gdzie zaburzenie η jest losową liczbą całkowitą z przedziału $\langle -a, a \rangle$, przy parametrze a określającym amplitudę szumu; niekiedy

może też zachodzić konieczność ponownego losowania liczby η , tak aby spełniony był naturalny warunek $1 \leq f^M \leq r$. Zakres zmienności parametrów p oraz a podany został w tab. 4.1, a zakończoną sukcesem interakcję w obecności szumu (przy zaburzeniu $\eta = 1$) ilustruje rys. 4.2. Jak widać, jeśli zaburzenie nie powoduje zbyt dużej różnicy między komunikatem wybranym przez mówcę a tym odebrany przez słuchacza, to może się zdarzyć, że odbiorcy uda się go poprawnie zinterpretować, czyli odgadnąć, do którego obiektu odnosi się dane słowo.

Należy się spodziewać, że takie zakończone sukcesem próby komunikacji w obecności szumu często będą miały miejsce wówczas, gdy amplituda szumu (parametr a) nie będzie duża, albo też gdy słowa o największych wagach na poszczególnych listach będą dostatecznie zróżnicowane, tak że ich ewentualne zaburzone formy nie będą się pokrywać z pozostałymi słowami. Jak pokazuje rys. 4.8, w trakcie ewolucji modelu w wersji bez szumu następuje redystrybucja słów o największych wagach, która redukuje homonimie i poprawia komunikację między agentami. Aby sprawdzić, jakie zmiany pociąga tutaj za sobą występowanie szumu, przeanalizowane zostały dokładniej rozkłady słów o największych wagach w trzech przypadkach: dla modelu z szumem, modelu bez szumu i dystrybucji losowej. Zakładając, że uzyskane w symulacjach słowa zostały uporządkowane (na przykład rosnąco), można obliczyć różnice d dzielące sąsiednie pary słów i policzyć dla każdej z tych różnic liczbę jej wystąpień $N(d)$. Wyniki takich obliczeń uśrednionych dla dużej liczby symulacji pokazuje rys. 4.10.

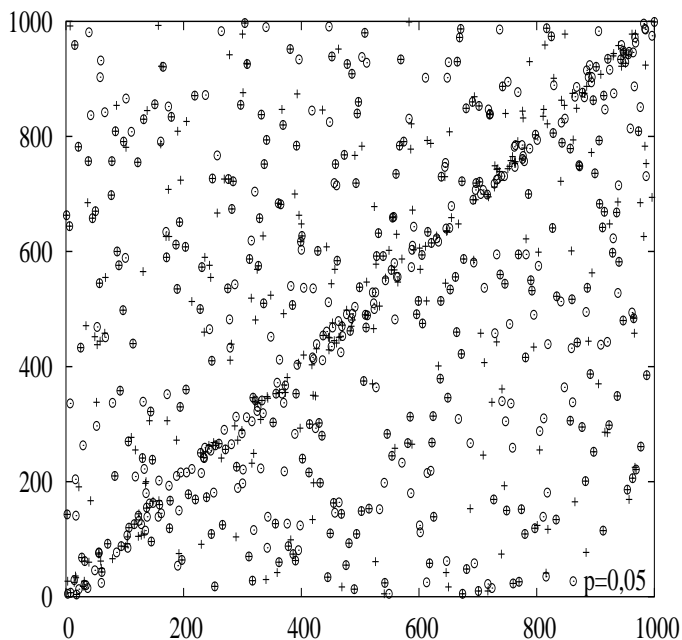
Uzyskane dane świadczą o tym, że obecność szumu powoduje dalszy wzrost redystrybucji słów o największych wagach w stosunku do modelu bez szumu. Już ten ostatni przypadek różnił się od rozkładu losowego, a dla modelu z szumem różnice te są jeszcze większe. Z wykresów można odczytać, że w obecności szumu rozkład słów staje się bardziej równomierny niż w dwóch pozostałych przypadkach: z jednej strony znacząco maleje wówczas liczba par identycznych słów (o różnicy $d = 0$), czyli homonimów, a z drugiej strony, im większe są różnice, tym rzadsze jest ich występowanie w porównaniu z pozostałymi dwoma rozkładami; tych największych różnic (rzędu $d \geq 20$) w przypadku szumu wręcz wcale nie odnotowano. Należy tu dodać, że w kontekście tej analizy bardzo ciekawym zadaniem badawczym byłoby przeprowadzenie podobnych obliczeń dla zasobu leksykalnego



Rys. 4.10. Średnia liczba $N(d)$ różnic o wielkości d pomiędzy sąsiednimi słowami o największych wagach (wyznaczona dla układu o $n = 500$, $l = 10$, $r = 1000$ i $\varepsilon = 10^{-1}$) w obecności szumu (\square) lub bez niego ($+$); linia ciągła odpowiada losowej dystrybucji słów. Efektem wzmocnionej przez szum redystrybucji słów o największych wagach jest ich bardziej równomierny rozkład, w którym zarówno nakładanie się słów ($d = 0$), jak i duże różnice między nimi ($d \geq 10$) występują rzadziej niż w przypadku bez szumu oraz w przypadku rozkładu losowego, a różnice rzędu $d \geq 20$ już w ogóle nie występują [diagram za: Lipowski, Lipowska 2009b]

języka naturalnego. Oczywiście pozostaje tu do rozstrzygnięcia dość problematyczna kwestia określenia właściwej definicji „odległości” między formami wyrazowymi, aczkolwiek pewne algorytmy wyznaczające podobieństwo fonetyczne były już proponowane [Kessler 2005], można by więc spróbować je wykorzystać do przeprowadzenia odpowiednich badań statystycznych.

Z kolei na rys. 4.11 wyraźnie widać, że szum ma wpływ także na dystrybucję słów o drugich co do wielkości wagach. Diagram ten jest analogiem rys. 4.6, który prezentuje dane dla modelu bez szumu (por. jego opis na s. 202). Tym razem zdecydowanie zauważalne jest nagromadzenie punktów wzdłuż przekątnej $x = y$ diagramu (podczas gdy przy braku szumu taka akumulacja nie występuje). Oznacza to, że obecność szumu prowadzi często do dużego zbliżenia (lub wręcz zrównania) słów o największych wagach z tymi o drugich wagach. Być może



Rys. 4.11. Dystrybucja słów o największych wagach (oś pozioma) i słów o drugich co do wielkości wagach (oś pionowa) wyznaczona dla układu o $n = 500$, $l = 10$, $r = 1000$ oraz $\varepsilon = 10^{-5}$ w obecności szumu ($p = 0,05$) po czasie symulacji $t = 1000$. Różne symbole (kółka i plusy) odpowiadają różnym agentom. Symbol o współrzędnych (x, y) na diagramie oznacza, że agent ma na jednej z list słownikowych słowo x (o największej wadze) oraz słowo y (o drugiej co do wielkości wadze). W porównaniu z rys. 4.6 występuje tu wyraźna akumulacja punktów na przekątnej diagramu [diagram za: Lipowski, Lipowska 2009b]

w takich przypadkach nie należałoby już takich par uważać za synonimy, które zwykle mają zupełnie różne kształty, lecz traktować je raczej jako formy wariantywne o bardzo zbliżonym kształcie.

Niewykluczone zatem, że szum może odgrywać ważną pozytywną rolę w rozwoju języka. Z jednej strony wywołuje on bardziej równomierny rozkład słów w dostępnej „przestrzeni leksykalnej” (w naszym modelu rolę tę pełni przedział $\langle 1, r \rangle$), co uwidocznione jest na rys. 4.10. Taki efekt wyraźnego rozseparowania form wyrazowych ma niewątpliwie korzystny wpływ na komunikację, gdyż słowa odpowiednio między

sobą zróżnicowane trudniej jest w trakcie komunikacji pomylić z innymi i błędnie zinterpretować. W tym sensie szum może usprawniać komunikację. Jednocześnie dzięki niemu zachodzi również istotna redukcja homonimii, co znów niewątpliwie ułatwia porozumiewanie się. Dodatkowo jeszcze obecność szumu wpływa także na dalszą redukcję synonimii (rys. 4.11). To z kolei prowadzi do optymalizacji języka, w sensie poprawienia jego ekonomiczności, co znów oznacza, że działanie szumu jest korzystne i potencjalnie ułatwia posługiwanie się językiem.

4.6. Wnioski

W niniejszym rozdziale przedstawiony został model wieloobiektowej wersji gry w nazywanie oraz wyniki jego symulacji, a w szczególności struktura wyłaniającego się języka. Samoorganizacja tego układu prowadzi do stanu lingwistycznej synchronizacji, umożliwiającej efektywną komunikację, w której komunikowane agentom nazwy są przez nie poprawnie dekodowane. Najważniejszym uzyskanym tu rezultatem jest obserwacja, że w rozwijającym się systemie poziom homonimii maleje, ale jednak nie zanika ona całkowicie, mimo że może zaburzać komunikację, natomiast synonimia, choć „nieszkodliwa”, zostaje praktycznie wyeliminowana. Z jednej strony jest to zgodne z tendencjami obserwowanymi dla języków naturalnych (powszechna homonimia *versus* rzadka synonimia), natomiast z drugiej strony należy podkreślić prostotę modelu, w którym ten efekt został uzyskany. Jako model z jedną tylko generacją agentów, w którym zachodzi jedynie ewolucja kulturowa (a nie ma biologicznej, wymagającej wymiany pokoleniowej i selekcji osobników o odpowiednim *fitness*), jest on znacznie mniej skomplikowany niż omówiony w podrozdziale 4.1 genetyczny model Hurforda [2003b] z asymetrią korzyści odnoszonych przez mówców i słuchaczy. Innym interesującym wynikiem omawianego eksperymentu jest spostrzeżenie, że szum może także odgrywać istotną pozytywną rolę w ewolucji języka. W tym przypadku poprawia on zróżnicowanie form wyrazowych oraz redukuje homonimie i synonimie, co niewątpliwie prowadzi do usprawnienia komunikacji i do optymalizacji języka.

W swojej znanej pracy Martin A. Nowak *et al.* [1999], korzystając z teorii gier ewolucyjnych jako narzędzia badania systemów dyna-

micznych, przedstawili matematyczny model ewolucji prostego systemu komunikacji (leksykonu rozumianego jako zbiór asocjacji: forma-znaczenie) w populacji, której osobniki uczą się języka poprzez obserwację (próbkiwanie) języka używanego przez pozostałych członków tej populacji. Jak się okazało, dla badanego procesu stochastycznego stan, w którym występuje homonimia, jest stanem absorpcyjnym, natomiast synonimia zanika w stanach stabilnych tego procesu. Zatem dynamika ewolucyjnych gier językowych również prowadzi do pożądanej sytuacji, w której homonimy są powszechne, a synonimy rzadkie.

Oczywiście dla modeli gier językowych zjawisko zanikania synonimii jest właściwie ich cechą charakterystyczną jako konsekwencja stopniowego uzgadniania leksykonów agentów i usuwania z nich słów niezapewniających sukcesu komunikacyjnego. Na przykład w najbardziej typowej grze, jaką jest minimalna gra w nazywanie [Baronchelli *et al.* 2006b], po początkowym szybkim wzroście liczby synonimów, rozumianych tu jako wszystkie formy wygenerowane dla danego znaczenia, następuje ich stopniowe rozprzestrzenianie w populacji agentów (po nieudanych próbach komunikacji agenty zapamiętują nowe słowa). Kiedy jednak interakcja kończy się sukcesem, agenty zapominają wszystkie konkurujące formy oprócz tej właśnie użytej. Proces ten prowadzi ostatecznie do uzgodnienia języka, w którym obiektowi odpowiada tylko jedno słowo, nie ma więc już synonimii (por. s. 130-131).

Badaniu problemu powstawania homonimii poświęcona była z kolei praca Jinyun Ke *et al.* [2002a]. Jej część teoretyczna zawierała obserwacje z porównania języka angielskiego, niemieckiego i sześciu dialektów języka chińskiego. Autorzy zauważyli, że języki o większych zasobach fonologicznych i bardziej złożonej strukturze sylab dysponują mniejszą liczbą homonimów. Jeśli chodzi o ich dystrybucję, to homonimy należące do różnych klas gramatycznych są liczniejsze niż reprezentujące tę samą klasę, przy czym te ostatnie zwykle bardzo różnią się frekwencją. W językach wciąż pojawiają się nowe homonimy (w wyniku zmian fonetycznych, zapożyczeń i innych procesów), ale też część z nich zanika. W części empirycznej pracy ten proces cyklicznego pojawiania się i zanikania homonimów udało się autorom odtworzyć w symulacjach modelu gry w nazywanie, w którym agenty wyposażone były w dwa osobne (początkowo puste) leksykony, aktywny i pasywny (to jest do

produkcji i do interpretacji), zawierające wagi dla wszystkich możliwych wyrazów, rozumianych tu jako asocjacje forma-znaczenie (i odwrotne). Liczby używanych w systemie form i znaczeń były ustalone. (Podobny model Lenaertsa *et al.*, z jednym tylko aktywno-pasywnym leksykonem, opisany został już w podrozdziale 2.6, s. 117). Agenty w trakcie wzajemnych interakcji uczyły się (ze wzmacnianiem) wyrazów. W toku ewolucji systemu następowało uzgodnienie ich leksykonów, gwarantujące wysoki poziom sukcesów komunikacyjnych. Porównano dwa przypadki: gdy liczba form była równa albo też trzykrotnie mniejsza od liczby znaczeń. W pierwszym poziom sukcesu wyniósł 90%, a 20% wyrazów miało homonimy, natomiast w drugim – odsetki te wynosiły odpowiednio 30% i 100%. Homonimy pojawiały się na skutek ograniczenia zasobów fonetycznych (liczby używanych form), a zanikały wobec porażek w interakcjach komunikacyjnych. Procesy te prowadziły do ciągłej wewnętrznej samoorganizacji leksykonów agentów.

Ten drugi przypadek odpowiadał bardziej realistycznej sytuacji, w której nasze potrzeby semantyczne (liczba znaczeń, które chcemy wyrażać) znacznie przekraczają liczbę form wyrazowych, jakie mamy do dyspozycji. W takiej sytuacji istnienie homonimii jest nieuchronne (por. też wyniki Nowaka *et al.* [1999]). Niemniej pomimo wieloznaczności, jaką powoduje stosowanie homonimów, nasza komunikacja nie jest aż tak zaburzona, jak by na to wskazywały powyższe wyniki. Naturalnym wyjaśnieniem tego faktu wydaje się możliwość rozstrzygania niejednoznaczności na podstawie kontekstu. Aby to sprawdzić, autorzy opracowali drugi model, w którym mówca wybiera zawsze po dwa znaczenia, bliskie sobie w umownie przyjętej przestrzeni semantycznej, oraz produkuje odpowiednio dwie formy wyrazowe. Słuchacz dekoduje obie formy, wykorzystując heurystykę opartą na domniemanej bliskości ich znaczeń. Uzyskane w symulacjach wyniki potwierdziły wcześniejsze przypuszczenia, gdyż w pierwszym przypadku (tyle samo znaczeń co form) poziom sukcesu komunikacyjnego wzrósł do 100%, pomimo że aż 70% wyrazów miało homonimy. Sytuacja poprawiła się jeszcze bardziej znacząco w drugim przypadku (znaczeń trzykrotnie więcej niż form), gdzie poziom sukcesu z 30% podniósł się do 80%, podczas gdy wciąż wszystkie wyrazy stanowiły homonimy. Potwierdzono więc, że przy bardziej realistycznym założeniu o wielowyrazowych wypowiedziach,

komunikacja może pozostawać efektywna nawet pomimo utrzymującego się stale wysokiego poziomu homonimii. Samą zaś homonimię autorzy uznają za własność emergentną samoorganizującego się systemu językowego, natomiast nieustanne zmiany, jakim podlega system homonimów, za zjawisko, którego badanie może rzucić światło również na obraz ewolucji języka, który staramy się wypracować.

Poza grami językowymi badany był również uogólniony model wyłaniania się opinii lub konwencji na drodze negocjacji [Baronchelli *et al.* 2007], w którym w przypadku sukcesu interakcji (to znaczy, gdy słuchacz znał opinię wyrażoną przez mówcę) agenty uzgadniały swoje opinie (mianowicie zapamiętywały tylko tę użytą w komunikacji), ale tylko z pewnym prawdopodobieństwem β (zaś z prawdopodobieństwem $1 - \beta$ nic nie zmieniały w swoich zasobach pamięci), natomiast w przypadku porażki słuchacz dodawał tę nowo poznaną opinię do listy już sobie znanych. Zauważmy, że przypadek $\beta = 1$ odpowiada minimalnej grze w nazywanie (opinie są wówczas konwencjami językowymi, a ściślej mówiąc, nazwami nadawanymi pewnemu obiektowi). Także dla innych, dostatecznie dużych wartości parametru β , model działa właśnie tak, jak gra w nazywanie i populacja osiąga konsensus (zanikają „synonimy”, czyli alternatywne opinie). Jest to wówczas tak zwany stan absorpcyjny, a więc już niezmienny, bez możliwości dalszej ewolucji układu. Natomiast dla skrajnego przypadku $\beta = 0$ model dąży do stanu absorpcyjnego, w którym wszystkie agenty znają wszystkie opinie. Z kolei dla wartości pośrednich (poniżej pewnej wartości krytycznej, w której następuje przejście fazowe między tymi różnymi reżimami) populacja ulega polaryzacji, to znaczy podziałowi na skończoną liczbę grup „głoszących” odrębne opinie (a więc w układzie zostaje zachowana pewna liczba „synonimów”). Jest to stan stacjonarny, ale dynamiczny, w tym sensie, że poszczególne agenty wciąż mogą ewoluować (zmieniać opinie), aczkolwiek nie zmienia to już globalnego (tu: spolaryzowanego) stanu układu. Niemniej, jak widać, możliwa jest taka dynamika negocjacji, przy której synonimia nie zanika całkowicie, tylko ulega redukcji.

Efekt wygaszania synonimii występuje natomiast w bardzo interesującym modelu A. Puglisiego *et al.* [2008], w którym badano koewolucję kategorii perceptualnych (dotyczących barw) i odpowiadających im kategorii (konwencji) lingwistycznych. W takim systemie jest po-

tencjalnie nieskończenie wiele znaczeń z tego względu, że paleta barw ma charakter kontinuum, z którego agenty mogą wyróżniać dowolne odcinki jako kolory. Jednak także i w tym przypadku, przy regułach analogicznych do wyżej opisanych, następowała zarówno synchronizacja kategorii perceptualnych (finalnie populacja wyróżniała w pełnym spektrum barw skończoną liczbę odrębnych kolorów o zbliżonych granicach podziału u różnych agentów), jak i synchronizacja odpowiadających im nazw (a więc synonimia znów zanikała w procesie takim samym jak w minimalnej grze w nazywanie). Uzyskano też ciekawe rezultaty dotyczące polisemii. Choć procedura generowania nowych nazw wykluczała pojawienie się w systemie przypadkowych homonimów (jako dwukrotnie wygenerowanej identycznej nazwy dla różnych znaczeń), to jednak zaobserwowano, że z bardzo małym prawdopodobieństwem, ale jednak możliwe jest przeniesienie nazwy jednego koloru na drugi (sąsiedni w obrębie spektrum) w sytuacji, gdy te dwa kolory mają u partnerów interakcji nieco inaczej wyznaczone granice. Efekt ten (określany przez autorów jako *word contagion*) może więc w specyficznych okolicznościach nastąpić u słuchacza, co dalej wymagałoby jeszcze jego globalnej synchronizacji wśród całej populacji, która jednak nie zawsze musi mieć miejsce. W każdym razie efekt wystąpienia polisemii ma szansę przetrwać w tym języku.

Wyłanianie się dominującego słowa i w konsekwencji eliminacja synonimii to ważna własność badanego modelu. Interesującym byłoby zbadanie, na ile własność ta jest czuła na ewentualną zmianę reguł badanego modelu. W szczególności można by rozważyć przypadek, gdy prawdopodobieństwo wyboru słowa przez mówcę nie jest proporcjonalne do wagi w tego słowa, ale do w^α , gdzie $\alpha \neq 1$. W przypadku $\alpha > 1$ już niewielka przewaga wagi jednego słowa nad innymi oznaczałaby znaczną przewagę w prawdopodobieństwie jego wyboru, co zwiększałoby szanse na wyłonienie się słowa dominującego. Natomiast w przypadku $\alpha < 1$ otrzymuje się efekt odwrotny i stabilizację synonimii. Najbardziej naturalny, opisany powyżej przypadek z $\alpha = 1$, to najwyraźniej granica dwóch reżimów (braku synonimii i powszechnej synonimii), który być może najbardziej odpowiada rzeczywistości lingwistycznej, czyli synonimii rzadkiej. Planowane są dalsze badania i weryfikacja tych rozważań. Warto przy tej okazji zwrócić uwagę na podobieństwo takiego rozszerzonego modelu do niedawno analizowane-

go modelu wyłaniania się struktur społecznych [Lipowski *et al.* 2014], w którym pojawia się parametr o podobnym znaczeniu jak wspomniany wykładnik α . Przypadek $\alpha > 1$ odpowiada tam wyłonieniu się małych grup społecznych (i wówczas głównie w ich obrębie osobniki wchodzą w interakcje z innymi), podczas gdy $\alpha < 1$ to sytuacja, gdy wszystkie osobniki oddziałują między sobą. W przypadku gdy $\alpha = 1$, w modelu tworzą się różnego rodzaju klasterzy oddziałujących osobników, co odpowiada społeczeństwu o najbardziej złożonej strukturze. W tym wypadku również wydaje się, że w kontekście opisu istniejących społeczeństw najbardziej realistyczną wartością jest $\alpha = 1$.

Przedstawiony tu model wieloobektowej gry w nazywanie ze względów obliczeniowych został zrealizowany w wersji tylko dwuagentowej. Jednakże już nawet dla tak ograniczonej populacji model wykazuje nietrywialne zachowanie i interesujące własności. Niemniej należałoby chyba jeszcze podjąć próbę rozszerzenia symulacji do wersji wieloagentowej, choć niewątpliwie będą one dość wymagające obliczeniowo, gdyż dynamika modelu istotnie zwolni (liczba kroków potrzebnych do osiągnięcia synchronizacji lingwistycznej w całej populacji będzie znacząco większa, co oznacza żmudne i długotrwałe symulacje). Skądinąd nie należy chyba oczekiwać dla wersji o jedynie liczniejszej populacji jakichś zaskakujących rezultatów, zasadniczo różnych od uzyskanych tutaj. Ciekawszą opcją byłoby natomiast wprowadzenie dodatkowych czynników wpływających na kształtujący się język, takich jak kontakt z innymi językami czy zmiany fonetyczne lub inne zjawiska mogące stanowić źródło pojawiania się nowych homonimów czy synonimów. Kolejne możliwe rozszerzenie badanego modelu polegałoby na wprowadzaniu do rozwijającego się systemu nowych obiektów i/lub nowych agentów. I wreszcie można by jeszcze zaproponować wariant modelu, w którym agenty podlegają ewolucji biologicznej i selekcji zależnej od odpowiednio zdefiniowanego przystosowania (*fitness*).

5.

Model na adaptatywnej sieci wazonej

*I think the next century
will be the century of complexity.*

Stephen W. Hawking

Przedmiotem rozważań w niniejszym rozdziale jest model gry w nazywanie rozgrywanej na adaptatywnej sieci wazonej. Wagi na jej krawędziach reprezentują preferencje agentów do wzajemnych kontaktów, zależne od poziomu sukcesu osiągniętego w ich dotychczasowej komunikacji. Przy słabych preferencjach model zachowuje się jak typowa gra w nazywanie na grafie pełnym i dość szybko osiąga stan pełnej synchronizacji, czyli jednojęzykowy. Jednakże w przypadku silniejszych preferencji funkcjonowanie modelu ulega istotnej zmianie, gdyż stabilizuje się on w stanie wielojęzykowym, w którym odrębne klastry agentów posługują się różnymi językami. O tak różnych efektach samoorganizacji badanego systemu decyduje współzależność dynamiki samej gry w nazywanie i dynamiki ewolucji sieci, na której toczy się gra.

5.1. Model na sieci złożonej

Istotnym czynnikiem w modelu gry w nazywanie jest topologia interakcji między agentami. Jeśli agenty traktować jako wierzchołki grafu, to dopuszcza się wówczas interakcje tylko między ich parami połączonymi krawędzią. Interesujące jest badanie, jak gra w nazywanie przebiega przy różnego rodzaju ich połączeniach, czyli na rozmaitych grafach. Najprostszy (i pierwszy z badanych) przypadek to oczywiście model na grafie pełnym, gdzie każdy agent z takim samym prawdopodobieństwem może się komunikować z każdym innym [Steels 1995; Baronchelli *et al.* 2006b, 2008]. Analizowano też sieci regularne, na przykład kwadratowe, gdzie interakcje zachodzą wyłącznie między najbliższymi sąsiadami [Baronchelli *et al.* 2006c; Lipowska 2011]. Oczywiście rzeczywiste sieci społecznych oddziaływań są znacznie bardziej skomplikowane [Wasserman, Faust 1994; White *et al.* 1976; Albert, Barabási 2002], dlatego, aby uwzględnić ich heterogeniczną naturę, badano również modele na sieciach małych światów [Dall’Asta *et al.* 2006a; Lin *et al.* 2006; Liu *et al.* 2009], sieciach bezskalowych [Dall’Asta *et al.* 2006b; Baronchelli *et al.* 2006a], losowych grafach geometrycznych [Lu *et al.* 2006, 2008] czy też sieciach o predefiniowanej (wbudowanej, z góry ustalonej) strukturze klasterowej [Dall’Asta *et al.* 2006b; Lu *et al.* 2009].

Mimo pewnych ilościowych różnic w dynamice tych wszystkich modeli, ogólne ich zachowanie jest zawsze takie samo, przede wszystkim zaś charakterystyczna jest dla nich szybka zbieżność do stanu pełnej synchronizacji całej populacji (czyli do stanu jednojęzykowego). Jedyny wyjątek, w dodatku właściwie potwierdzający ogólną zasadę, stanowi ostatni z wyżej wymienionych przypadków, a mianowicie sieci o charakterystycznej strukturze klasterowej. Są one utworzone z klasterów, które są bardzo słabo ze sobą powiązane (to znaczy połączone są one niewielkimi lub nawet tylko pojedynczymi krawędziami). Natomiast wewnątrz klasterów występuje tak wiele połączeń międzywęzłowych, że są one zbliżone do klik, czyli podgrafów pełnych. W takich strukturach gra w nazywanie także prowadzi do synchronizacji, ale tylko w obrębie poszczególnych klasterów. Zatem układ jako całość osiąga wprawdzie stan wielojęzykowy, jednakże występowanie każdego z języków jest ograniczone do uprzednio wyodrębnionej grupy osobników,

wewnątrz której synchronizacja przebiega w zwykły sposób; natomiast synchronizacja pomiędzy grupami nie zachodzi z powodu ich odseparowania, które blokuje komunikację między nimi.

Tak więc najbardziej typowy dla gry w nazywanie jest stan finalny, w którym wszystkie osobniki posługują się tym samym językiem. Nieodparcie nasuwa się pytanie, czy ewolucja języka naturalnego również doprowadzi do takiej samej sytuacji, czy znikną wszystkie języki oprócz jednego, którym będą posługiwać się wszyscy ludzie? Wobec szybko postępującego wymierania licznych języków etnicznych takiego właśnie scenariusza nie można wcale wykluczyć. Niemniej jednak wciąż istnieją jeszcze tysiące języków i status przynajmniej tych o największych populacjach użytkowników wydaje się dość trwały. Możliwe więc, że to właśnie aktualny stan wielojęzycznej populacji okaże się stabilny (choć być może ze znacznie mniejszą niż obecnie liczbą języków, rzędu kilkunastu czy kilkudziesięciu). Czy zatem w ramach gry w nazywanie dałoby się uzyskać taki nietypowy dla niej, ale być może bardziej realistyczny, efekt końcowy? Jak wcześniej wspomniano, pojawienie się takich wielojęzycznych stanów w grze w nazywanie odnotowano już dla pewnych specyficznych sieci złożonych o określonej strukturze [Dall’Asta *et al.* 2006b], jednakże był to wynik uzyskany, jak to określili sami autorzy, w sposób sztuczny, przez planowe skonstruowanie odpowiedniej sieci. Wydaje się natomiast, że taki pożądaný (z punktu widzenia modelowania ewolucji języka naturalnego) stan wielojęzyczny powinien wyłaniać się samorzutnie jako rezultat działania jakiegoś dynamicznego procesu, a nie tylko jako konsekwencja pewnej z góry narzuconej struktury populacji.

Scenariusz taki realizuje się natomiast w prezentowanym poniżej modelu gry w nazywanie, w którym możliwym stanem finalnym jest właśnie stabilny stan wielojęzyczny [Lipowska 2012b; Lipowska, Lipowski 2012]. Model ten zdefiniowany jest na grafie pełnym, jednakże jest to zarazem graf ważony i adaptatywny, co oznacza tu zmienność wag połączeń między agentami. W trakcie jego ewolucji samorzutnie kształtuje się struktura „społeczna”, której odpowiadają wyłaniające się języki. Czynnikiem decydującym o formowaniu się struktury klastrowej jest tutaj intensywność interakcji między agentami, o której decydują wagi ich wzajemnych powiązań. Wagi te z kolei zależą od poziomu sukcesu komunikacyjnego osiągniętego dotychczas przez po-

szczególne pary agentów, a więc są zmienne w czasie. W ten sposób komunikacja między agentami w tym modelu realizuje pewne założenie dotyczące charakteru interakcji społecznych. Przyjmuje się tu mianowicie, że tym chętniej i częściej kontaktujemy się z poszczególnymi partnerami, im lepiej porozumiewaliśmy się z nimi uprzednio. Innymi słowy, im lepiej się z kimś „dogadujemy”, tym większa szansa, że będziemy ponownie próbować się z nim porozumieć. Dlatego też w modelu każdy sukces komunikacyjny agentów powoduje, że wzrasta waga ich połączenia, a co za tym idzie – rośnie prawdopodobieństwo kolejnych interakcji między nimi. Choć więc sieć agentów stanowi graf pełny, to jednak stale modyfikowane w niej wagi, reprezentujące siłę związków między agentami, wyznaczają w niej różne struktury wyłaniające się w trakcie ewolucji systemu. Oznacza to, że prezentowany tu model topologicznie odpowiada pewnego rodzaju sieci złożonej, którą określamy jako adaptatywną sieć ważoną.

5.2. Charakterystyka modelu

Model zdefiniowany jest w następujący sposób. Badana jest populacja N agentów, co do których zakładamy, że rozmieszczone są w węzłach ważonego grafu pełnego – to jest takiego, w którym każdy węzeł jest połączony z każdym innym, a wszystkim tym krawędziom przypisane są wagi będące liczbami rzeczywistymi. Innymi słowy, każdemu połączeniu agentów i -tego z j -tym ($i, j = 1, 2, \dots, N$) odpowiada pewna waga w_{ij} , przy czym wagi są symetryczne, to znaczy $w_{ij} = w_{ji}$ (graf jest nieskierowany). Zakładamy też, że w grafie nie ma pętli, a dokładniej, że wagi w_{ii} są zerowe. Natomiast wszystkie pozostałe wagi początkowo są identyczne i wynoszą ε , gdzie ε jest drugim obok N parametrem modelu – jest to minimalna wartość wagi dla każdej pary różnych agentów; typowo jest to bardzo mała liczba dodatnia: $0 < \varepsilon \ll 1$. Agenty rozgrywają wielokrotnie jednoobiekтовую grę w nazywanie, starając się uzgodnić nazwę dla pojedynczego obiektu obecnego w ich otoczeniu. Dlatego też każdy agent wyposażony jest w słownik, czyli listę słów odnoszących się do owego obiektu (początkowo wszystkie słowniki są puste). Poszczególne rozgrywki kończą się zawsze albo sukcesem, albo porażką, a wyniki te są każdorazowo zliczane,

służąc do wyznaczenia aktualnego poziomu sukcesu komunikacyjnego s_{ij} dla danej pary grających ze sobą agentów (oczywiście $s_{ij} = s_{ji}$ oraz początkowo wszystkie wartości $s_{ij} = 0$). Odpowiednio też do poziomu sukcesu s_{ij} modyfikowane są wagi w_{ij} . Pojedyncza rozgrywka między parą agentów przebiega następująco:

1. Losowany jest jeden spośród N agentów (każdy z jednakowym prawdopodobieństwem $1/N$), który zostaje mówcą.
2. Losowany jest ruletkowo, czyli z prawdopodobieństwem wyboru proporcjonalnym do wagi, jeden spośród pozostałych agentów, który zostaje słuchaczem (bardzo efektywny algorytm losowania ruletkowego zdefiniowany jest w pracy [Lipowski, Lipowska 2012]). Kiedy mówcą jest i -ty agent, to prawdopodobieństwo p_{ij} wyboru j -tego agenta na słuchacza jest wyznaczone jako stosunek wagi połączenia tych agentów do sumy wszystkich wag mówcy:

$$p_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_{k=1}^N w_{ik}}, \quad (5.1)$$

gdzie wagi w_{ij} (dla $i, j = 1, 2, \dots, N$) określone są w następujący sposób:

$$w_{ij} = \begin{cases} s_{ij} + \varepsilon & \text{dla } i \neq j, \\ 0 & \text{dla } i = j. \end{cases} \quad (5.2)$$

Definicja s_{ij} , czyli dotychczasowego poziomu sukcesu komunikacyjnego danej pary agentów (i, j) , podana jest w punkcie 5.

3. Mówca wybiera losowo jedno słowo ze swojego słownika (w przypadku gdy słownik jest jeszcze pusty, agent generuje losowo nowe słowo) i jest ono komunikowane słuchaczowi.
4. Gra kończy się:
 - albo **sukcesem** – o ile słuchacz zna dane słowo, to znaczy ma je w swoim słowniku – i wówczas oba agenty pozostawiają w słownikach wyłącznie to właśnie słowo,
 - albo **porażką** – w przeciwnym przypadku – i wtedy słuchacz dodaje to słowo do swojego słownika.

5. Odpowiednio do wyniku gry uaktualniona zostaje liczba sukcesów odniesionych dotychczas przez parę agentów (i, j) , a liczba ich wspólnie rozegranych gier wzrasta o 1; iloraz tych dwóch liczb stanowi aktualny poziom ich wzajemnych sukcesów komunikacyjnych s_{ij} ; oczywiście $0 \leq s_{ij} \leq 1$ oraz $s_{ij} = s_{ji}$.

Jak wynika z powyższej definicji, z jednej strony sposób uczenia się języka przez agenty jest tu taki sam jak w minimalnej grze w nazywanie [Baronchelli *et al.* 2006b]. Z drugiej jednak strony zastosowana strategia jest nieminimalna ze względu na użycie wag. Wagi zależne są od poziomu sukcesu komunikacyjnego, tak jak w strategii częstotliwościowej, jednak inaczej niż w typowej grze w nazywanie nie są one przypisane słowom, lecz określają siłę związków między agentami, wpływając tym samym na wybór partnerów do interakcji. To właśnie strategia wyboru słuchacza, opisana w punkcie drugim powyższej procedury, zasadniczo odróżnia niniejszy model od innych gier językowych. Stosowana tu metoda wyznaczania słuchacza realizuje wspomniane w poprzednim podrozdziale kryterium wyboru partnera do komunikacji, polegające na tym, że preferujemy kontakty z osobami, z którymi już uprzednio lepiej się porozumiewaliśmy. W omawianym modelu preferencję tę wyznaczają wagi decydujące o prawdopodobieństwie komunikacji; wagi z kolei zależą od poziomu sukcesu komunikacyjnego poszczególnych par agentów. Oczywiście ich wartości ulegają zmianie w trakcie kolejnych interakcji agentów, w zależności od liczby odniesionych przez nie sukcesów, dlatego też omawiany model odpowiada **adaptatywnej sieci ważonej**.

Jak widać, przebieg ewolucji całego systemu zdeterminowany jest przez wagi, które określają intensywność komunikacji między agentami. Generalnie, im większy jest (relatywnie, to znaczy w porównaniu z innymi parami) poziom sukcesu komunikacyjnego pary agentów, tym częściej będą się one ze sobą komunikować. Zauważmy jednak, że ze względu na dodatnią wartość parametru ε występującego w definicji wagi (5.2), stanowiącego jej wartość minimalną, dla dowolnych dwóch agentów, nawet takich, które nie odniosły w dotychczasowych interakcjach ze sobą jeszcze żadnych sukcesów, zawsze istnieje choćby ta minimalna szansa podjęcia przez nich (pierwszej lub kolejnej po serii porażek) próby komunikacji. I właśnie wielkość tej znikomej szansy określa siłę wspomnianej preferencji w wyborze partnera do komunika-

cji: większe ε oznacza większe prawdopodobieństwo kontaktu ze słabo powiązаныmi partnerami, a zarazem słabszą preferencję w kierunku tych mocniej połączonych (czyli tych, z którymi odniosło się większy sukces w komunikacji).

Ponieważ na samym starcie ewolucji modelu poziom wszystkich sukcesów $s_{ij} = 0$, to oczywiście wszystkie wagi $w_{ij} = \varepsilon$ (dla $i \neq j$), a więc mówca z takim samym prawdopodobieństwem wybiera dowolnego agenta jako swojego słuchacza. W początkowej fazie ewolucji systemu, gdy agenci mają jeszcze puste słowniki, większość interakcji kończy się porażką, zatem wagi nie podlegają większym zmianom. Jednocześnie generowana jest duża liczba nowych słów. Stopniowo jednak, wraz z postępującą wymianą słów między agentami, a tym samym rozbudową ich słowników, pojawiają się także sukcesy, co powoduje zwiększanie odpowiednich wag dla pewnych par agentów. Zatem w dalszym ciągu dany agent komunikuje się z niektórymi agentami częściej niż z innymi, co po pewnym czasie prowadzi do utworzenia się klastra agentów znających to samo słowo, a więc mogących się ze sobą skutecznie porozumiewać. Wzrastające dzięki temu ich wzajemne preferencje (wagi) powodują, że ich próby komunikowania się koncentrują się wewnątrz klastra. To z kolei sprawia, że w takim klastrze szybko osiągnięty zostaje stan lingwistycznej synchronizacji, w którym wszystkie jego agenty posługują się tym samym językiem, to znaczy posiadają w swoich słownikach wyłącznie jedno wspólne słowo. Inaczej mówiąc, klaster staje się jednojęzyczny.

Należy podkreślić, że struktura sieci agentów wyznaczona przez wagi jest dynamiczna; podobnie jak słabe więzi między nimi (czyli te o niskich wagach) mogą stopniowo ulec wzmocnieniu, tak samo nawet bardzo silne ich połączenia (czyli te o wagach bliskich jedności) mogą z czasem osłabnąć. Odpowiedzialny za to jest parametr ε określający minimalną – co ważne, zawsze dodatnią – wartość wagi. Powoduje on, że dla dowolnej pary agentów, a zatem również dla agentów z różnych klastrów, prawdopodobieństwo ich interakcji jest zawsze niezerowe. Z kolei porozumiewanie się z agentami spoza własnego klastra może doprowadzić do zmiany klastra, do którego należy agent. Takie procesy powodują rozrost jednych klastrów kosztem innych, które ulegając wówczas stopniowej „erozji”, mogą ostatecznie nawet zaniknąć. W naukach fizycznych tego typu procesy noszą nazwę pogrubiania

(*coarsening*) i zachodzą na przykład w pewnych układach magnetycznych. Tego rodzaju zjawisko, jak również związane z nim przejście ze stanu nieuporządkowanego w uporządkowany (*disorder/order transition*), odnotowano także w innych wersjach gry w nazywanie [Baronchelli *et al.* 2006b].

Szczegóły dynamiki modelu oraz stan końcowy ewoluującego układu zależą od wartości parametrów ε oraz N . Naturalnie im większa jest wartość ε , tym częstsze są interakcje agentów z partnerami spoza własnego klastra. Podobnie jednak wpływa też na intensywność takiej pozaklasterowej komunikacji liczba agentów N , ponieważ w dużych populacjach agent należący do pewnego skończonego klastra ma tak wielu kandydatów na słuchaczy spoza tego klastra, że mimo minimalnej dla każdego z nich preferencji w sumie istnieje duża szansa trafienia na właśnie któregoś z tej dużej puli „pozaklasterowych” agentów. Należy się też spodziewać, że to nie każdy z parametrów ε i N z osobna kontroluje system, lecz raczej jakaś ich kombinacja. Choć brak jeszcze ścisłego na to dowodu, w pracy [Lipowska, Lipowski 2012] przedstawione są pewne argumenty na rzecz tego, że rolę parametru kontrolnego modelu pełni iloczyn $N\varepsilon^2$. Argumenty te opierają się na szacowaniu prawdopodobieństw najważniejszych procesów odpowiedzialnych za dynamikę pogrubiania (*coarsening*). Z kolei wyniki numeryczne uzyskiwane w trakcie symulacji modelu, które gromadzone były w różnych zestawach odpowiadających stałym wartościom $N\varepsilon^2$, wykazywały bardzo dobrą zbieżność przy rosnącej wartości N (patrz rysunki w dalszej części rozdziału), co dodatkowo potwierdza zasadność przyjętego tu założenia, że parametrem kontrolnym modelu winien być iloczyn $N\varepsilon^2$.

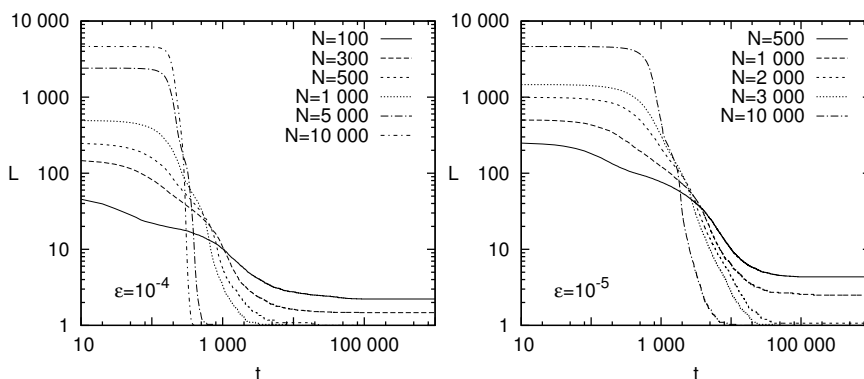
5.3. Symulacje komputerowe

Dla dokładniejszej analizy ilościowej opisanego modelu przeprowadzone zostały jego symulacje komputerowe. Przy ich pomocy badane było zachowanie modelu dla populacji o różnych liczbach agentów N . Oczywiście charakterystyki modelu zmieniają się w trakcie ewolucji systemu. Aby móc obserwować ich rozwój w funkcji czasu oraz adekwatnie porównywać obserwowane charakterystyki układów o różnej

wielkości, za jednostkę czasu w modelu przyjęto N interakcji między parami agentów (co stanowi taką liczbę gier, w której każdy agent, średnio rzecz biorąc, raz podejmuje próbę komunikacji jako mówca). Podstawowymi parametrami, których wartości mierzono w trakcie symulacji, były: sukces komunikacyjny s , liczba różnych słów L oraz liczba użytkowników języka dominującego N_d , określone w następujący sposób:

1. Sukces komunikacyjny s zdefiniowany jest jako odsetek wszystkich sukcesów odniesionych przez agenty w minionej jednostce czasu, to znaczy w trakcie ostatnich N interakcji między nimi. Należy tu zwrócić uwagę, że parametr s reprezentuje aktualny, czyli wyznaczony dla poprzedniej jednostki czasu, poziom średniego sukcesu całego układu (łącznie dla wszystkich agentów), podczas gdy parametry s_{ij} (punkt 5. definicji modelu w podrozdziale 5.2) opisują globalny poziom sukcesu odniesionego dotychczas (licząc od samego początku ewolucji układu) przez daną parę agentów, a więc niejako przechowują w sobie kompletną historię kontaktów między tymi dwoma agentami.
2. Parametr L to liczba różnych słów przechowywanych w słownikach wszystkich agentów. Na późniejszych etapach symulacji, gdy większość agentów ma już tylko po jednym słowie w swoich słownikach, L można interpretować jako liczbę języków używanych przez agenty w danym momencie ewolucji systemu.
3. Wielkość N_d oznacza liczbę agentów używających dominującego języka, to znaczy posiadających w słownikach najpopularniejsze w układzie słowo (to, które występuje w największej liczbie słowników).

W niektórych przebiegach symulacji wyznaczane były także pewne dodatkowe parametry (między innymi liczby użytkowników języków innych niż dominujący), które zostaną omówione bardziej szczegółowo w następnych podrozdziałach. W celu zredukowania fluktuacji statystycznych mierzone wielkości uśredniane były względem liczby niezależnych przebiegów symulacji modelu (których zwykle wykonywano około 100). Wyniki zebrane dla układów o różnej liczebności N (przy



Rys. 5.1. Liczba języków L w funkcji czasu t wyznaczona dla układów o różnej liczbie agentów N , przy stałej wartości parametru $\varepsilon = 10^{-4}$ oraz $\varepsilon = 10^{-5}$ odpowiednio na lewym i prawym panelu (obie osie w skali logarytmicznej) [diagram za: Lipowska, Lipowski 2012]

ustalanej zarazem wartości parametru kontrolnego modelu $N\varepsilon^2$ wykazują bardzo dobrą zbieżność badanych wielkości ze wzrostem liczby agentów N (zob. na przykład rys. 5.3 i kolejne). Jednocześnie pokazują one, że zachowanie modelu może być dwojakie, w zależności od wartości parametru kontrolnego $N\varepsilon^2$. Jak już wskazywano w poprzednim podrozdziale, im większe są wartości ε i N , tym częściej występuje komunikacja pozaklasterowa, a tym samym słabsza jest preferencja dla interakcji z tymi agentami, z którymi dotychczasowa komunikacja była skuteczniejsza. Tak więc, jeśli wartość parametru kontrolnego $N\varepsilon^2$ jest dostatecznie duża (a więc przy słabej preferencji), model zachowuje się w sposób typowy dla gry w nazywanie na grafie pełnym, a w szczególności bardzo szybko osiąga stan pełnej lingwistycznej synchronizacji (aczkolwiek pewne omówione poniżej szczegóły jego dynamiki są odmienne). Natomiast gdy wartość parametru kontrolnego $N\varepsilon^2$ jest odpowiednio mała (czyli preferencja jest mocniejsza), zachowanie modelu zupełnie się zmienia i ostatecznie to stan różnorodności językowej okazuje się stanem stabilnym modelu. Oba te reżimy działania systemu – jedno- i wielojęzykowy – przedstawione są bardziej szczegółowo w kolejnych podrozdziałach.

Zauważmy też, nawiązując do wcześniejszej dyskusji postaci parametru kontrolnego modelu $N\varepsilon^2$ (podrozdział 5.2), że ustalenie tyl-

ko jednego z jego elementów (na rys. 5.1 jest to ε) nie wystarcza do określenia, w którym reżimie działa model. Wykresy na obu panelach przebiegają w pełni analogicznie i pokazują malejącą w czasie liczbę języków w systemie. Jednakże w obu przypadkach możliwe są dwa scenariusze, zależnie od wielkości badanego układu: tak jak opisano wcześniej, im większe jest N , tym słabsza jest omawiana tu preferencja i tym szybciej układ dąży do stanu jednojęzykowego. Z drugiej jednak strony dla dostatecznie małych wartości N stanem końcowym układu okazuje się stan wielojęzykowy. Należy tu zwrócić uwagę na mocną stabilność tego stanu: pominiawszy tylko stosunkowo krótki początkowy okres ewolucji modelu, liczba języków pozostaje już później praktycznie niezmienna (przez niezmiernie długi okres, zważywszy, że czas przedstawiony jest tu na skali logarytmicznej). Reasumując, dla ustalonej wartości parametru ε model w granicy dużych N musi osiągnąć stan jednojęzykowy. Jednakże dla danej skończonej wartości parametru N układ zawsze może ustabilizować się w stanie wielojęzykowym (znów – dla odpowiednich wartości parametru ε). Przykładowo, jak widać z rys. 5.1, układy o 500 czy 1000 agentach przy $\varepsilon = 10^{-4}$ ewoluują do stanu jednojęzykowego (lewy panel), natomiast takie same układy, lecz dla mniejszej wartości $\varepsilon = 10^{-5}$, pozostają w stanie wielojęzykowym (prawy panel).

5.4. Tryb jednojęzykowy

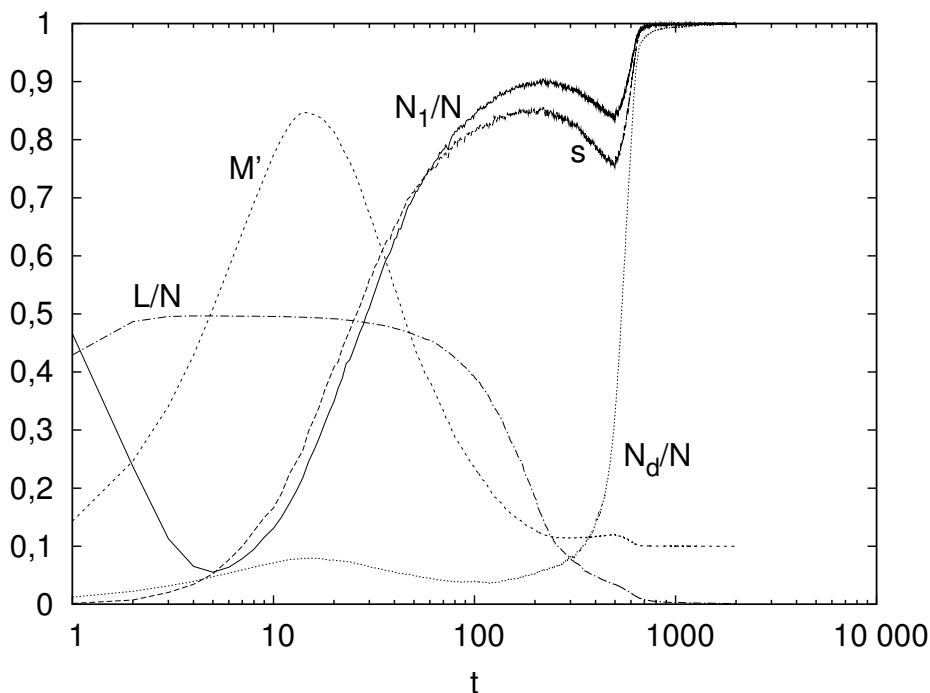
Jak już opisano w podrozdziale 5.2, w omawianym modelu po początkowym okresie jego ewolucji zaczynają się kształtować klaster, wewnątrz których agenci komunikują się między sobą sprawniej niż z agentami z zewnątrz. Dlatego też dalsze próby porozumiewania się podejmowane są głównie wewnątrz klasterów, co jest realizacją przyjętej w modelu preferencji względem lepiej komunikujących się partnerów. Niemniej dzięki dodatniej (choć bardzo małej) wartości parametru ε zawsze istnieje pewna niezerowa szansa na kontakt z agentami spoza własnego klastra – tym większa, im większe są ε i liczba agentów N . Tak więc wspomniana preferencja jest tym słabsza, albo inaczej mówiąc, komunikacja pozaklastrowa jest tym częstsza, im większa jest wartość parametru kontrolnego modelu $N\varepsilon^2$.

Jak pokazały symulacje, kiedy wartość parametru $N\varepsilon^2$ jest dostatecznie duża (np. rzędu 10^{-5}), to odpowiednio nasilająca się komunikacja pozaklasterowa (czy inaczej to ujmując, słabnąca preferencja wyboru partnerów) powoduje, że agenty coraz częściej zmieniają klaster, do których należą. To zaś oznacza wzrost intensywności procesu pogrubiania (*coarsening*), prowadzącego ostatecznie do połączenia wszystkich agentów w jeden klaster. Zatem omawiany model zachowuje się w tym przypadku podobnie jak minimalna gra w nazywanie na grafie pełnym [Baronchelli *et al.* 2006b], która, jak wiadomo, bardzo szybko osiąga stan globalnej synchronizacji (następuje tu gwałtowne przejście ze stanu nieuporządkowanego do uporządkowanego, czyli z wielo- do jednojęzykowego). I rzeczywiście, symulacje prezentowanego modelu potwierdziły zasadniczo takie właśnie jego zachowanie, wykazując jednak zarazem pewne różnice w stosunku do wariantu minimalnego.

Przeanalizujmy teraz nieco bardziej szczegółowo dynamikę modelu w trybie jednojęzykowym. Przykładowe wartości kilku wielkości charakteryzujących model, uzyskane podczas symulacji układu o liczbie agentów $N = 1000$ i minimalnej wadze $\varepsilon = 10^{-4}$ (a więc dla wartości parametru kontrolnego $N\varepsilon^2 = 10^{-5}$), pokazuje rys. 5.2.

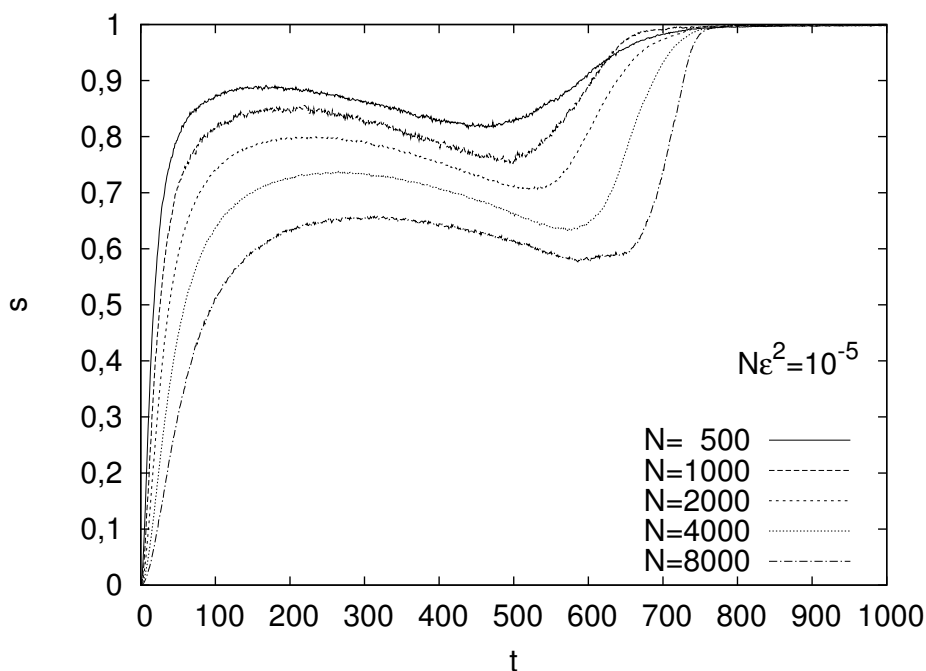
Oczywiście w pierwszym kroku symulacji głównie generowane są nowe słowa: liczba różnych słów L osiąga od razu blisko połowę liczby agentów N , niewiele się zresztą różniąc od N_1 , czyli liczby agentów z jednym słowem w słowniku (przy czym druga połowa populacji będzie wtedy dysponowała, średnio rzecz biorąc, dwoma słowami, jak wynika z liczby wszystkich słów M , wynoszącej około $1,5N$). W kolejnych krokach liczba N_1 szybko maleje, gdyż większość prób komunikacji wówczas zawodzi, przy czym agenty uczą się nowo poznanych słów, dołączając je do swoich słowników; odpowiednio liczba M wszystkich słów w słownikach agentów szybko rośnie, natomiast liczba różnych słów L nie ulega zmianie (nie rośnie, gdyż wobec niepustych już słowników kończy się etap generowania nowych słów, ale i nie maleje, gdyż wobec braku sukcesów agenty jeszcze nie „zapominają” znanych sobie słów).

Wreszcie (w okresie mniej więcej $10 < t < 200$) rozbudowa słowników zaczyna owocować coraz częstszymi sukcesami w komunikacji, co powoduje ponowny wzrost liczby N_1 i spadek liczby M (w dalszym ciągu odsetek N_1/N zmienia się już analogicznie jak poziom sukcesu).



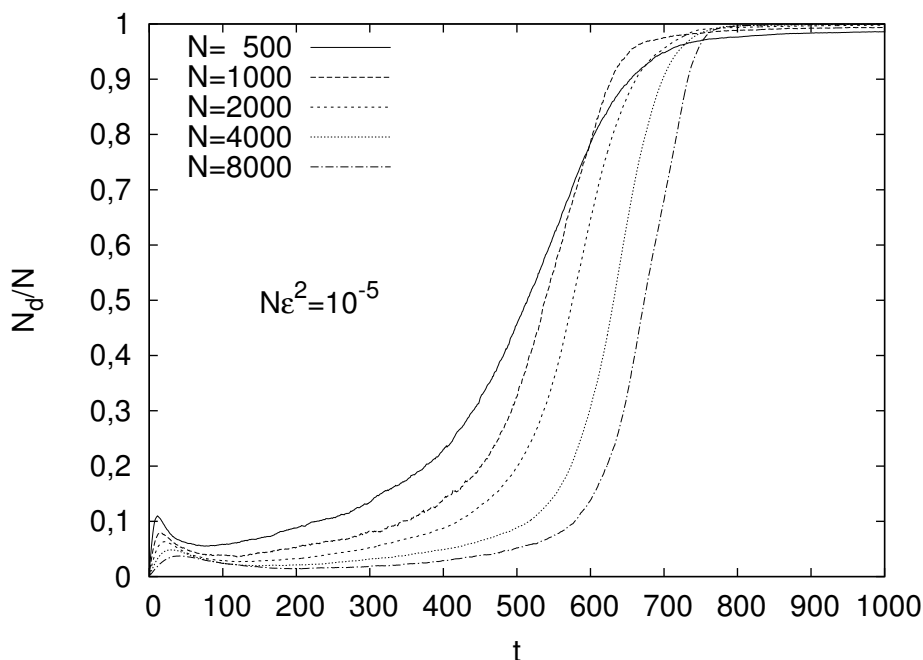
Rys. 5.2. Pięć charakterystyk modelu w funkcji czasu t (oś pozioma w skali logarytmicznej), wyznaczonych w układzie o liczbie agentów $N = 1000$ przy wartości parametru kontrolnego $N\varepsilon^2 = 10^{-5}$, czyli w trybie jednojęzykowym. Wyznaczone charakterystyki obejmują: (1) sukces komunikacyjny s , (2) stosunek liczby różnych słów do liczby agentów L/N , (3) odsetek agentów z jednym słowem w słowniku N_1/N , (4) odsetek agentów używających dominującego języka N_d/N , (5) średnią liczbę słów w słowniku agenta przeskalowaną przez 10, tzn. $M' = (M/N)/10$, gdzie M to liczba wszystkich słów w słownikach agentów [diagram z: Lipowska 2012a]

Od tego więc momentu poziom sukcesu komunikacyjnego s , początkowo bliski zeru, zaczyna szybko rosnąć (do około 80% dla $t \approx 100$; zob. też rys. 5.3). Jest to mianowicie faza, w której tworzą się jednojęzykowe klastery (czyli grupy agentów posługujących się tym samym językiem) i właśnie skuteczność odbywającej się wewnątrz nich komunikacji zapewnia ten stosunkowo wysoki poziom sukcesu. Jednak w tym okresie klastery są jeszcze bardzo liczne i zarazem niewielkie, a co za tym idzie, niezbyt stabilne.



Rys. 5.3. Sukces komunikacyjny s w funkcji czasu t , wyznaczony dla pięciu układów o różnej liczbie agentów N , przy stałej wartości parametru kontrolnego $N\varepsilon^2 = 10^{-5}$, czyli w trybie jednojęzykowym [diagram z: Lipowska, Lipowski 2012]

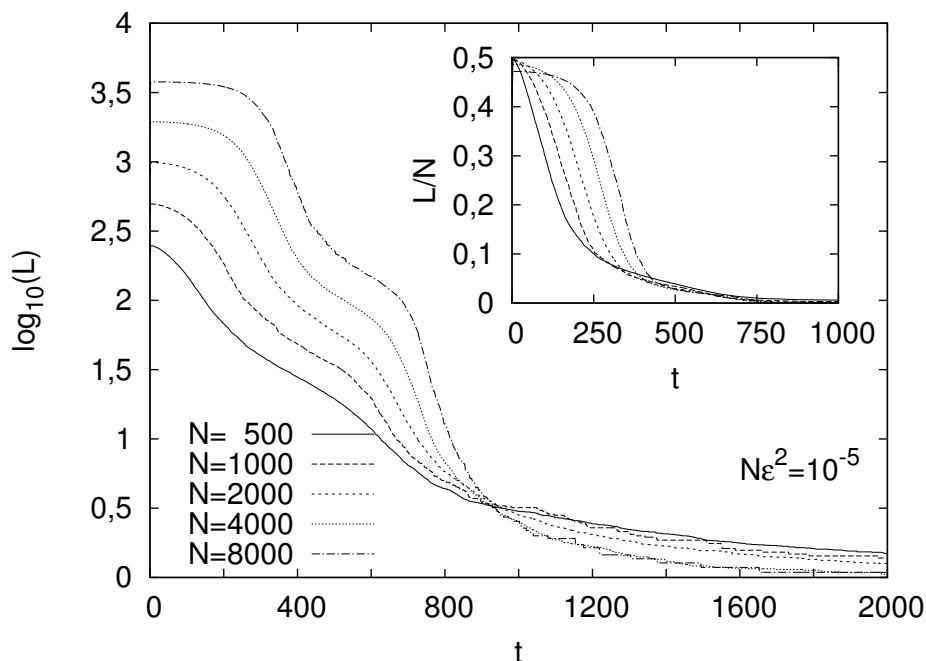
Dalej następuje więc okres przejściowy, w którym poziom sukcesu s przestaje rosnąć, a nawet przejściowo nieco się obniża. Powodem jest trwający proces wspomnianego już pogrubiania, czyli powiększania się jednych klastrów kosztem innych; w szczególności zaś zaczyna się wyłaniać język dominujący, którego używa coraz więcej agentów (liczba jego użytkowników N_d zaczyna wreszcie rosnąć; zob. też rys. 5.4). Takie przekształcanie się struktury klastrów polega na przenoszeniu się agentów pomiędzy klastrami, czemu towarzyszy właśnie chwilowe obniżenie poziomu sukcesu s . Zauważmy, że skoro większość agentów ma już tylko jedno słowo w słowniku (por. N_1 na rys. 5.2), to wszelka komunikacja pozaklastrowa musi kończyć się porażką. O ile słuchacz, który nabył w jej trakcie nowe słowo, będzie teraz (lub ewentualnie po serii takich porażek) komunikował się ze znającym je agentem, to



Rys. 5.4. Odsetek liczby agentów używających dominującego języka N_d/N w funkcji czasu t , wyznaczony dla pięciu układów o różnej liczbie agentów N , przy stałej wartości parametru kontrolnego $N\varepsilon^2 = 10^{-5}$, czyli w trybie jednojęzykowym [diagram z: Lipowska, Lipowski 2012]

odniesie sukces, na skutek którego pozostanie mu w słowniku tylko to nowe słowo – a tym samym agent ten będzie od teraz należał już do nowego klastra. Przy dużym prawdopodobieństwie komunikacji poza-klastrowej, a taką właśnie sytuację teraz omawiamy, im klastery jest większy, tym większe są szanse, że będą się do niego przenosić kolejne agenty; w ten sposób będzie się on coraz szybciej rozrastał, „zasysając” agenty z innych klastrów. Jest to przejaw działania znanej zasady *rich gets richer*, które obserwuje się między innymi przy tworzeniu sieci bezskalowych metodą preferencyjnego dołączania (*preferential attachment*) [Barabási, Albert 1999; Barabási, Bonabeau 2003], z tym że w przypadku sieci rezultatem jest tworzenie się tak zwanych *hubów*, czyli węzłów z ogromną liczbą krawędzi, natomiast tutaj odnosi się to do procesu *coarsening*, to znaczy rozrastania się klastrów. W wyniku

powiększania się niektórych klastrów kosztem innych te drugie w końcu w ogóle zanikają, co potwierdzone jest przez spadek liczby różnych słów L w systemie (por. też rys. 5.5).



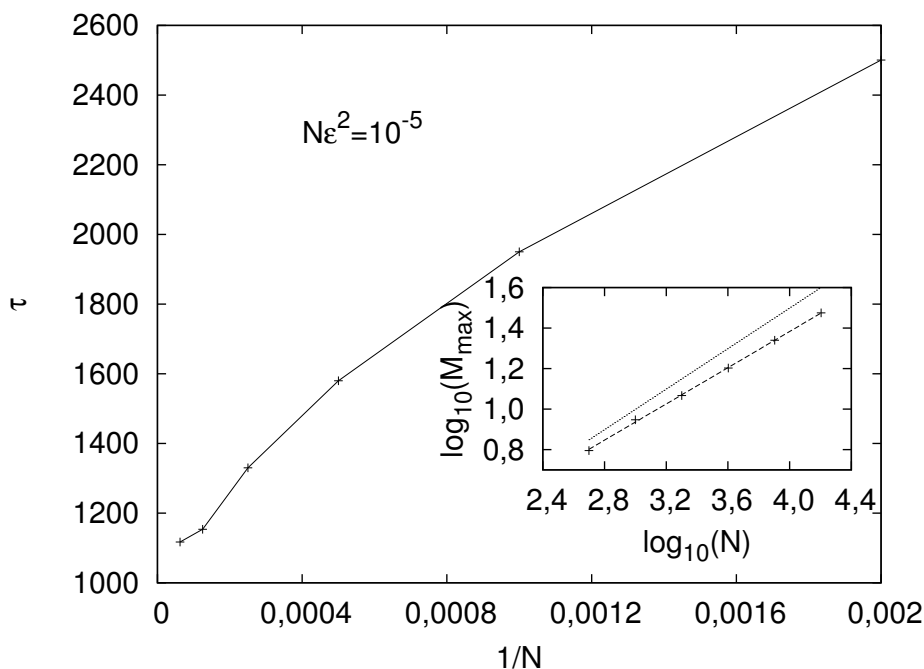
Rys. 5.5. Liczba języków L (w skali logarytmicznej) w funkcji czasu t , wyznaczona dla pięciu układów o różnej liczbie agentów N , przy stałej wartości parametru kontrolnego $N\varepsilon^2 = 10^{-5}$, czyli w trybie jednojęzykowym. Inset pokazuje znormalizowaną liczbę języków L/N w funkcji czasu t dla tych samych wartości N oraz $N\varepsilon^2$. Punkt przecięcia krzywych na głównym diagramie dla $t \approx 900$ sugeruje, że asymptotycznie w granicy $N \rightarrow \infty$ w układzie pozostaje tylko jeden język dla $t > 900$ [diagram za: Lipowska, Lipowski 2012]

I wreszcie następuje moment ($t \approx 700$), w którym nie tylko zostaje już niewielka, w porównaniu z początkową, liczba klastrów – a więc i liczba różnych języków będących w użyciu L – ale także zdecydowanie wyróżnia się wśród nich klastro największy (tak zwany *giant cluster*, obejmujący znaczącą większość agentów), co oznacza, że w układzie zaczyna dominować jeden z języków: liczba N_d/N , dotychczas stale

niewiele większa od zera, teraz skokowo rośnie do jedności, a więc dominujący język błyskawicznie obejmuje prawie całą populację. To powoduje równie gwałtowny wzrost aktualnego poziomu sukcesu komunikacyjnego s do niemal 100%. Co ciekawe, układy o różnej wielkości N osiągają te maksymalne wartości obu badanych parametrów mniej więcej w tym samym momencie ($t \approx 750$, rys. 5.3). W każdym razie niewątpliwie mamy tu do czynienia z przejściem ze stanu lingwistycznej różnorodności w stan lingwistycznej synchronizacji. Chociaż w tym czasie znormalizowana liczba używanych języków L/N dąży już do zera, to jednak nadal pozostaje jeszcze w użyciu kilka czy kilkadziesiąt języków. Jednakże i one są dość szybko eliminowane i zastępowane przez język dominujący, aż wreszcie układ staje się w pełni jednorodny (jednojęzykowy, to znaczy $L = 1$; rys. 5.5).

Jak już wspomiano, takie zachowanie modelu na adaptatywnej sieci ważonej w trybie jednojęzykowym jest jakościowo analogiczne do modelu minimalnego na grafie pełnym [Baronchelli *et al.* 2006b], jednakże zachodzą między nimi pewne różnice ilościowe, a konkretnie inna jest dynamika niektórych procesów. Wiadomo na przykład, że charakterystyczny czas τ potrzebny do osiągnięcia stanu jednojęzykowego w grze w nazywanie rośnie wraz ze wzrostem wielkości układu N . Na przykład na grafie pełnym czas ten jest proporcjonalny do $N^{1,5}$ [Baronchelli *et al.* 2006b], podobnie zresztą jak na niektórych sieciach złożonych [Dall'Asta *et al.* 2006b], zaś do N^2 i N^3 na sieciach regularnych odpowiednio dwu- i jednowymiarowych [Baronchelli *et al.* 2006c]. Natomiast na omawianej tu adaptatywnej sieci ważonej charakterystyczny czas τ nie rozbiega się z rosnącym N , lecz jest zbieżny, najprawdopodobniej do stałej wartości około 1050 (rys. 5.6), w przybliżeniu zgodnej ze skalą czasową obserwowaną w zachowaniu innych wielkości modelu (s , N_d/N czy L). Z kolei średnia (na jednego agenta) maksymalna liczba wszystkich słów w słownikach M_{max} w przypadku grafu pełnego rośnie asymptotycznie jak $N^{0,5}$ [Baronchelli *et al.* 2006b], zaś dla wspomnianych wyżej sieci złożonych i regularnych jest skończona (nie zależy od N , lecz od średniego stopnia wierzchołków) [Dall'Asta *et al.* 2006b; Baronchelli *et al.* 2006c]. Natomiast w przypadku adaptatywnej sieci ważonej, jak wynika z rys. 5.6, uzyskane wyniki numeryczne wskazują, że M_{max} rośnie asymptotycznie jak $N^{0,45}$. Takie odchylenie ponownie potwierdza, że dynamika omawianego tu modelu, chociaż jakościowo

podobna, różni się jednak zarówno od dynamiki modelu minimalnego na grafie pełnym, jak też od wersji na sieciach regularnych czy złożonych. Porównując te wszystkie modele, widzimy, że adaptatywne sieci ważne są optymalne, jeśli chodzi o czas charakterystyczny (czas zbieżności do stanu jednojęzykowego), zaś ich wymagania pamięciowe są co prawda mniejsze niż dla grafu pełnego (bo rozmiar słownika agenta rośnie wolniej wraz ze wzrostem liczby agentów), ale zarazem nie są aż tak małe jak w przypadku sieci regularnych (gdzie są skończone).



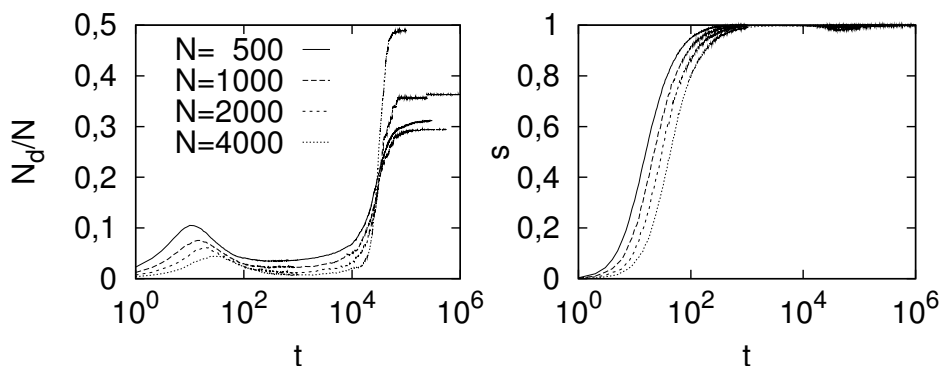
Rys. 5.6. Średni czas potrzebny do osiągnięcia stanu jednojęzykowego τ w zależności od wielkości układu N . Obliczenia przeprowadzono dla sześciu układów o liczbie agentów $N = 500, 1000, 2000, 4000, 8000$ oraz $16\,000$, przy wartości parametru kontrolnego $N\epsilon^2 = 10^{-5}$, czyli w trybie jednojęzykowym. Dla każdego N wykonano po 100 niezależnych przebiegów symulacji. Inset pokazuje średnią maksymalną liczbę słów w słownikach agentów M_{max} w zależności od wielkości układu N (w skali podwójnie logarytmicznej). Linia przerywana jest dofitowana i ma nachylenie 0,45, co odpowiada zależności $M_{max} \sim N^{0,45}$. Linia kropkowana odpowiada grafowi pełnemu i ma nachylenie 0,5

5.5. Tryb wielojęzyczny

Gdy wartość parametru $N\varepsilon^2$ jest dostatecznie mała (przykładowo rzędu 10^{-9}), a tym samym preferencja wobec lepiej komunikujących się partnerów dostatecznie silna, próby komunikacji pozaklasterowej stają się bardzo rzadkie, co radykalnie zmienia zachowanie się modelu. Staje się ono wówczas dużo bardziej interesujące z punktu widzenia badania problemu różnorodności językowej w ramach modelu gry w nazywanie. Jak widać na rys. 5.7, chociaż sukces komunikacyjny także w tym przypadku osiąga dość szybko ($t \approx 1000$) maksymalną wartość (zob. prawy panel rysunku), to jednak w tym samym czasie odsetek agentów używających języka dominującego jest wciąż niewiele większy od zera (por. lewy panel). Dopiero po czasie $t \approx 30\,000$ liczba ta istotnie wzrasta, co sugeruje faktyczne wyłanianie się języka dominującego. Nie obejmuje on jednak całej populacji, gdyż wciąż utrzymują się jeszcze inne języki, i to najwyraźniej przez dowolnie długi czas. Jak widać na rys. 5.8, liczba różnych słów w słownikach agentów (liczba języków) maleje bardzo powoli i dopiero po czasie $t \approx 100\,000$ stabilizuje się na poziomie $L \approx 10$ (przy czym, jak pokazuje inset tego diagramu, liczba ta stanowi już tylko znikomy ułamek liczby agentów N). Ta sytuacja nie ulega już zmianie, nawet do $t \approx 1\,000\,000$, a więc osiągnięty w modelu stan wielojęzyczny okazuje się stanem stabilnym układu.

W działaniu modelu w trybie wielojęzycznym dają się wyróżnić trzy fazy. W pierwszej fazie (dla $t < 1000$) liczba różnych słów w słownikach agentów L jest tak duża (początkowo nawet rzędu $N/2$), przy niewielkim zarazem średnim sukcesie komunikacyjnym s , że fazę tę można chyba określić mianem prelingwistycznej. Początkowo układ pozostaje w stanie całkowitego nieuporządkowania, co znaczy, że nie wykształciły się w nim jeszcze klasterzy. Stopniowe ich wyłanianie się powoduje jednak systematyczny wzrost poziomu sukcesu komunikacyjnego, przy jednoczesnym zmniejszaniu się liczby używanych słów (do około $0,2N$).

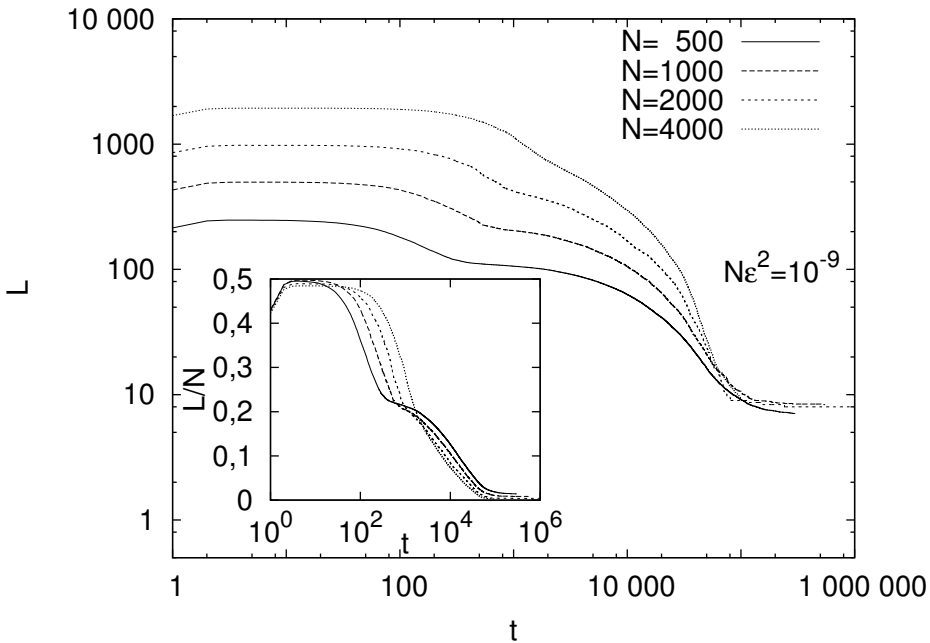
W następnej fazie ($1000 < t < 30\,000$) – mimo mnogości istniejących języków – agenty potrafią się już skutecznie porozumiewać (poziom sukcesu komunikacyjnego jest maksymalny). Prawie wszystkie agenty mają już tylko po jednym słowie w słowniku (jak widać na rys. 5.9, zarówno N_1 – liczba agentów z dokładnie jednym słowem



Rys. 5.7. Lewy panel: odsetek N_d/N liczby agentów używających języka dominującego w funkcji czasu t , wyznaczony dla czterech układów o różnej liczbie agentów N , przy stałej wartości parametru kontrolnego $N\epsilon^2 = 10^{-9}$, czyli w trybie wielojęzycznym. Prawy panel: sukces komunikacyjny s w funkcji czasu t dla tych samych wartości N oraz $N\epsilon^2$. Czas w obu przypadkach przedstawiony jest w skali logarytmicznej [diagram z: Lipowska, Lipowski 2012]

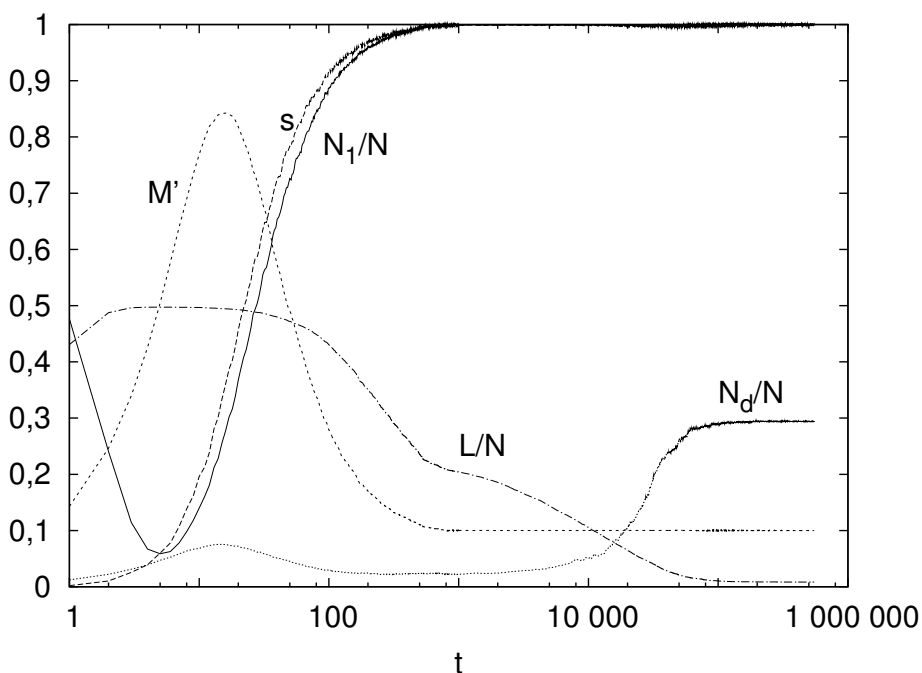
w słowniku, jak i M – liczba wszystkich słów w słownikach agentów, są w zasadzie równe liczbie agentów N), zatem wszystkie agenty dysponują już określonym językiem. Na tym etapie każdy agent należy więc już do jakiegoś klastra, a zarazem wyłaniająca się struktura klastrów jest nieco bardziej stabilna niż w fazie poprzedniej, gdyż jak widać, tempo spadku liczby języków L wyraźnie zwalnia. Choć więc liczba języków w tym okresie powoli maleje (zachodzi proces pogrubiania, czyli wzrost jednych klastrów kosztem innych), to wciąż utrzymuje się na stosunkowo wysokim poziomie – na przykład dla układu $N = 1000$ agentów z rys. 5.9 spada mniej więcej z 200 do 50, czyli z $0,2N$ do $0,05N$. Co ważniejsze jednak, nadal jeszcze żaden język nie wyróżnia się jako istotnie dominujący, czyli taki, którym posługiwałaby się znacząco większa od innych grupa agentów ($N_d/N \ll 1$).

I wreszcie w fazie trzeciej ($t > 30\,000$) ostatecznie wyłania się język dominujący, którego liczba użytkowników N_d , na przykład dla układu z rys. 5.9, wzrasta finalnie do około 30% populacji. Nie tylko więc język dominujący nie obejmuje całej populacji, jak w trybie jednojęzycznym, ale nawet nie włada nim bezwzględna większość agentów. W innych badanych układach (rys. 5.7) jest zresztą podobnie, aczkolwiek można



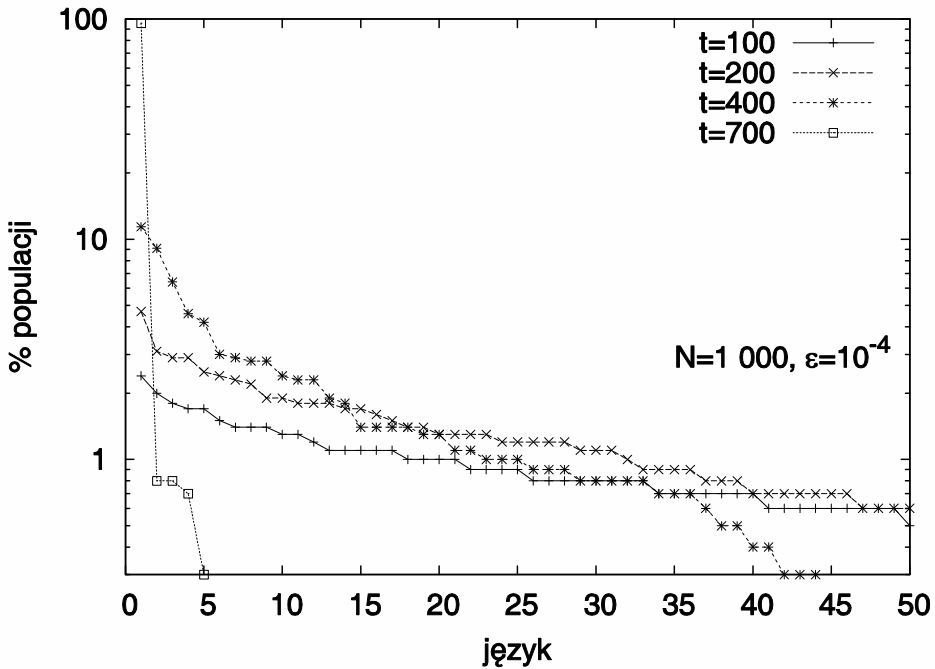
Rys. 5.8. Liczba języków L (w skali logarytmicznej) w funkcji czasu t , wyznaczona dla czterech układów o różnej liczbie agentów N , przy stałej wartości parametru kontrolnego $N\varepsilon^2 = 10^{-9}$, czyli w trybie wielojęzykowym. Inset pokazuje znormalizowaną liczbę języków L/N w funkcji czasu t dla tych samych wartości N oraz $N\varepsilon^2$. Czas w obu przypadkach przedstawiony jest w skali logarytmicznej [diagram z: Lipowska, Lipowski 2012]

przy tym zauważyć, że wraz ze wzrostem liczby agentów N wyłanianie się języka dominującego w układzie następuje coraz gwałtowniej, a jego użytkownicy stanowią w efekcie coraz większą część populacji, przekraczając zapewne jej połowę dla dostatecznie licznych układów. Niemniej użytkownicy kilku pozostałych języków również tworzą dość duże grupy (zob. też rys. 5.11). Finalnie liczba używanych języków L spada do około dziesięciu. Ostatecznie więc populacja dzieli się na kilka dużych i stabilnych klastrow, których liczebność nie ulega już raczej dalszym zmianom. Zatem wielojęzykowość okazuje się cechą stałą systemu, jako że agenci z różnych klastrow posługują się przecież różnymi językami (przy czym dzięki pełnej synchronizacji językowej komunikacja wewnątrz każdego klastra staje się maksymalnie skuteczna).



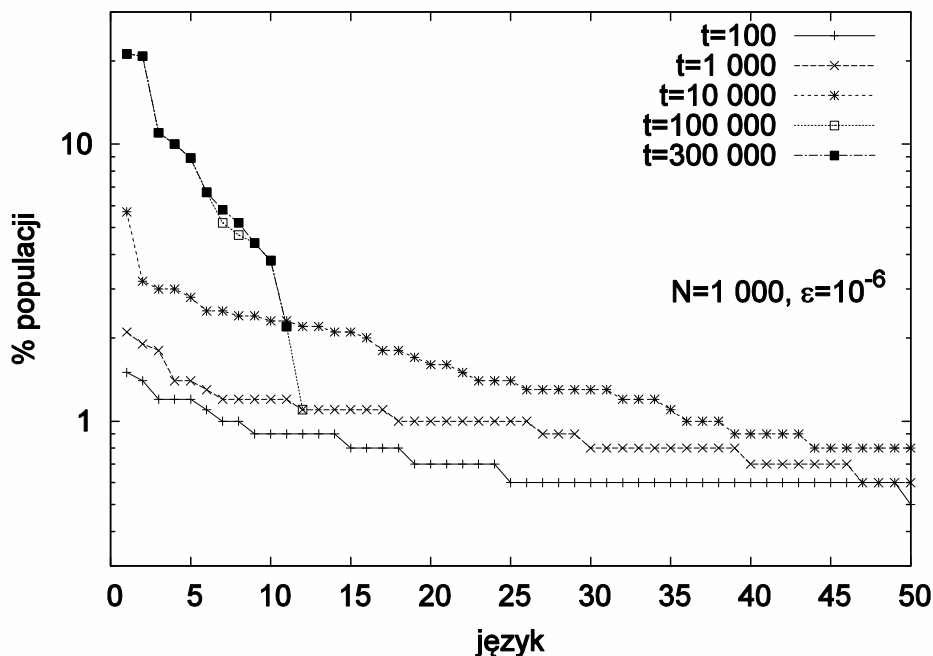
Rys. 5.9. Pięć charakterystyk modelu w funkcji czasu t (oś pozioma w skali logarytmicznej), wyznaczonych w układzie o liczbie agentów $N = 1000$ przy wartości parametru kontrolnego $N\varepsilon^2 = 10^{-9}$, czyli w trybie wielojęzycznym. Wyznaczone charakterystyki obejmują: (1) sukces komunikacyjny s , (2) stosunek liczby różnych słów do liczby agentów L/N , (3) odsetek agentów z jednym słowem w słowniku N_1/N , (4) odsetek agentów używających dominującego języka N_d/N , (5) średnia liczba słów w słowniku agenta przeskalowana przez 10, tzn. $M' = (M/N)/10$, gdzie M to liczba wszystkich słów w słownikach agentów [diagram z: Lipowska 2012a]

Dla obu trybów (jednojęzycznego – rys. 5.10 oraz wielojęzkowego – rys. 5.11) zmierzone też zostały liczebności użytkowników pięćdziesięciu najpowszechniej używanych języków badanego modelu (przy stałej wielkości układu $N = 1000$) w różnych momentach symulacji. Te dwa tryby różnią się ewidentnie okresem czasu, w jakim system osiąga stan stabilny: jest on bowiem stukrotnie dłuższy w trybie wielojęzkowym ($t \approx 100\,000$) niż w jednojęzkowym ($t \approx 1000$). W obu przypadkach w obserwowanym czasie początkowo zwiększa się liczeb-



Rys. 5.10. Odsetek populacji (w skali logarytmicznej), jaki stanowią użytkownicy 50 najpopularniejszych języków, wyznaczony dla układu $N = 1000$ agentów oraz $N\varepsilon^2 = 10^{-5}$ (a więc w trybie jednojęzykowym), dla różnych długości czasu symulacji $t = 100, 200, 400$ i 700 . Dla większej przejrzystości diagramu punkty odpowiadające kolejnym językom w tym samym czasie zostały połączone. Prezentowane wyniki uzyskano w pojedynczym przebiegu symulacji, czyli bez uśredniania [diagram za: Lipowska, Lipowski 2012]

ność badanych języków kosztem innych – głównie tych jeszcze mniej rozpowszechnionych, to znaczy spoza pierwszej pięćdziesiątki (na obu rysunkach pierwsze trzy krzywe przebiegają horyzontalnie, kolejno jedna nad drugą). Dopiero na końcowych etapach ewolucji systemu zanika także większość języków spośród owych 50: w trybie jednojęzykowym w $t = 700$ pozostaje już zaledwie 5 języków, zaś w $t = 1000$ – jest już praktycznie tylko jeden język; natomiast w trybie wielojęzykowym w $t = 100\,000$ wciąż funkcjonują różne języki (jest ich wtedy jeszcze 12), przy czym ich liczebności nie ulegają właściwie większym



Rys. 5.11. Odsetek populacji (w skali logarytmicznej), jaki stanowią użytkownicy 50 najpopularniejszych języków, wyznaczony dla układu $N = 1000$ agentów oraz $N\epsilon^2 = 10^{-9}$ (a więc w trybie wielojęzycznym), dla różnych długości czasu symulacji $t = 100, 1000, 10\,000, 100\,000$ i $300\,000$. Dla większej przejrzystości diagramu punkty odpowiadające kolejnym językom w tym samym czasie zostały połączone. Prezentowane wyniki uzyskano w pojedynczym przebiegu symulacji, czyli bez uśredniania [diagram za: Lipowska, Lipowski 2012]

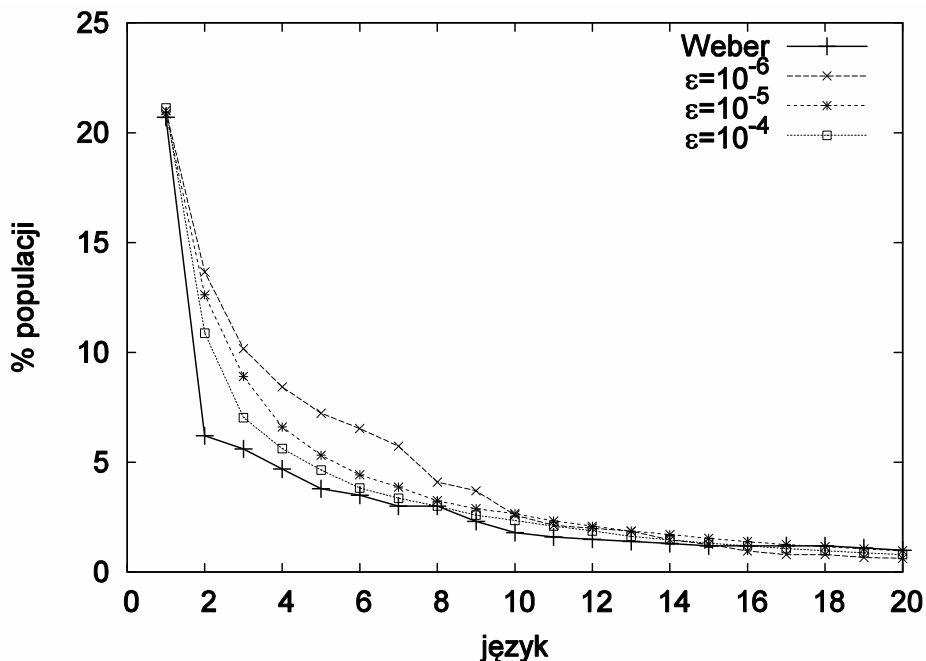
zmianom przez bardzo długi czas, czyli aż do $t = 300\,000$, kiedy to zanika jeszcze jeden język (ten o najmniejszej liczbie użytkowników).

Ponadto dwa omawiane tryby różnią się też wyraźnie stopniem dominacji najpopularniejszego języka. W trybie jednojęzykowym języka dominującego (czyli pierwszego na liście 50 badanych języków) w momencie $t = 100$ używa około 2,5% populacji, w $t = 700$ – już 96%, zaś w $t = 1000$ – ponad 99%. Zatem język ten błyskawicznie się rozprzestrzenia, obejmując praktycznie całą populację. Natomiast w trybie wielojęzycznym odsetki te wynoszą zaledwie odpowiednio 1,5% dla $t = 700$ i 2% dla $t = 1000$, i także później rosną bardzo powoli, dla

przykładu do jedynie 6% dla $t = 10\,000$; nawet po bardzo długim czasie $t = 100\,000$ wciąż jest to tylko 21% – i na tym poziomie sytuacja już się zupełnie stabilizuje. Ponadto wszystkie pozostałe wówczas języki mają zbliżoną liczebność (od 2% do 21% populacji), zatem żaden z nich nie dominuje na tyle, aby używała go większość populacji. Tak więc ewolucja modelu istotnie przebiega różnie w dwóch zaobserwowanych trybach. Należy też zauważyć, że o przeżyciu języka nie decyduje sama tylko liczba jego użytkowników, ale również wartość parametru kontrolnego $N\varepsilon^2$ (bowiem w początkowych stadiach rozwoju stanu jednojęzykowego także istnieją różne języki o dużych liczebnościach, podobnie jak w trybie wielojęzykowym, a jednak wszystkie one zostają szybko wyeliminowane przez jeden język, obejmujący ostatecznie całą populację).

Nasuwa się pytanie, czy zachowanie omawianego modelu można porównywać z ewolucją języka naturalnego. Obecnie istnieje jeszcze ponad sześć tysięcy języków etnicznych, jednak liczba ich wciąż się zmniejsza, i to w zaskakująco szybkim tempie [Moseley 2010; Lewis 2009]. Według optymistycznych szacunków pod koniec obecnego stulecia pozostanie w użyciu już tylko połowa z nich, zaś scenariusz pesymistyczny przewiduje, że będzie to zaledwie jedna dziesiąta obecnie używanych języków [UNESCO 2003]. W każdym razie na pewno nie jest to jeszcze stan stabilny. W chwili obecnej nie można oczywiście przewidzieć, czy dalszy rozwój naszego systemu języków doprowadzi do stanu jedno- czy wielojęzykowego. Możemy natomiast porównać aktualne dane statystyczne dotyczące liczby użytkowników poszczególnych języków [Weber 1997] z analogicznymi danymi uzyskanymi w modelu. Zestawienie takich danych dla dwudziestu najpowszechniejszych języków w różnych trybach działania modelu przedstawia rys. 5.12. Widzimy tu, że zgodność z danymi Webera jest dość wysoka, zwłaszcza w przypadku trybu jednojęzykowego. W każdym z badanych układów symulacje komputerowe prowadzone były tak długo, aż użytkownicy języka dominującego stanowili 20,7% populacji, czyli tyle, ile stanowią użytkownicy języka chińskiego, najpowszechniejszego według danych Webera. Jak widać na diagramie, rozkłady uzyskane w modelu są zbliżone do rozkładu danych statystycznych, a zgodność ta wyraźnie poprawia się wraz ze wzrostem wartości parametru ε . Innymi słowy, rozkład liczebności użytkowników poszczególnych języków uzyskany dla

modelu w trybie jednojęzykowym jest bliższy danym Webera niż rozkład otrzymany w trybie wielojęzykowym.



Rys. 5.12. Procentowy rozkład liczebności użytkowników dwudziestu najpopularniejszych języków, wyznaczony w układach o liczbie agentów $N = 1000$ dla trzech wartości parametru $\epsilon = 10^{-6}$, 10^{-5} i 10^{-4} , w porównaniu z danymi statystycznymi Webera [1997], według których trzy pierwsze języki to: chiński (20,7% populacji, czyli $1,1 \cdot 10^9$ użytkowników), angielski (6,2% – $3,2 \cdot 10^8$) i hiszpański (5,6% – $3,0 \cdot 10^8$). Symulacje w każdym z trzech przypadków prowadzone były tak długo, aż język dominujący w badanym układzie obejmował 20,7% populacji, czyli wartość taką jak w danych statystycznych. Zgodność poszczególnych rozkładów uzyskanych w modelu z danymi Webera poprawia się wraz ze wzrostem wartości parametru ϵ , jest więc lepsza dla trybu jednojęzykowego niż dla wielojęzykowego

W istocie taka zbieżność może być jednak przypadkowa i wcale nie musi wynikać z analogicznego przebiegu ewolucji języka naturalnego i języka agentów, w szczególności zaś nie upoważnia nas do wyciągnięcia wniosku o dążeniu systemu języków etnicznych do stanu jednojęzykowego. Na aktualny rozkład liczebności użytkowników języków

naturalnych dominujący wpływ wywierają przede wszystkim czynniki demograficzne i różnorodne inne z nimi związane (polityczne, ekonomiczne itd.), których nie sposób uwzględnić w tak elementarnym modelu jak gra w nazywanie (gdzie już samo jego założenie o stałej liczbie agentów nie jest realistyczne). Być może więc właściwsze byłoby porównanie danych z modelem z danymi dotyczącymi wyselekcjonowanej grupy języków spełniających pewne dodatkowe warunki, choć częściowo redukujące wpływ wspomnianych czynników. Mogłyby to być na przykład języki, których użytkownicy nie są w jakiś sposób rozdzieleni (na przykład barierami geograficznymi) i wciąż pozostają ze sobą w żywych kontaktach oraz mają zbliżone tempo wzrostu demograficznego. Przykładowo, można by się ograniczyć do języków Europy, albo nawet do dialektów tego samego języka. Przy takich warunkach rzeczywista sytuacja byłaby zapewne lepiej skorelowana z symulowanym modelem i porównywanie ich odpowiednich danych byłoby bardziej uzasadnione. Niewątpliwie jednak mechanizmy leżące u podstaw ewolucji języka człowieka są zbyt złożone, aby udało się je w pełni opisać przy pomocy tak prostego modelu. Niemniej wydaje się, że prezentowany model poprawnie opisuje przynajmniej pewien aspekt tego skomplikowanego procesu.

5.6. Wnioski

W niniejszym rozdziale przedstawiony został model gry w nazywanie rozgrywanej na adaptatywnej sieci ważonej. Zaobserwować tu można dwojakie zachowanie się modelu w zależności od wartości pewnych jego parametrów, które wyznaczają stopień preferowania partnerów interakcji ze względu na poziom odniesionych z nimi dotychczas sukcesów komunikacyjnych. W sytuacji gdy owa preferencja jest zaniebdywalnie mała, jakościowo model zachowuje się podobnie do typowego przypadku gry w nazywanie na grafie pełnym, to znaczy bardzo szybko osiąga stan pełnej lingwistycznej synchronizacji, w którym praktycznie wszystkie agenty używają tego samego języka. Odnotować można tu jednak pewne różnice ilościowe, a mianowicie co do tempa wzrostu średniej liczby słów w słownikach agentów oraz czasu, w którym osiągany jest stan jednojęzykowy, w zależności od liczby agentów (zob. podrozdział 5.4).

Z drugiej strony, gdy owa preferencja jest istotnie większa, zachowanie modelu staje się znacznie ciekawsze, jako że system nie osiąga wówczas pełnej synchronizacji, lecz ewoluuje do stanu, w którym pozostaje więcej niż jeden język (w przeprowadzonych symulacjach było ich kilka lub kilkanaście). Dają się tu wyróżnić trzy etapy owej ewolucji. Pierwszą fazę można by określić mianem prelingwistycznej ze względu na niski stopień odnoszonych wtedy przez agenty sukcesów komunikacyjnych. W fazie drugiej owych sukcesów jest już znacznie więcej, ale żaden spośród wielu istniejących języków nie wyróżnia się jeszcze jako dominujący. Jednakże z upływem czasu model osiąga wreszcie etap trzeci, w którym nie tylko istotnie zmniejsza się liczba języków, ale też jeden z nich osiąga przewagę nad pozostałymi.

Skoro wszystkie języki w tak ewoluującym systemie są dynamicznie równoważne, w tym sensie, że sama dynamika modelu nie faworyzuje żadnego z języków (to znaczy rozwój czy zanikanie każdego z nich są tak samo prawdopodobne), to wyłonienie się języka dominującego może być uważane za pewnego rodzaju **spontaniczne złamanie symetrii**. Zbliżone do tego efekty pojawiają się między innymi w pewnych układach fizycznych i na przykład towarzyszą przejściom fazowym (typu ferromagnetyk/paramagnetyk albo przewodnik/nadprzewodnik) lub deformacjom (jak nieuchronne wyginanie się izotropowego pręta w wyniku przyłożenia siły równoległej do osi pręta). Zarówno w modelach językowych, jak i układach fizycznych zjawiska takie są wynikiem oddziaływania wielu elementów układu (agentów, atomów itp.) i wyraziście manifestują one uniwersalność zachowań systemów złożonych. Ponadto nie można też całkowicie wykluczyć i takiej możliwości, że dla omawianego tu modelu stan wielojęzyczny jest stanem metastabilnym, a więc takim, w którym wartości opisujących go charakterystyk praktycznie nie zmieniają się w czasie, jednakże układ po zaburzeniu (na przykład przez dostatecznie silne fluktuacje) może nie wrócić już do tego samego stanu, lecz znaleźć się w innym (tu: jednojęzycznym). Dlatego też byłoby nader interesującym, zwłaszcza z fizycznego punktu widzenia, zbadać bardziej szczegółowo naturę i stabilność fazy wielojęzkowej. Rysują się tutaj ciekawe powiązania zwłaszcza z układami szklanymi, a także z modelami opisującymi **dynamikę opinii** na sieciach złożonych o silnej strukturze modułowej [Castelló *et al.* 2007].

Ciekawe analogie możemy znaleźć zwłaszcza w modelach formowania się opinii, czy ogólniej w modelach tak zwanych **procesów kontaktowych**, w których między węzłami sieci przekazywana jest pewna własność (na przykład informacja albo infekcja). Również w niektórych ich wersjach agenty mogą osiągać globalny konsensus, albo też ich układ ulega polaryzacji bądź fragmentacji na odrębne klaster [Gil, Zanette 2006; Holme, Newman 2006; Kozma, Barrat 2008]. Jak zauważają Balazs Kozma i Alain Barrat [2008, s. 016102-9], scenariusze ewolucji modeli na sieciach adaptatywnych są znacznie bogatsze i ciekawsze niż na sieciach statycznych, co uzasadnia konieczność dalszych badań zachowań kolektywnych wyłaniających się w ramach systemów złożonych o zmiennej topologii (zwłaszcza że założenie, iż badane sieci są dynamiczne, to znaczy zmieniają się z upływem czasu, wydaje się bardziej realistyczne niż przypadek statyczny).

Brian Skyrms i Robin Pemantle [2000, s. 9340] jako jedni z pierwszych podkreślali wagę badania nie tylko **dynamiki gry**, lecz także **dynamiki rozwoju struktury sieci**, na której jest ona rozgrywana, dla dalszego rozwoju teorii gier i strategii adaptacyjnych. Wskazywali oni, że skoro dynamika interakcji zależy od organizacji sieci, a z kolei struktury wielu sieci, między innymi biologicznych czy społecznych, są płynne, to realistyczne wyniki można uzyskać jedynie, badając, jak ta zmienność sieci wpływa na interakcje na niej i odwrotnie. W analizowanych przez nich modelach badacze zaobserwowali na przykład spontaniczne wyłanianie się różnych struktur z początkowo jednorodnych układów.

Bernd Blasius i Thilo Gross [2009, s. 63-65, 72-74] także zwracają uwagę na powszechność występowania sieci adaptatywnych (od biologii, ekologii, neuronauki i epidemiologii, po socjologię, ekonofizykę czy informatykę), dobitnie kontrastującą ze słabym zaawansowaniem badań nad nimi. Stawia się w takich badaniach dwa zasadnicze pytania: jaka jest dynamika ewoluującej sieci (czyli jak zmienia się jej topologia i jak kształtują się wartości jej podstawowych własności topologicznych) oraz jaka jest dynamika rozwoju danego systemu na sieci, wtedy gdy każdy jej węzeł sam stanowi pewien zmienny w czasie obiekt. Dotychczas badacze zajmowali się najczęściej jednym tylko z aspektów, badając statyczny system na ewoluującej sieci lub dynamiczny system na sieci statycznej. Niewątpliwie jednak jest wiele **sieci koewoluują-**

cyh, czyli takich, w których łączą się oba te procesy. Występują w nich wówczas skomplikowane interakcje obu dynamik i ich wzajemne sprzężenia: zmieniająca się topologia sieci wpływa na to, jak rozwija się na niej dany system, a ewoluujący system determinuje przebieg rozwoju sieci (i wtedy mówimy właśnie o **sieciach adaptatywnych**).

Jeśli stan systemu na danej sieci zmienia się dużo szybciej lub dużo wolniej niż sama sieć, to mówimy o **odseparowaniu skal czasowych** obu dynamicznych systemów; w takim przypadku ich wzajemne oddziaływanie zapewne będzie słabe, ale nawet wtedy daje się zaobserwować efekt adaptatywności [Gross, Blasius 2008, s. 263; Blasius, Gross 2009, s. 71 i 102]. Efekt ten ulega natomiast istotnemu wzmocnieniu w sytuacji, gdy obie ewolucje – sieci i systemu na niej – przebiegają w podobnych skalach czasowych. Jak podkreślają Gross i Blasius [2008, s. 268], taka koewolucja prowadzi do intensywnej samoorganizacji systemu, a w szczególności do zjawisk takich, jak: przejścia między jakościowo różnymi stanami systemu, wyłanianie się klas węzłów zróżnicowanych funkcjonalnie lub topologicznie (tak zwany „spontaniczny podział pracy” powoduje, że sieć stopniowo zatracą swój początkowo homogeniczny stan, w którym wszystkie węzły miały taki sam status), powstawanie złożonych globalnych topologii nawet w elementarnych modelach opartych na bardzo prostych regułach lokalnych i wreszcie (bardziej niż w modelach nieadaptatywnych) złożone funkcjonowanie systemu, wynikające z faktu, że pewne dotyczące go globalne informacje stają się w pewnym sensie „topologicznie zakodowane” i dzięki temu mogą być też dostępne lokalnie dla poszczególnych węzłów.

Modele procesów kontaktowych (w których pomiędzy węzłami sieci przekazywana jest pewna ich własność, taka jak informacja, język, opinia, wyznanie, infekcja itp.) są szczególnie dobrym polem dla badań koewolucji sieci i działających na nich systemów ze względu na ich silne sprzężenia zwrotne, na skutek których ich rozwój przebiega w zbliżonych skalach czasu. Dla większości badanych modeli określona w nich dynamika daje się zakwalifikować do jednego z dwóch podstawowych typów, które dobrze charakteryzuje potoczne stwierdzenie, że „podobieństwa (albo przeciwieństwa) się przyciągają”. Konkretniej, znaczy to, że ewolucja tych modeli prowadzi do wzmocnienia połączeń między tymi węzłami sieci, które są w takim samym lub podobnym stanie (albo też odpowiednio są w różnych stanach). Jak zauważają Gross

i Blasius, w modelach pierwszego rodzaju wykształcają się sieci heterogeniczne (niekiedy nawet bezskalowe) o zróżnicowanych funkcjonalnie (topologicznie) klasach węzłów, podczas gdy w drugim przypadku sieci pozostają homogeniczne, ewentualnie z potęgowym rozkładem wag połączeń między węzłami.

Wracając do modelu omawianego w niniejszym rozdziale, to (gdy działa on w reżimie wielojęzycznym) jego początkowo jednorodna populacja agentów stopniowo dzieli się na kilka podgrup, z których każda ma swój własny język, inny od pozostałych. Co najważniejsze, taka struktura odrębnych wspólnot komunikacyjnych nie jest predefiniowana, czyli nie jest ustalana w populacji początkowej, ale wyłania się samorzutnie, wyłącznie jako naturalny rezultat samej dynamiki interakcji agentów – czyli dzięki samoorganizacji systemu. Ponadto możemy z pewnością stwierdzić, że skale czasowe rozwoju sieci oraz gry w nazywanie są ze sobą silnie sprzężone (co jak wyżej wspomniano, w ogólności nie jest *a priori* przesądzone), bowiem ewolucja wag połączeń między agentami postępuje tu w ślad za synchronizacją osiąganą przez nich w grze w nazywanie. Można powiedzieć, że stan sieci odzwierciedla stan gry, a przebieg gry jest determinowany przez kształt sieci. Wagi połączeń sieci wyznaczone są przez poziom sukcesu komunikacyjnego agentów. Ponieważ poziom ten określany jest w oparciu o całą historię interakcji agentów, wagi (definiujące topologię sieci) pozostają zawsze nieco „w tyle” za postępującym procesem synchronizacji języka. W szczególności, nawet gdy system osiągnie już pełną zgodność w stanie jednojęzycznym, wagi będą nadal ewoluowały (granicznie do wartości $1 + \varepsilon$). Interesującym tematem do dalszych badań pozostaje dokładniejsza analiza koewolucji sieci i systemu w różnych innych wariantach naszego modelu, na przykład z poziomem sukcesu komunikacyjnego agentów wyznaczanym na podstawie tylko pewnej skończonej liczby ich ostatnich interakcji. Aczkolwiek, jeśli Gross i Blasius [2008] mają rację, podkreślając aspekt silnej i w dużym stopniu niezależnej od warunków początkowych samoorganizacji sieci adaptatywnych, to możemy się także dla innych wariantów naszego modelu spodziewać podobnych wyników.

Podsumowanie

*Will we be able to improve our intuition
about complex dynamics
enough to render simulation unnecessary?
The answer is clearly no.*

John D. Sterman

Rudi Keller [1994] przedstawił i gruntownie uzasadnił swoją tezę, że język jest **zjawiskiem trzeciego rodzaju**: nie jest to zjawisko naturalne, jak organizmy żywe, ani nie jest to artefakt, czyli dzieło celowo stworzone przez człowieka, jak nasze narzędzia czy domy. Jest to co prawda wytwór ludzi, ale nie został przez nas świadomie wykreowany, lecz wyłonił się niejako samorzutnie z naszych działań i rozwijał się bez naszej kontroli. Zjawiska tego typu, niezamierzone i niezaplanowane, pojawiają się w wyniku nałożenia się akcji i interakcji wielu niezależnych jednostek; w taki emergentny sposób powstają na przykład ławice ryb czy też korki na drodze. Podobnie wyłania się język: jako przez nikogo niezaplanowany „efekt uboczny”, epifenomen, wysiłków komunikacyjnych niezliczonych osób z niezliczonych generacji. W dodatku nie jest to system statyczny, lecz dynamiczny, podlegający ciągłym zmianom. Jego rozwój spełnia cztery warunki konieczne, żeby uznać go za proces ewolucyjny: nie jest teleologiczny, jest kumulatywny, jego dynamika wynika z korelacji zmienności i selekcji, jest wreszcie adaptacyjny (dzięki naszemu kolektywnemu uczeniu się). W sumie mamy tu więc do czynienia ze złożonym system adaptacyjnym. Według Kellera język to prototypowy przykład spontanicznego porządku podlegającego społeczno-kulturowej ewolucji [Keller 1997, s. 4].

Tim Lewens [2015] swoją najnowszą książkę poświęca problematyce kulturowej teorii ewolucyjnej. Rozróżnia on trzy typy **kulturowego ewolucjonizmu**, a mianowicie podejście historyczne, selekcyjonistyczne i kinetyczne. Stosując podejście **historyczne**, co oczywiście chyba dla wszystkich, uznaje się i bada diachroniczną zmienność kultur. W ujęciu **selekcyjonistycznym**, opartym na zasadach zaczerpniętych z teorii ewolucji biologicznej, zakłada się, że w zakresie kultury działa rodzaj selekcji naturalnej, to znaczy spośród konkurujących ze sobą jednostek kulturowych przetrwają najsilniejsze, zaś słabsze ulegają eliminacji. I wreszcie trzecie podejście swoją nazwą kojarzyć się może z kinetyczno-molekularną teorią gazów, która jest mikroskopowym modelem ich struktury jako zbioru cząsteczek oraz wewnętrznej dynamiki oddziaływań między tymi cząsteczkami; przy założeniu o bardzo dużej ich liczbie, model ten umożliwia zarazem makroskopowy opis właściwości gazu. Przykładowo, parametry termodynamiczne gazu (takie jak ciśnienie czy temperaturę) objaśnia się przy pomocy wielkości dotyczących pojedynczych cząsteczek (jak choćby ich średnia energia kinetyczna). Podobnie w **kinetycznym** ujęciu ewolucji kulturowej celem jest badanie tego, jak z mnogości indywidualnych interakcji między ludźmi wyłaniają się wspólne dla populacji wzorce kulturowe. Zasadniczą trudność sprawia tu naturalnie znalezienie odpowiednich związków między poziomami mikro i makro.

Jak pokazano w poprzednich rozdziałach, modele gier językowych również odtwarzają procesy ewolucji kulturowej. Stosując rozróżnienie Lewensa, można powiedzieć, że realizują one przede wszystkim podejście kinetyczne (pokazują, jak lokalne interakcje agentów prowadzą do wyłonienia się globalnych konwencji językowych). Zarazem jednak występuje tu również ujęcie selekcyjonistyczne, gdyż warianty językowe konkurują między sobą i słabsze (rzadziej używane) są eliminowane, a silniejsze się rozprzestrzeniają. Selekcja może też działać tak, jak proponuje się w neutralnej teorii ewolucji [Kimura 1983], według której większość mutacji nie jest ani szkodliwa, ani korzystna, a o wymieraniu czy zdominowaniu środowiska przesądzają głównie losowe fluktuacje. Warianty językowe w grze w nazywanie również początkowo są równoważne, jednak finalnie, dzięki spontanicznemu złamaniu symetrii, jeden z nich opanowuje cały system, podczas gdy pozostałe są eliminowane. Niewątpliwie zatem tego rodzaju modelowanie należy do

szerszego współczesnego nurtu badawczego, który jest bardzo ważny także i z tego względu, że jak podkreśla Lewens, pozwala przerzucać mosty między naukami ścisłymi i przyrodniczymi a naukami społecznymi i humanistycznymi.

Z kolei w badaniach samej już kulturowej ewolucji języka Luc Steels [2012b] wyróżnia trzy aktualnie stosowane **metodologie**. W pierwszej, którą można określić jako **lingwistyczną**, korzysta się z konkretnych danych dotyczących historycznych zmian językowych i próbuje się ustalić, jakiego rodzaju zdolności czy operacje kognitywne albo strategie społeczne leżą u podstaw prowadzących do nich procesów [Heine 1997; Mufwene 2002] (zob. też podrozdział 1.1). Drugie podejście ma charakter **psychologiczny**. Przeprowadza się mianowicie eksperymenty semiotyczne, badając, jakie strategie stosują ludzie, próbując wypracować nowy system komunikacji w sytuacji, gdy wchodząc ze sobą w interakcje, nie mogą używać języka naturalnego. Interesujące jest spostrzeżenie, że zwykle ten cel udaje im się dość szybko osiągnąć [Galantucci 2005; Galantucci, Garrod 2010]. I wreszcie trzecia metoda badawcza, **mechanistyczna**, polega na modelowaniu [Briscoe 2002; Cangelosi, Parisi 2002b; Lyon *et al.* 2007; Nolfi, Mirolli 2010; Steels 2012a]. Proponowane funkcje kognitywne, warunki ekologiczne czy wzorce interakcji po ich operacjonalizacji zostają wykorzystane do symulowania procesu emergencji systemów językowych w populacjach sztucznych agentów. Wprawdzie nie wyłaniają się w tych eksperymentach języki choćby zbliżone do naturalnych, ale też nie to jest ich celem.

Tylko poprzez **modelowanie** mamy szansę odtwarzać i analizować powstanie i działanie złożonych systemów adaptacyjnych. Przyjmując tę metodologię w badaniach wyłaniania się języka, można je naturalnie prowadzić w rozmaitych kierunkach, to znaczy konstruować różnego typu modele. Stosując podejście kinetyczne, zwane też **syntetycznym**, najlepiej użyć modelu **wieloagentowego**. Uznając zaś, że kulturowa ewolucja języka opiera się na (lingwistycznej, czyli odnoszącej się do jednostek języka, a nie do jego użytkowników) selekcji oraz samoorganizacji, możemy skorzystać z **modelu gier językowych**, do którego zresztą, jak pokazaliśmy, można również włączyć aspekt osobniczej ewolucji biologicznej. W grach językowych bowiem to właśnie jednostkowe, usytuowane akty komunikacji pomiędzy agentami (a nie tylko

wertykalna transmisja języka) odgrywają główną rolę w kształtowaniu się systemu językowego. Już Ludwig Wittgenstein pisał, że w naszej komunikacji może potencjalnie wystąpić mnóstwo rozmaitych gier językowych i że w dialogach ludzi jednocześnie przeplata się wiele różnych gier. Na tym tak rozległym obszarze, tak słabo jeszcze rozpoznanego terytorium, zbadaliśmy dopiero kilka pojedynczych ścieżek, a wiele innych wciąż czeka na eksplorację. Dla celów naukowego, metodycznego studiowania problemu korzystnie jest jednak skupić się na pojedynczej grze, dzięki czemu interesujące nas zjawiska językowe analizowane są niejako w izolacji od innych, co pozwala lepiej uchwycić i zrozumieć ich najistotniejsze własności i mechanizmy. Zdobyliśmy już w ten sposób pierwsze doświadczenia, dokonaliśmy ciekawych obserwacji i uzyskaliśmy wyniki prowadzące do ważnych wniosków. Przede wszystkim zaś nie ulega już wątpliwości, że wieloagentowe symulacje jednej z podstawowych gier językowych, czyli gry w nazywanie, umacniają hipotezę, iż język to **zjawisko emergentne** [Steels 1998b].

Należy oczywiście zastrzec, że ani wirtualne, ani realne eksperymenty z grami językowymi nie dowodzą (i nie jest to ich celem), że proponowane mechanizmy stanowią objaśnienie pochodzenia języka. Próby rozwiązania tego problemu niewątpliwie wymagają szerokiej i interdyscyplinarnej współpracy badaczy z różnych dziedzin – neurobiologii, psychologii, antropologii, wreszcie lingwistyki, i pewnie jeszcze wielu innych. Trzeba bowiem w tych badaniach uwzględnić aspekty zarówno filogenezy, jak i ontogenezy oraz glossogenezy. Niemniej gry językowe, choć ograniczają się głównie do procesu ewolucji kulturowej, obrazują jednak istotną teoretyczną perspektywę, pokazują bowiem, że możliwe jest samoistne wyłonienie się języka w populacji autonomicznych rozproszonych agentów. Realizacja odpowiednich eksperymentów świadczy o tym, że taka opcja jest co najmniej wiarygodna, spójna i niesprzeczna. Ponadto jest to również argument wspierający pogląd, że ani znaczenia, ani wiedza językowa nie muszą być uniwersalne i wrodzone, skoro sztuczne agenty potrafią je samodzielnie wykreować. Możliwym wydaje się zatem wyjaśnienie genezy języka inne niż przy użyciu mechanizmów mutacji genetycznych i doboru naturalnego. Co przy tym ważne, zastosowana metodologia (symulacje komputerowe, ewentualnie eksperymenty z systemami robotycznymi) jest neutralna wobec badanej hipotezy i mogłaby być użyta do doświadczalnego weryfiko-

wania również teorii natywistycznych [Gillis *et al.* 1995; Kirby 1999, 2002b; Dowman *et al.* 2006; Kirby *et al.* 2008].

Naturalnie także i ta metodologia ma swoje ograniczenia, jeśli chodzi o możliwości objaśniania symulowanych zjawisk. Modele są siłą rzeczy idealizacjami i zawsze można im zarzucić nadmiernie uproszczone podejście i zbytne spłykanie danego zagadnienia. Sceptycyzm każe podejrzewać, że zaobserwowane w symulacjach efekty nie zachodzą być może generalnie, a tylko w pewnych specyficznych przebiegach dla szczególnych wartości jakichś parametrów. Przyjęte założenia mogą się wydawać za mało realistyczne, uzyskane wyniki trywialne, a czynione na ich podstawie ekstrapolacje zbyt daleko idące. Tego rodzaju krytyka może nie być bezpodstawna. Jak każdej metody badawczej, także i tej należy używać rozważnie i umiejętnie; będąc świadomym potencjalnych pułapek modelowania, trzeba próbować je omijać, działając uważnie i z namysłem. Symulacje komputerowe to doskonałe narzędzie, które może być bardzo skuteczne, o ile będzie używane z odpowiednią dozą ostrożności, staranności i rozwagi, niezbędnymi, żeby formułowane potem wnioski można było uznać za pewne i zasadne. Autorka zaprezentowanych w niniejszej książce badań chciałaby więc tu zapewnić, że dokładała wszelkich starań, aby przeprowadzić je sumiennie i wiarygodnie, oraz żywi przekonanie, że wykazała się w nich należyłą skrupulatnością i rzetelnością. Ma również nadzieję, że praca ta jest choćby małym, ale wartościowym wkładem w rozwój tej nowej metody badawczej, a przede wszystkim jej zastosowania w dziedzinie lingwistyki ewolucyjnej.

Lingwistyka ewolucyjna to stosunkowo nowa dyscyplina, można powiedzieć, sama wciąż jeszcze ewoluująca, ale już na pewno odróżniająca się od innych kierunków w językoznawstwie, takich jak językoznawstwo strukturalne czy diachroniczne albo biolingwistyka. Obejmuje ona różne orientacje, ze wspólną jednakże dla nich wszystkich ideą, że to właśnie podejście oparte na procesach selekcji i samoorganizacji może nam pomóc wyjaśnić, jak powstał i jak ewoluował język. Dziedzina ta, zwana też ewolucją języków, skupia się właśnie na ich ewolucji kulturowej raczej niż na biologicznym wykształceniu się naszej zdolności językowej. Niemniej badania z jej zakresu niosą też pewne implikacje dla szerszej rozumianej dziedziny ewolucji języka. Kiedy bowiem udaje się wykazać, że pewne własności języka mogą być obja-

śnione przez mechanizmy ewolucji kulturowej, to nie jest już niezbędnie konieczna ich czysto biologiczna eksplikacja. I odwrotnie, ustalenia dotyczące ewolucji biologicznej rzutują na lingwistykę ewolucyjną (na przykład genetycznie wyewoluowane zdolności przetwarzania informacji, jak choćby mechanizm przetwarzania sekwencyjnego, stanowią niezbędny fundament dla działania procesów kulturowych). Do tej bogatej palety informacji i hipotez można teraz zastosować narzędzia, jakie oferuje nam informatyka, w tym przede wszystkim technikę **symulacji komputerowych**. I tylko takie zintegrowane podejście, łączące kompleksowo rozmaite koncepcje, fakty i techniki z różnych dziedzin – tu: z biologii ewolucyjnej, lingwistyki i nauk komputerowych – daje nadzieję na postępy w poszukiwaniach rozwiązania zagadki ewolucji języka.

Modelowanie jest już co prawda standardową procedurą stosowaną w różnych obszarach badań, w których występują systemy złożone, ale jest chyba jeszcze stosunkowo mało znane wśród lingwistów. Badane modele mogą się im wydawać trywialne (zob. np. [Bickerton 2007]), ale jak już wskazywaliśmy, dążenie do prostoty budowanych modeli jest tu właściwie obowiązującą zasadą: koniecznym jest precyzyjne sformułowanie jednoznacznych założeń i klarownych reguł działania modelu, co ważne jest nie tylko dla jego implementacji, ale także dla prześledzenia i analizy jego zachowania oraz interpretacji uzyskanych wyników. Łatwiej jest przecież wychwycić relewantne czynniki i mechanizmy, gdy obserwuje się jakiś wyizolowany proces, niż gdy bada się naraz większą ich liczbę. Ponadto symulacje modelu muszą być wykonalne w realnym czasie. I wreszcie, na tym wszak początkowym dopiero etapie rozwoju dziedziny ewolucji języka po prostu wciąż jeszcze zbyt mało wiemy, żeby móc proponować dużo bardziej skomplikowane modele, na przykład takie, które by wiernie odtwarzały rozwój rzeczywistych języków etnicznych. Na razie analizujemy raczej statystyczne dystrybucje pewnych parametrów charakteryzujących wyłaniające się w modelu systemy językowe. Trzeba bowiem najpierw przeanalizować te możliwie najprostsze systemy komunikacyjne, żeby później móc sukcesywnie zwiększać stopień ich złożoności. Generalnie zatem staramy się dopiero wstępnie ustalić, jakiego rodzaju warunki muszą być spełnione, żeby w ogóle mogła się wyłonić jakaś forma języka, natomiast zdecydowanie nie próbujemy jesz-

cze wygenerować języka w całej jego złożoności, za pomocą w pełni realistycznego scenariusza. Modelowanie zresztą polega bardziej na badaniu konsekwencji rozmaitych hipotez, niż na próbach detalicznej rekonstrukcji powstania i ewolucji języka naturalnego – od systemu przedjęzykowego aż do tak wykształconej jego postaci, jaką znamy obecnie.

Modelowanie jest wartościową metodą badawczą także i z tego względu, że jest to **metoda ilościowa** i zapewniająca **interpretacje mechanistyczne** badanych zjawisk (to znaczy odnoszące się do działających w nich mechanizmów). Filozofowie czy metodolodzy nauki zwykle zgadzają się, że współczesne badania naukowe (zwłaszcza w naukach przyrodniczych) koncentrują się na poszukiwaniu takich właśnie redukcjonistycznych eksplikacji. Przykładowo, biologzy starają się (między innymi) rozpoznać, w jaki sposób powstały i ewoluowały organizmy, jakie reguły rządziły tymi procesami i jak one przebiegały. Dzięki zastosowaniu modelowania lingwistyka ewolucyjna zbliża się więc do paradygmatu badawczego nauk przyrodniczych. Komputerowe symulacje modelu pozwalają nam prześledzić, jak (i jakie) wyłaniają się w nim systemy komunikacji, obserwować dynamikę tego procesu, wyznaczyć jego determinanty i podstawowe czynniki kształtujące wygenerowany język. Dalsze badania w tym kierunku na pewno wyraźniej pokażą, do jakiego stopnia otrzymane w ten sposób wyniki są istotne i adekwatne. Brakuje jak dotąd wyników teoretycznych dotyczących procesów toczących się w zbiorowości komunikujących się jednostek i nie ma pewności, czy w ogóle można je wypracować przy takim stopniu złożoności owych systemów. Aktualnie więc najlepszym, jeśli nie w ogóle jedynym, narzędziem do ich badania, jakie mamy do dyspozycji, pozostają symulacje komputerowe. Szczęśliwie, testowanie przy ich pomocy procesów proponowanych jako mechanizmy odgrywające ważną rolę w powstaniu i rozwoju języka okazuje się metodologią efektywną, choć oczywiście czaso- i pracochłonną. Widać już, że podejście to jest owocne, jak również że kompleksowe uwzględnianie kulturowych interakcji, presji funkcjonalnych i ogólnych mechanizmów uczenia się to właściwa i skuteczna strategia w próbach wyjaśnienia kwestii języka i jego ewolucji. Niewątpliwie możemy oczekiwać szybkiego rozwoju tego rodzaju badań i wielu jeszcze ciekawych i ważnych ich wyników. Przykłady zaprezentowane w niniejszym opracowaniu dają zaledwie

pewien tego przedsmak i stanowią tylko małą próbkę tego, co można jeszcze osiągnąć w tej dziedzinie.

Badacze zajmujący się problematyką powstania i rozwoju języka chętnie powtarzają za Mortenem H. Christiansenem i Simonem Kirby [2003b], że zagadnienie to jest najtrudniejszym problemem naukowym. Chociaż wspomniani autorzy właściwie tylko postawili takie prowokacyjne pytanie (*the hardest problem in science?*), to jednocześnie podkreślali, że rozwiązanie tej kwestii, a zarazem sekretu naszej wyjątkowości w świecie ożywionym, jest znaczącym i doniosłym celem nauki XXI wieku. Zgłębiający tę tematykę uczeni prezentują bardzo zróżnicowane podejścia i stanowiska, ale co do jednego zasadniczo wszyscy są zgodni: badania te muszą być interdyscyplinarne. Żadna dyscyplina z osobna nie będzie w stanie rozwiązać tej największej zagadki, natomiast wszechstronne wykorzystanie wiedzy i doświadczenia, perspektyw i koncepcji, metod i technik z rozmaitych dziedzin może nas doprowadzić do lepszego zrozumienia ewolucji języka – a więc zapewne i tego, jak staliśmy się ludźmi. Bez wątpienia jest to jeden z fundamentalnych i zarazem najbardziej skomplikowanych problemów naukowych – choć nie da się oczywiście rozstrzygnąć, czy będzie to dla nas tajemnica najtrudniejsza do rozwikłania. W każdym razie autorka ufa, że przedstawiona w tej książce technika modelowania komputerowego gier językowych wydatnie przyczyni się do uchylenia rąbka owej tajemnicy.

Bibliografia

- ABRAMS, D.M., STROGATZ, S.H. (2003). Modelling the dynamics of language death. *Nature*, 424, s. 900.
- AKHTAR, N., MONTAGUE, L. (1999). Early lexical acquisition: The role of cross-situational learning. *First Language*, 19(57), s. 347–358.
- ALBERT, R., BARABÁSI, A.-L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 74(1), s. 47–97.
- AMEER, A.M.A.A., ALTAIE, A.A.J. (2010). Homonymy in English and Arabic: A contrastive study. Online: <http://www.uobabylon.edu.iq/uobcoleges/fileshare/articles/Homonymy.pdf> (Dostęp 13.07.2015). University of Babylon.
- APRESJAN, J.D. (1980). *Semantyka leksykalna. Synonimiczne środki języka*. Przeł. Z. Kozłowska, A. Markowska. Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław.
- ARBIB, M.A. (2002). The mirror system, imitation, and the evolution of language. W: C.L. Nehaniv, K. Dautenhahn, red., *Imitation in Animals and Artifacts*, s. 229–280. The MIT Press, Cambridge, MA.
- ARBIB, M.A. (2016). Towards a computational comparative neuroprimatology: Framing the language-ready brain. *Physics of Life Reviews*, 16, s. 1–54.
- AXELROD, R. (1997). Advancing the art of simulation in the social sciences. W: R. Conte, R. Hegselmann, P. Terna, red., *Simulating Social Phenomena*, s. 21–40. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- BADIN, P., BOË, L.-J., SAWALLIS, T.R., SCHWARTZ, J.-L. (2014). Keep the lips to free the larynx: Comments on de Boer's articulatory model (2010). *Journal of Phonetics*, 46, s. 161–167.
- BALDWIN, J.M. (1896). A new factor in evolution. *The American Naturalist*, 30(354, 355), s. 441–451, 536–553.
- BARABÁSI, A.-L., ALBERT, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286, s. 509–512.

- BARABÁSI, A.-L., BONABEAU, E. (2003). Scale-free networks. *Scientific American*, 288, s. 60–69.
- BARONCHELLI, A. (2011). Role of feedback and broadcasting in the naming game. *Physical Review E*, 83(4), s. 046103.
- BARONCHELLI, A., LORETO, V., DALL’ASTA, L., BARRAT, A. (2006a). Bootstrapping communication in language games: Strategy, topology and all that. W: A. Cangelosi, A. Smith, K. Smith, red., *The Evolution of Language: Proceedings of the 6th International Conference on the Evolution of Language*, s. 11–18, Singapore. World Scientific.
- BARONCHELLI, A., FELICI, M., LORETO, V., CAGLIOTI, E., STEELS, L. (2006b). Sharp transition towards shared vocabularies in multi-agent systems. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006(06), s. P06014.
- BARONCHELLI, A., DALL’ASTA, L., BARRAT, A., LORETO, V. (2006c). Topology-induced coarsening in language games. *Physical Review E*, 73, s. 015102.
- BARONCHELLI, A., DALL’ASTA, L., BARRAT, A., LORETO, V. (2007). Non-equilibrium phase transition in negotiation dynamics. *Physical Review E*, 76(5), s. 051102.
- BARONCHELLI, A., LORETO, V., STEELS, L. (2008). In-depth analysis of the naming game dynamics: the homogeneous mixing case. *International Journal of Modern Physics C*, 19(05), s. 785–812.
- BECKNER, C., BLYTHE, R., BYBEE, J., CHRISTIANSEN, M.H., CROFT, W., ELLIS, N.C., HOLLAND, J., KE, J., LARSEN-FREEMAN, D., SCHOENEMANN, T. (2009). Language is a complex adaptive system: Position paper (The ‘Five Graces Group’). *Language Learning*, 59(Supplement s1), s. 1–26.
- BELEW, R.K., MITCHELL, M., ACKLEY, D.H. (1996). Computation and the natural sciences. W: R.K. Belew, M. Mitchell, red., *Adaptive Individuals in Evolving Populations*, s. 431–440. Addison-Wesley Longman Publishing, Reading, MA.
- BERGMANN, T., DALE, R. (2016). A scientometric analysis of Evolang: Intersections and authorships. W: S. Roberts, C. Cuskley, L. McCrohon, L. Barceló-Coblijn, O. Feher, T. Verhoef, red., *The Evolution of Language: Proceedings of the 11th International Conference (EVOLANG11)*. Online: <http://evolang.org/neworleans/papers/182.html> (Dostep 22.02.2016).
- BICKERTON, D. (2000). How protolanguage became language. W: C. Knight, M. Studdert-Kennedy, J. Hurford, red., *Approaches to the*

- Evolution of Language: Social and Cognitive Bases*, s. 264–284. Cambridge University Press, Cambridge.
- BICKERTON, D. (2007). Language evolution: A brief guide for linguists. *Lingua*, 117(3), s. 510–526.
- BLASIUS, B., GROSS, T. (2009). Dynamic and topological interplay in adaptive networks. W: H.G. Schuster, red., *Reviews of Nonlinear Dynamics and Complexity*, vol. 2, s. 63–106. Wiley-VCH, Weinheim.
- BLEYS, J., LOETZSCH, M., SPRANGER, M., STEELS, L. (2009). The grounded colour naming game. W: *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (Roman 2009)*.
- BLOOM, P. (2000). *How Children Learn the Meanings of Words*. The MIT Press, Cambridge, MA., London, UK.
- BOLHUIS, J.J., TATTERSALL, I., CHOMSKY, N., BERWICK, R.C. (2014). How could language have evolved? *PLoS Biology*, 12(8), s. e1001934.
- BRIGATTI, E. (2008). Consequence of reputation in an open-ended naming game. *Physical Review E*, 78(4), s. 046108.
- BRIGATTI, E., RODITI, I. (2009). Conventions spreading in open-ended systems. *New Journal of Physics*, 11(2), s. 023018.
- BRIGHTON, H. (2002). Compositional syntax from cultural transmission. *Artificial Life*, 8(1), s. 25–54.
- BRISCOE, E.J. (2003). Grammatical assimilation. W: M. Christiansen, S. Kirby, red., *Language Evolution: The States of the Art*, s. 295–316. Oxford University Press, Oxford.
- BRISCOE, T., red. (2002). *Linguistic Evolution through Language Acquisition: Formal and Computational Models*. Cambridge University Press, Cambridge.
- BRITTON, B.K. (1978). Lexical ambiguity of words used in English text. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 10(1), s. 1–7.
- CANGELOSI, A., PARISI, D. (2002a). Computer simulation: A new scientific approach to the study of language evolution. W: A. Cangelosi, D. Parisi, red., *Simulating the Evolution of Language*, rozdz. 1, s. 3–28. Springer-Verlag, London.
- CANGELOSI, A., PARISI, D., red. (2002b). *Simulating the Evolution of Language*. Springer-Verlag, London.
- CARSTAIRS-MCCARTHY, A. (1994). Inflection classes, gender, and the principle of contrast. *Language*, 70(4), s. 737–788.

- CASTELLÓ, X., TOIVONEN, R., EGUÍLUZ, V., SARAMÄKI, J., KASKI, K., SAN MIGUEL, M. (2007). Anomalous lifetime distributions and topological traps in ordering dynamics. *Europhysics Letters*, 79(6), s. 66006.
- CHATER, N., REALI, F., CHRISTIANSEN, M.H. (2009). Restrictions on biological adaptation in language evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(4), s. 1015–1020.
- CHOMSKY, N. (1965). *Aspects of the Theory of Syntax*. MIT Press, Cambridge, MA.
- CHOMSKY, N. (1968). *Language and Mind*. Harcourt, Brace & World, New York.
- CHOMSKY, N. (1981). *Lectures on Government and Binding*. Foris, Dordrecht.
- CHOMSKY, N. (1986). *Knowledge of Language: Its Nature, Origin and Use*. Greenwood, Westport CT.
- CHOMSKY, N. (2005). Three factors in language design. *Linguistic Inquiry*, 36(1), s. 1–22.
- CHOUINARD, M.M., CLARK, E.V. (2003). Adult reformulations of child errors as negative evidence. *Journal of Child Language*, 30(03), s. 637–669.
- CHRISTIANSEN, M.H., CHATER, N. (2008). Language as shaped by the brain. *Behavioral and Brain Sciences*, 31(05), s. 489–558.
- CHRISTIANSEN, M.H., KIRBY, S. (2003a). Language evolution: Consensus and controversies. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(7), s. 300–307.
- CHRISTIANSEN, M.H., KIRBY, S. (2003b). Language evolution: The hardest problem in science? W: M.H. Christiansen, S. Kirby, red., *Language Evolution*, vol. 3 of *Studies in the Evolution of Language*, s. 1–15. Oxford University Press, Oxford.
- CHRISTIANSEN, M.H., KIRBY, S. (2009). Language evolution. W: L.R. Squire, red., *Encyclopedia of Neuroscience*, vol. 5, s. 321–327. Academic Press, Oxford.
- CHRISTIANSEN, M.H., CHATER, N., REALI, F. (2009). The biological and cultural foundations of language. *Communicative & Integrative Biology*, 2(3), s. 221–222.
- CLARK, E.V. (1987). The principle of contrast: A constraint on language acquisition. W: B. MacWhinney, red., *Mechanisms of Language Acquisition*, s. 1–33. Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- CLARK, E.V. (1990). On the pragmatics of contrast. *Journal of Child Language*, 17(02), s. 417–431.

- CLARK, E.V. (2009). Lexical meaning. W: E.L. Bavin, red., *The Cambridge Handbook of Child Language*, s. 283–299. Cambridge University Press, New York.
- COHEN, H. (2013). Historical, Darwinian, and current perspectives on the origin(s) of language. W: C. Lefebvre, B. Comrie, H. Cohen, red., *New Perspectives on the Origins of Language*, vol. 144 of *Studies in Language Companion Series*, s. 3–30. John Benjamins Publishing Company.
- CORBALLIS, M.C. (2009). The evolution of language. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1156(1), s. 19–43.
- CROFT, W. (2000). *Explaining Language Change: An Evolutionary Approach*. Longman Linguistics Library. Pearson Education, Harlow, Essex, UK.
- CROFT, W. (2002). *Typology and Universals*. Cambridge Textbooks in Linguistics. Cambridge University Press, Cambridge.
- CROFT, W. (2008). Evolutionary linguistics. *Annual Review of Anthropology*, 37(1), s. 219–234.
- CRUSE, D.A. (1986). *Lexical semantics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- DA SILVA FILHO, R.J., BRUST, M.R., RIBEIRO, C.H. (2009). Consensus dynamics in a non-deterministic naming game with shared memory. Online: ArXiv preprint [arXiv:0912.4553](https://arxiv.org/abs/0912.4553) (Dostep 30.06.2014).
- DALL'ASTA, L., BARONCHELLI, A., BARRAT, A., LORETO, V. (2006a). Agreement dynamics on small-world networks. *EPL (Europhysics Letters)*, 73(6), s. 969–975.
- DALL'ASTA, L., BARONCHELLI, A., BARRAT, A., LORETO, V. (2006b). Non-equilibrium dynamics of language games on complex networks. *Physical Review E*, 74, s. 036105.
- DAWKINS, R. (1976). *The Selfish Gene*. Oxford University Press, Oxford.
- DAWKINS, R. (1986). *The Blind Watchmaker: Why the Evidence of Evolution Reveals a Universe without Design*. W.W. Norton & Company, New York.
- DE BEULE, J. (2009). The multiple word guessing game. Online: <https://www.researchgate.net/publication/253005504> (Dostep 30.05.2014).
- DE BEULE, J., DE VYLDER, B. (2005). Does language shape the way we conceptualize the world? W: B. Bara, L. Barsalou, M. Bucciarelli, red., *Proceedings of the 27th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, s. 559–564.

- DE BEULE, J., DE VYLDER, B., BELPAEME, T. (2006). A cross-situational learning algorithm for damping homonymy in the guessing game. W: L.M. Rocha *et al.*, red., *Artificial Life X*, s. 466–472, Cambridge. MIT Press.
- DE BOER, B. (2000). Self-organization in vowel systems. *Journal of Phonetics*, 28(4), s. 441–465.
- DE BOER, B. (2006). Computer modelling as a tool for understanding language evolution. W: N. Gontier, J.P. van Bendegem, D. Aerts, red., *Evolutionary Epistemology, Language and Culture: A Non-Adaptationist, Systems Theoretical Approach*, s. 381–406. Springer.
- DE OLIVEIRA, P.M.C., STAUFFER, D., WICHMANN, S., DE OLIVEIRA, S.M. (2008). A computer simulation of language families. *Journal of Linguistics*, 44(3), s. 659–675.
- DE VYLDER, B. (2007). *The Evolution of Conventions in Multi-Agent Systems*. Ph.D. thesis, Artificial Intelligence Lab Vrije Universiteit Brussel, Brussels.
- DE VYLDER, B., TUYLS, K. (2006). How to reach linguistic consensus: A proof of convergence for the naming game. *Journal of Theoretical Biology*, 242(4), s. 818–831.
- DEACON, T.W. (1997). *The Symbolic Species: The Co-evolution of Language and the Brain*. W.W. Norton & Company, New York.
- DEACON, T.W. (2003a). The hierarchic logic of emergence: Untangling the interdependence of evolution and self-organization. W: B. Weber, D. Depew, red., *Evolution and Learning: The Baldwin Effect Reconsidered*, s. 273–308. The MIT Press, Cambridge, MA.
- DEACON, T.W. (2003b). Multilevel selection in a complex adaptive system: The problem of language origins. W: B. Weber, D. Depew, red., *Evolution and Learning: The Baldwin Effect Reconsidered*, s. 81–106. The MIT Press, Cambridge, MA.
- DEDIU, D., CHRISTIANSEN, M.H. (2016). Language evolution: constraints and opportunities from modern genetics. *Topics in Cognitive Science*. Online: <http://dx.doi.org/10.1111/tops.12195> (Dostęp 05.04.2016).
- DERWOJEDOWA, M., SZPAKOWICZ, S., ZAWISŁAWSKA, M., PIASECKI, M. (2008a). Lexical units as the centrepiece of a wordnet. W: *Proceedings of the 16th International Conference Intelligent Information Systems (IIS 2008), Zakopane 16-18 June 2008*, s. 351–357, Warszawa. Wydawnictwo Exit. Prezentacja online: <https://www.yumpu.com/en/document/view/10476315/derwojedzawislawwedupl-szpaksiteuotta> (Dostęp 23.05.2012).

- DERWOJEDOWA, M., PIASECKI, M., SZPAKOWICZ, S., ZAWISLAWSKA, M., BRODA, B. (2008b). Words, concepts and relations in the construction of Polish WordNet. W: *Proceedings of the Global WordNet Conference, Seged, Hungary, January 22–25 2008*, s. 162–177, Szeged. University of Szeged.
- DI PAOLO, E.A., NOBLE, J., BULLOCK, S. (2000). Simulation models as opaque thought experiments. W: *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*, s. 497–506, Cambridge, MA. The MIT Press.
- DONALD, M. (2005). Imitation and mimesis. W: S.L. Hurley, N. Chater, red., *Perspectives on Imitation* vol. 2: *Imitation, Human Development, and Culture*, s. 283–300. The MIT Press, Cambridge, MA.
- DOR, D., JABLONKA, E. (2001). From cultural selection to genetic selection: A framework for the evolution of language. *Selection*, 1(1-3), s. 33–56. Online: <http://dx.doi.org/10.1556/Select.1.2000.1-3.5> (Dostęp 11.06.2015).
- DOR, D., JABLONKA, E. (2014). Why we need to move from gene-culture co-evolution to culturally driven co-evolution. W: D. Dor, C. Knight, J. Lewis, red., *The Social Origins of Language*, s. 15–30. Oxford University Press, Oxford.
- DOWMAN, M., KIRBY, S., GRIFFITHS, T.L. (2006). Innateness and culture in the evolution of language. W: A. Cangelosi, A. Smith, K. Smith, red., *The Evolution of Language: Proceedings of the 6th International Conference on the Evolution of Language*, s. 83–90. World Scientific Press.
- DUNBAR, R. (2009). *Pchły, plotki a ewolucja języka*. Przeł. T. Pańkowski. Wydawnictwo Czarna Owca, Warszawa.
- DUNN, M., GREENHILL, S.J., LEVINSON, S.C., GRAY, R.D. (2011). Evolved structure of language shows lineage-specific trends in word-order universals. *Nature*, 473(7345), s. 79–82.
- ELLIS, N., LARSEN-FREEMAN, D., red. (2009). *Language as a Complex Adaptive System*. Best of Language Learning Series. John Wiley & Sons.
- EPSTEIN, J.M. (2008). Why model? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(4), s. 12. Online: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html> (Dostęp 25.10.2015).
- EvLing (b.r.). Evolutionary linguistics. English Wikipedia. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary_linguistics (Dostęp 21.02.2016).
- FITCH, W.T. (2000). The evolution of speech: a comparative review. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(7), s. 258–267.

- FODOR, J.A. (2008). *LOT 2: The Language of Thought Revisited*. Oxford University Press, Oxford.
- GALANTUCCI, B. (2005). An experimental study of the emergence of human communication systems. *Cognitive Science*, 29(5), s. 737–767.
- GALANTUCCI, B., GARROD, S. (2010). Experimental semiotics: A new approach for studying the emergence and the evolution of human communication. *Interaction Studies*, 11(1), s. 1–13.
- GAO, Y., CHEN, G., CHAN, R.H. (2014). Naming game on networks: Let everyone be both speaker and hearer. *Scientific Reports*, 4, s. 6149. Online: <http://www.nature.com/articles/srep06149> (Dostęp 17.10.2015).
- GET (b.r.). Grammatical Evolution Tutorial. Online: <http://pyneurgen.sourceforge.net/tutorial/ge.html> (Dostęp 21.06.2016).
- GIL, S., ZANETTE, D.H. (2006). Coevolution of agents and networks: Opinion spreading and community disconnection. *Physics Letters A*, 356(2), s. 89–94.
- GILLIS, S., DURIEUX, G., DAELEMANS, W. (1995). A computational model of P&P: Dresher & Kaye (1990) revisited. *Amsterdam Series in Child Language Development*, 5, s. 135–173.
- GONG, T., SHUAI, L. (2013). Computer simulation as a scientific approach in evolutionary linguistics. *Language Sciences*, 40, s. 12–23.
- GONG, T., SHUAI, L., COMRIE, B. (2014a). Evolutionary linguistics: theory of language in an interdisciplinary space. *Language Sciences*, 41, s. 243–253.
- GONG, T., SHUAI, L., ZHANG, M. (2014b). Modelling language evolution: Examples and predictions. *Physics of Life Reviews*, 11(2), s. 280–302.
- GONTIER, N. (2006a). An epistemological inquiry into the ‘what is language’ question and the ‘what did language evolve for’ question. W: A. Cangelosi, A. Smith, K. Smith, red., *The Evolution of Language: Proceedings of the 6th International Conference (EVOLANG 6)*, s. 107–114, London. World Scientific.
- GONTIER, N. (2006b). Evolutionary epistemology. W: J. Fieser, B. Dowden, red., *Internet Encyclopedia of Philosophy*. Online: <http://www.iep.utm.edu/evo-epis/> (Dostęp 16.02.2016).
- GONTIER, N. (2008). Introducing the units and levels of evolution debate into evolutionary linguistics. W: A. Smith, K. Smith, R. Ferrer-i-Cancho, red., *The Evolution of Language: Proceedings of the 7th International Conference (EVOLANG 7)*, s. 429–430, Singapore. World Scientific.

- GONTIER, N. (2010a). Evolutionary epistemology as a scientific method: A new look upon the units and levels of evolution debate. *Theory in Biosciences*, 129(2-3), s. 167–182.
- GONTIER, N. (2010b). How to identify the units, levels and mechanisms of language evolution. W: A.D. Smith, M. Schouwstra, B. de Boer, K. Smith, red., *The Evolution of Language: Proceedings of the 8th International Conference (EVOLANG 8)*, s. 176–183, London. World Scientific.
- GONTIER, N. (2012). Selectionist approaches in evolutionary linguistics: An epistemological analysis. *International Studies in the Philosophy of Science*, 26(1), s. 67–95.
- GOODMAN, N. (1952). On likeness of meaning. W: L. Linsky, red., *Semantics and the Philosophy of Language: A Collection of Readings*, s. 67–74. University of Illinois Press, Urbana and Chicago.
- GOULD, S.J. (1987). The limits of adaptation: Is language a spandrel of the human brain? Paper presented to the Cognitive Science Seminar. Center for Cognitive Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- GRIES, S.T. (2006). Corpus-based methods and cognitive semantics: The many senses of *to run*. W: S.T. Gries, A. Stefanowitsch, red., *Corpora in Cognitive Linguistics: Corpus-based Approaches to Syntax and Lexis*, Trends in Linguistics, s. 57–100. Mouton de Gruyter, Berlin.
- GRIFONI, P., D'ULIZIA, A., FERRI, F. (2016). Computational methods and grammars in language evolution: A survey. *Artificial Intelligence Review*, 45(3), s. 369–403.
- GRODZIŃSKI, E. (1985). *Językoznawcy i logicy o synonimach i synonimii. Studium z pogranicza dwóch nauk*. Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław.
- GROSS, T., BLASIUS, B. (2008). Adaptive coevolutionary networks: a review. *Journal of the Royal Society Interface*, 5(20), s. 259–271.
- HARNAD, S. (1990). The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 42(1), s. 335–346.
- HARTMANN, R.R.K., STORK, F.C. (1972). *Dictionary of Language and Linguistics*. Applied Science Publishers Ltd., London.
- HAUSER, M.D., CHOMSKY, N., FITCH, W.T. (2002). The faculty of language: What is it, who has it, and how did it evolve? *Science*, 298(5598), s. 1569–1579.

- HAWKING, S.W. (2000). „Unified Theory” is getting closer, Hawking predicts. *San Jose Mercury News*. 23 Jan 2000, interview.
- HEMBERG, E., O’NEILL, M., BRABAZON, A. (2008). Grammatical bias and building blocks in meta-grammar grammatical evolution. W: J. Wang, red., *Proceedings of the 2008 IEEE World Congress on Computational Intelligence, Hong Kong (IEEE Congress on Evolutionary Computation)*, s. 3775–3782. IEEE Press.
- HINTON, G.E., NOWLAN, S.J. (1987). How learning can guide evolution. *Complex Systems*, 1, s. 495–502.
- HIRSH-PASEK, K., GOLINKOFF, R.M., HOLLICH, G. (2000). An emergentist coalition model for word learning: Mapping words to objects is a product of the interaction of multiple cues. W: R.M. Golinkoff, K. Hirsh-Pasek, L. Bloom, L.B. Smith, A.L. Woodward, N. Akhtar, G. Hollich, red., *Becoming a Word Learner: A Debate on Lexical Acquisition*, s. 136–164. Oxford University Press, New York.
- HOCKETT, C.F. (1959). Animal „languages” and human language. *Human Biology*, 31(1), s. 32–39. Także w: J.N. Spuhler, red. (1959) *The Evolution of Man’s Capacity for Culture*. Wayne State University Press, Detroit, MI.
- HOCKETT, C.F. (1960). The origin of speech. *Scientific American*, 203(3), s. 89–96. Reprint w: W.S-Y. Wang, red. (1982) *Human Communication: Language and Its Psychobiological Bases*, s. 4–12. Seria: *Readings from Scientific American*. W.H. Freeman & Co., San Francisco.
- HOCKETT, C.F. (1990). A comment on design features. *Anthropological Linguistics*, 32(3–4), s. 361–363.
- HOCKETT, C.F., ALTMANN, S.A. (1968). A note on design features. W: T.A. Sebeok, red., *Animal Communication: Techniques of Study and Results of Research*, s. 61–72. Indiana University Press, Bloomington.
- HOLDEN, C. (2004). The origin of speech. *Science*, 303(5662), s. 1316–1319.
- HOLLAND, J.H. (2006). Studying complex adaptive systems. *Journal of Systems Science and Complexity*, 19(1), s. 1–8.
- HOLLMANN, W. (2008). How our ancestors learnt to say: ‘There’s a bear outside’. Review of *The Genesis of Grammar: A Reconstruction* by B. Heine and T. Kuteva. *Times Higher Education*, May 22. Online: <https://www.timeshighereducation.com/books/how-our-ancestors-learnt-to-say-theres-a-bear-outside/402022.article> (Dostęp 12.02.2016). Także dostępny w Internecie: <http://www.lancaster.ac.uk/staff/hollmann/WBH'Reviews'THE.pdf>.

- HOLME, P., NEWMAN, M.E. (2006). Nonequilibrium phase transition in the coevolution of networks and opinions. *Physical Review E*, 74(5), s. 056108.
- HURFORD, J.R. (1989). Biological evolution of the Saussurean sign as a component of the language acquisition device. *Lingua*, 77(2), s. 187–222.
- HURFORD, J.R. (2003a). The language mosaic and its evolution. W: M.H. Christiansen, S. Kirby, red., *Language Evolution*, vol. 3 of *Studies in the Evolution of Language*, s. 35–58. Oxford University Press, Oxford.
- HURFORD, J.R. (2003b). Why synonymy is rare: Fitness is in the speaker. W: W. Banzhaf, T. Christaller, P. Dittrich, J.T. Kim, J. Ziegler, red., *Advances in Artificial Life – Proceedings of the Seventh European Conference on Artificial Life (ECAL03)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 2801, s. 442–451. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- HUXLEY, J. (1942). *Evolution: The Modern Synthesis*. George Allen & Unwin Ltd., London.
- JAEGER, H., STEELS, L., BARONCHELLI, A., BRISCOE, T., CHRISTIANSEN, M.H., GRIFFITHS, T., JÄGER, G., KIRBY, S., KOMAROVA, N.L., RICHERSON, P.J., JOCHEN, T. (2009). What can mathematical, computational and robotic models tell us about the origins of syntax. W: D. Bickerton, E. Szathmáry, red., *Biological Foundations and Origin of Syntax*, Strüngmann Forum Reports, vol. 3, s. 385–410. MIT Press, Cambridge.
- JÄGER, G. (2007). Evolutionary game theory and typology: A case study. *Language*, 83(1), s. 74–109.
- JÄGER, G. (2008). Evolutionary stability conditions for signaling games with costly signals. *Journal of Theoretical Biology*, 253(1), s. 131–141.
- JÄGER, G., WICHMANN, S. (2016). Inferring the world tree of languages from word lists. W: S. Roberts, C. Cuskley, L. McCrohon, L. Barceló-Coblijn, O. Fehér, T. Verhoef, red., *The Evolution of Language: Proceedings of the 11th International Conference (EVLANG11)*. Online: <http://evolang.org/neworleans/papers/147.html> (Dostęp 12.03.2016).
- JUERGENS, E., PIZKA, M. (2006). The language evolver Lever – tool demonstration. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 164(2), s. 55–60.
- KAUFFMAN, S.A. (1993). *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press, Oxford.

- KAWALEC, P. (2015). Gry językowe. W: Internetowa wersja *Powszechnej encyklopedii filozofii*. Online: <http://peenef2.republika.pl/hasla/g/gryjezykowe.html> (Dostęp 06.02.2015).
- KE, J., WANG, F., COUPÉ, C. (2002a). The rise and fall of homophones: A window to language evolution. W: *Proceedings of the Fourth International Conference on the Evolution of Language*, Harvard, March 27-30, 2002, s. 58. Also online: <http://www.ddl.ish-lyon.cnrs.fr/fulltext/Christophe/Ke'2002'Evolang'slides.pdf> (Dostęp 25.06.2016).
- KE, J., MINETT, J.W., AU, C.-P., WANG, W.S.-Y. (2002b). Self-organization and selection in the emergence of vocabulary. *Complexity*, 7(3), s. 41–54.
- KELLER, R. (1994). *On Language Change: The Invisible Hand in Language*. Routledge, London, New York.
- KELLER, R. (1997). The natural language: A spontaneous order and its socio-cultural evolution. W: R. Keller, K. Menges, red., *Emerging Structures in Interdisciplinary Perspective*, s. 1–13. Francke, Tübingen/Basel.
- KESSLER, B. (2005). Phonetic comparison algorithms. *Transactions of the Philological Society*, 103(2), s. 243–260.
- KIMURA, M. (1983). *The Neutral Theory of Molecular Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge.
- KIPARSKY, P. (1983). Word-formation and the lexicon. W: F. Ingemann, red., *Proceedings of the 1982 Mid-America Linguistics Conference*, s. 3–29, Lawrence. University of Kansas.
- KIRBY, S. (1999). *Function, Selection, and Innateness: The Emergence of Language Universals*. Oxford University Press, Oxford.
- KIRBY, S. (2001). Spontaneous evolution of linguistic structure – An iterated learning model of the emergence of regularity and irregularity. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 5(2), s. 102–110.
- KIRBY, S. (2002a). Learning, bottlenecks and the evolution of recursive syntax. W: T. Briscoe, red., *Linguistic Evolution through Language Acquisition*. Cambridge University Press, Cambridge.
- KIRBY, S. (2002b). Natural language from artificial life. *Artificial Life*, 8(2), s. 185–215.
- KIRBY, S. (2007). The evolution of language. W: R.I.M. Dunbar, L. Barrett, red., *The Oxford Handbook of Evolutionary Psychology*, s. 669–681. Oxford University Press, Oxford.
- KIRBY, S. (2012). Language is an adaptive system: The role of cultural evolution in the origins of structure. W: M. Tallerman, K.R. Gibson,

- red., *The Oxford Handbook of Language Evolution*, s. 589–604. Oxford University Press, Oxford.
- KIRBY, S., HURFORD, J. (1997). Learning, culture and evolution in the origin of linguistic constraints. W: P. Husbands, I. Harvey, red., *Fourth European Conference on Artificial Life*, s. 493–502, Cambridge, MA. MIT Press.
- KIRBY, S., HURFORD, J. (2002). The emergence of linguistic structure: An overview of the iterated learning model. W: A. Cangelosi, D. Parisi, red., *Simulating the Evolution of Language*, rozdz. 6, s. 121–148. Springer-Verlag, London.
- KIRBY, S., CORNISH, H., SMITH, K. (2008). Cumulative cultural evolution in the laboratory: An experimental approach to the origins of structure in human language. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(31), s. 10681–10686.
- KIRBY, S., GRIFFITHS, T., SMITH, K. (2014). Iterated learning and the evolution of language. *Current Opinion in Neurobiology*, 28, s. 108–114.
- KNIGHT, C. (1998). Ritual/speech coevolution: a solution to the problem of deception. W: J. Hurford, M. Studdert-Kennedy, C. Knight, red., *Approaches to the Evolution of Language: Social and Cognitive Bases*, s. 68–91. Cambridge University Press, Cambridge.
- KNUTH, D.E. (1996). Forward. W: M. Petkovšek, H.S. Wilf, D. Zeilberger, *A=B*, s. vii. A.K. Peters, Ltd., Wellesley, MA.
- KOMAROVA, N.L., NOWAK, M.A. (2003). Language dynamics in finite populations. *Journal of Theoretical Biology*, 221(3), s. 445–457.
- KOZMA, B., BARRAT, A. (2008). Consensus formation on adaptive networks. *Physical Review E*, 77(1), s. 016102.
- LAKOFF, G. (2011). *Kobiety, ogień i rzeczy niebezpieczne: co kategorie mówią nam o umyśle?* Przeł. M. Buchta, A. Kotarba, A. Skucińska. Towarzystwo Autorów i Wydawców Prac Naukowych Universitas, Kraków.
- LAKOFF, G., JOHNSON, M. (1980). *Metaphors We Live By*. University of Chicago Press, Chicago.
- LEKVAM, T. (2014). *Co-evolving Language and Social Structure Using a Genetic Algorithm*. Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology. Online: <http://hdl.handle.net/11250/253977> (Dostęp 17.02.2015).
- LEKVAM, T., GAMBÄCK, B., BUNGUM, L. (2014). Agent-based modeling of language evolution. W: A. Lenci, M. Padró, T. Poibeau, A. Villavi-

- cencio, red., *Proceedings of the 5th Workshop on Cognitive Aspects of Computational Language Learning (CogACLl)@ EACL*, s. 49–54, Gothenburg, Sweden. Association for Computational Linguistics.
- LENAERTS, T., JANSEN, B., TUYLS, K., DE VYLDER, B. (2005). The evolutionary language game: An orthogonal approach. *Journal of Theoretical Biology*, 235(4), s. 566–582.
- LEWENS, T. (2015). *Cultural Evolution: Conceptual Challenges*. Oxford University Press, Oxford.
- LEWIS, M.P., red. (2009). *Ethnologue: Languages of the World*. SIL International, Dallas, Tex., 16th edition. Wersja online: <http://www.ethnologue.com/> (Dostęp 05.01.2011).
- LI, B., CHEN, G., CHOW, T.W. (2013). Naming game with multiple hearers. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 18(5), s. 1214–1228.
- LILJENCRAENTS, J., LINDBLOM, B. (1972). Numerical simulation of vowel quality systems: The role of perceptual contrast. *Language*, 48, s. 839–862.
- LIN, B.-Y., REN, J., YANG, H.-J., WANG, B.-H. (2006). Naming game on small-world networks: The role of clustering structure. Online: ArXiv preprint [arXiv:physics/0607001](http://arxiv.org/abs/physics/0607001) (Dostęp 20.06.2011).
- LIPOWSKA, D. (2011). Naming game and computational modelling of language evolution. *Computational Methods in Science and Technology*, 17(1-2), s. 41–51.
- LIPOWSKA, D. (2012a). Gra w nazywanie z preferencyjnym wyborem partnerów. *Investigationes Linguisticae*, XXV, s. 108–127. Dostępne online: <http://www.staff.amu.edu.pl/~inveling/index.php?direct=286>.
- LIPOWSKA, D. (2012b). Language diversity in the naming game on adaptive weighted networks. W: L. McCrohon, T. Fujimura, K. Fujita, R. Martin, K. Okanoya, R. Suzuki, N. Yusa, red., *Five Approaches to Language Evolution. Proceedings of the Workshops of the 9th International Conference on the Evolution of Language (Evolang IX)* 13 March 2012, Kyoto, Japan, s. 140–144. Online: <http://kyoto.evolang.org/content/program> (Dostęp 13.01.2013).
- LIPOWSKA, D., LIPOWSKI, A. (2012). Naming game on adaptive weighted networks. *Artificial Life*, 18, s. 311–323.
- LIPOWSKI, A., LIPOWSKA, D. (2005). Traveling salesman problem with a center. *Physical Review E*, 71(6), s. 067701.

- LIPOWSKI, A., LIPOWSKA, D. (2008). Bio-linguistic transition and Baldwin effect in an evolutionary naming-game model. *International Journal of Modern Physics C*, 19(3), s. 399–407.
- LIPOWSKI, A., LIPOWSKA, D. (2009a). Computational modeling of evolutionary systems. W: M. Lachowicz, J. Miękiś, red., *From Genetics to Mathematics*, vol. 79 of *Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences*, rozdz. 6, s. 173–210. World Scientific, Singapore.
- LIPOWSKI, A., LIPOWSKA, D. (2009b). Language structure in the n -object naming game. *Physical Review E*, 80(5), s. 056107-1–056107-8.
- LIPOWSKI, A., LIPOWSKA, D. (2012). Roulette-wheel selection via stochastic acceptance. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(6), s. 2193–2196.
- LIPOWSKI, A., LIPOWSKA, D., FERREIRA, A.L. (2014). Emergence of social structures via preferential selection. *Physical Review E*, 90, s. 032817-1–032817-5.
- LIU, R.-R., JIA, C.-X., YANG, H.-X., WANG, B.-H. (2009). Naming game on small-world networks with geographical effects. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 388(17), s. 3615–3620.
- LORKIEWICZ, W., KATARZYŃIAK, R. (2014). Multi-participant interaction in multi-agent naming game. *Computational Methods in Science and Technology*, 20(2), s. 59–80.
- LORKIEWICZ, W., KATARZYŃIAK, R., KOWALCZYK, R. (2012). Individual semiosis in multi-agent systems. W: N.T. Nguyen, red., *Transactions on Computational Collective Intelligence VII*, s. 164–197. Springer, Berlin, Heidelberg.
- LOU, Y., CHEN, G. (2015). Analysis of the „naming game” with learning errors in communications. *Scientific Reports*, 5, s. 12191. Online: <http://www.nature.com/articles/srep12191> (Dostęp 21.01.2016).
- LU, Q., KORNISS, G., SZYMANSKI, B.K. (2006). Naming games in spatially-embedded random networks. W: G. Trajkovski, S. Collins, red., *Interaction and Emergent Phenomena in Societies of Agents. Proceedings of the American Association for Artificial Intelligence Fall 2006 Symposium*, s. 148–155, Menlo Park, CA. AAAI Press.
- LU, Q., KORNISS, G., SZYMANSKI, B.K. (2008). Naming games in two-dimensional and small-world-connected random geometric networks. *Physical Review E*, 77(1), s. 016111.
- LU, Q., KORNISS, G., SZYMANSKI, B. (2009). The naming game in social networks: Community formation and consensus engineering. *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 4, s. 221–235.

- LYON, C., NEHANIV, C., CANGELOSI, A., red. (2007). *Emergence of Communication and Language*. Springer, London.
- LYONS, J. (1976). *Wstęp do językoznawstwa*. Przeł. K. Bogacki. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- LYONS, J. (1984). *Semantyka*. Przeł. A. Weinsberg. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- ŁASTOWSKI, K. (2014). Główne idee ewolucyjne nowożytnej wiedzy biologicznej. Zarys analizy historyczno-metodologicznej. Online: <http://www.pdf-archive.com/2015/05/25/lastowski-22-iv/> (Dostęp 14.04.2016).
- MAITY, S.K., MUKHERJEE, A., TRIA, F., LORETO, V. (2013). Emergence of fast agreement in an overhearing population: The case of the naming game. *EPL (Europhysics Letters)*, 101(6), s. 68004.
- MARKMAN, E.M., WACHTEL, G.F. (1988). Children's use of mutual exclusivity to constrain the meanings of words. *Cognitive Psychology*, 20(2), s. 121–157.
- MAYLEY, G. (1996). Landscapes, learning costs, and genetic assimilation. *Evolutionary Computation*, 4(3), s. 213–234. Special Issue: The Baldwin Effect.
- MAYNARD SMITH, J. (1982). *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge University Press, Cambridge.
- MAYNARD SMITH, J., SZATHMÁRY, E. (1995). *The Major Transitions in Evolution*. W.H. Freeman, Oxford.
- MAZIARZ, M., PIASECKI, M., SZPAKOWICZ, S., RABIEGA-WIŚNIEWSKA, J. (2011). Semantic Relations among Nouns in Polish WordNet Grounded in Lexicographic and Semantic Tradition. *Cognitive Studies*, 11, s. 161–181.
- MAZIARZ, M., PIASECKI, M., SZPAKOWICZ, S. (2013). The chicken-and-egg problem in wordnet design: synonymy, synsets and constitutive relations. *Language Resources and Evaluation*, 47(3), s. 769–796.
- HEINE, B. (1997). *Cognitive Foundations of Grammar*. Oxford University Press, Oxford.
- MERRIMAN, W.E., BOWMAN, L.L., MACWHINNEY, B. (1989). The mutual exclusivity bias in children's word learning. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 54(3/4), s. 1–129.
- MILLER, G.A. (1995). WordNet: A lexical database for English. *Communications of the ACM*, 38(11), s. 39–41.

- MILLIKAN, R.G. (2005). *Language: A biological model*. Oxford University Press, New York.
- MINETT, J.W., WANG, W.S.-Y. (2008). Modelling endangered languages: The effects of bilingualism and social structure. *Lingua*, 118(1), s. 19–45.
- MOSELEY, C., red. (2010). *Atlas of the World's Languages in Danger*. UNESCO Publishing, Paris, 3rd edition. Wersja online: <http://www.unesco.org/culture/en/endangeredlanguages/atlas> (Dostęp 05.01.2011).
- MOTTER, A.E., DE MOURA, A.P., LAI, Y.-C., DASGUPTA, P. (2002). Topology of the conceptual network of language. *Physical Review E*, 65(6), s. 065102.
- MUFWENE, S.S. (2002). Competition and selection in language evolution. *Selection*, 3(1), s. 45–56.
- MUNROE, S., CANGELOSI, A. (2002). Learning and the evolution of language: The role of cultural variation and learning costs in the Baldwin effect. *Artificial Life*, 8(4), s. 311–339.
- MURPHY, M.L. (2003). *Semantic Relations and the Lexicon: Antonymy, Synonymy and other Paradigms*. Cambridge University Press, Cambridge.
- NAGY, W.E., SCOTT, J.A. (2000). Vocabulary processes. W: M.L. Kamil, P.B. Mosenthal, P.D. Pearson, R. Barr, red., *Handbook of Reading Research*, vol. 3, s. 269–284. Erlbaum, Mahwah, NJ.
- NETTLE, D. (1999a). Is the rate of linguistic change constant? *Lingua*, 108(2), s. 119–136.
- NETTLE, D. (1999b). Using social impact theory to simulate language change. *Lingua*, 108(2-3), s. 95–117.
- NEWMAN, M.E. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, 45(2), s. 167–256.
- NEWMAYER, F.J. (2000). On the reconstruction of 'proto-world' word order. W: C. Knight, M. Studdert-Kennedy, J. Hurford, red., *The Evolutionary Emergence of Language: Social Function and the Origins of Linguistic Form*, s. 372–388. Cambridge University Press, Cambridge.
- NOLFI, S., MIROLI, M., red. (2010). *Evolution of Communication and Language in Embodied Agents*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- NOWAK, A., RYCHWALSKA, A., BORKOWSKI, W. (2013). Why simulate? To develop a mental model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 16(3), s. 12. Online: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/3/12.html> (Dostęp 25.10.2015).

- NOWAK, M.A., KOMAROVA, N.L. (2001). Towards an evolutionary theory of language. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(7), s. 288–295.
- NOWAK, M.A., KRAKAUER, D. (1999). The evolution of language. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 96(14), s. 8028–8033.
- NOWAK, M.A., PLOTKIN, J.B., KRAKAUER, D.C. (1999). The evolutionary language game. *Journal of Theoretical Biology*, 200(2), s. 147–162.
- O'NEILL, M., RYAN, C. (2004). Grammatical evolution by grammatical evolution: The evolution of grammar and genetic code. W: M. Keijzer *et al.*, red., *Genetic Programming: 7th European Conference, EuroGP 2004*, Lecture Notes in Computer Science 3003, s. 138–149, Berlin Heidelberg. Springer.
- PIGLIUCCI, M., MÜLLER, G.B., red. (2010). *Evolution: The Extended Synthesis*. The MIT Press, Cambridge, Mass.
- PINKER, S. (1984). *Language Learning and Language Development*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- PINKER, S. (1994). *The Language Instinct*. Harper Collins, New York.
- PINKER, S., BLOOM, P. (1990). Natural language and natural selection. *Behavioral and Brain Sciences*, 13(4), s. 707–784.
- POLAŃSKI, K., red. (1999). *Encyklopedia językoznawstwa ogólnego*. Wyd. 2. Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław.
- PUGLISI, A., BARONCHELLI, A., LORETO, V. (2008). Cultural route to the emergence of linguistic categories. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(23), s. 7936–7940.
- QUINE, W.V.O. (1951). Two dogmas of empiricism. *The Philosophical Review*, 60(1), s. 20–43.
- QUINE, W.V.O. (1999). *Słowo i przedmiot*. Przeł. C. Cieśliński. Fundacja Aletheia, Warszawa.
- REBOUL, A.C. (2015). Why language really is not a communication system: A cognitive view of language evolution. *Frontiers in Psychology*, 6, s. 1434. Online: <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01434> (Dostęp 25.04.2016).
- REDFORD, M.A., CHEN, C.C., MIKKULAINEN, R. (1998). Modeling the emergence of syllable systems. W: M.A. Gernsbacher, S.J. Derry, red., *Proceedings of the Twentieth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, s. 882–886, Hillsdale, NJ. Erlbaum.
- RITCHIE, G., KIRBY, S. (2005). Selection, domestication, and the emergence of learned communication systems. W: *Proceedings of the Second*

- International Symposium on the Emergence and Evolution of Linguistic Communication (EELC'05)*, s. 108–116.
- RITCHIE, G., KIRBY, S. (2006). Modelling the transition to learned communication: An initial investigation into the ecological conditions favouring cultural transmission. W: A. Cangelosi, A. Smith, K. Smith, red., *The Evolution of Language: Proceedings of the 6th International Conference on the Evolution of Language*, s. 283–290, Singapore. World Scientific.
- RODALE, J.I. (1978). *The Synonym Finder*. Rodale Press, Emmaus, Pa.
- SCHULZE, C., STAUFFER, D., WICHMANN, S. (2008). Birth, survival and death of languages by Monte Carlo simulation. *Communications in Computational Physics*, 3(2), s. 271–294.
- SCOTT-PHILLIPS, T. (2014). *Speaking Our Minds: Why human communication is different, and how language evolved to make it special*. Palgrave MacMillan, London.
- SERVA, M., PETRONI, F. (2008). Indo-European languages tree by Levenshtein distance. *EPL (Europhysics Letters)*, 81(6), s. 68005.
- SIGMAN, M., CECCHI, G.A. (2002). Global organization of the WordNet lexicon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(3), s. 1742–1747.
- SIMON, H.A. (1962). The architecture of complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106(6), s. 467–482.
- SIMPSON, G.G. (1953). The Baldwin effect. *Evolution*, 7(2), s. 110–117.
- SISKIND, J.M. (1996). A computational study of cross-situational techniques for learning word-to-meaning mappings. *Cognition*, 61(1), s. 39–91.
- SKALLMAN, E. (2012). *The interplay of synonymy and polysemy: the case of arrojar, echar, lanzar and tirar*. Master's thesis in Theoretical Linguistics, University of Tromsø.
- SKYRMS, B., PEMANTLE, R. (2000). A dynamic model of social network formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(16), s. 9340–9346.
- SMITH, A.D. (2014). Models of language evolution and change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 5(3), s. 281–293. Online: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcs.1285/full> (Dostep 14.01.2016).
- SMITH, K. (2002). Natural selection and cultural selection in the evolution of communication. *Adaptive Behavior*, 10(1), s. 25–45.

- SMITH, K., KIRBY, S., BRIGHTON, H. (2003). Iterated learning: A framework for the emergence of language. *Artificial Life*, 9(4), s. 371–386.
- SŁOWOSIEĆ (2014). Statystyki. Grupa Technologii Językowych G4.19 Politechniki Wrocławskiej. Online: <http://plwordnet.pwr.wroc.pl/wordnet/stats> (Dostęp 23.07.2015).
- STEELS, L. (1995). A self-organizing spatial vocabulary. *Artificial Life*, 2(3), s. 319–332.
- STEELS, L. (1996). Emergent adaptive lexicons. W: P. Maes, M. Mataric, J.-A. Meyer, J. Pollack, S.W. Wilson, red., *From Animals to Animats 4: Proceedings of the Fourth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, s. 562–567, Cambridge, MA. The MIT Press.
- STEELS, L. (1998a). The origins of ontologies and communication conventions in multi-agent systems. *Journal of Agents and Multi-Agent Systems*, 1(2), s. 169–194.
- STEELS, L. (1998b). Synthesising the origins of language and meaning using co-evolution, self-organisation and level formation. W: J. Hurford, M. Studdert-Kennedy, C. Knight, red., *Approaches to the Evolution of Language: Social and Cognitive Bases*, s. 384–404. Cambridge University Press, Cambridge.
- STEELS, L. (2000a). Language as a complex adaptive system. W: M. Schoenauer, K. Deb, G. Rudolph, X. Yao, E. Lutton, J. Merelo, H.P. Schwefel, red., *Proceedings of the 6th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, Lecture Notes in Computer Science vol. 1917, s. 17–26. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- STEELS, L. (2000b). The puzzle of language evolution. *Kognitionswissenschaft*, 8(4), s. 143–150.
- STEELS, L. (2001a). Language games for autonomous robots. *IEEE Intelligent Systems*, 16(5), s. 16–22.
- STEELS, L. (2001b). Social learning and verbal communication with humanoid robots. W: *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, s. 335–342, Piscataway, NY. IEEE Press.
- STEELS, L. (2002). Iterated learning versus language games. Two models for cultural language evolution. W: C. Hemelrijk, E. Bonabeau, red., *Proceedings of the International Workshop of Self-Organization and Evolution of Social Behaviour*, Zurich. University of Zurich.
- STEELS, L. (2003). Language re-entrance and the 'inner voice'. *Journal of Consciousness Studies*, 10(4-5), s. 4–5.

- STEELS, L., red. (2012a). *Experiments in Cultural Language Evolution*. John Benjamins Publishing, Amsterdam.
- STEELS, L. (2012b). Grounding language through evolutionary language games. W: L. Steels, M. Hild, red., *Language Grounding in Robots*, s. 1–22. Springer, New York.
- STEELS, L. (2012c). Self-organization and selection in cultural language evolution. W: L. Steels, red., *Experiments in Cultural Language Evolution*, s. 1–37. John Benjamins Publishing, Amsterdam.
- STEELS, L., BELPAEME, T. (2005). Coordinating perceptually grounded categories through language: A case study for colour. *Behavioral and Brain Sciences*, 28(4), s. 469–489.
- STEELS, L., KAPLAN, F. (1999). Collective learning and semiotic dynamics. W: D. Floreano, J.-D. Nicoud, F. Mondada, red., *Advances in Artificial Life. Proceedings of the Fifth European Conference, ECAL'99*, Lecture Notes in Computer Science vol. 1674, s. 679–688. Springer-Verlag, Berlin.
- STEELS, L., KAPLAN, F. (2002). Aibo's first words: The social learning of language and meaning. *Evolution of Communication*, 4(1), s. 3–32.
- STEELS, L., MCINTYRE, A. (1999). Spatially distributed naming games. *Advances in Complex Systems*, 1(04), s. 301–323.
- STEELS, L., KAPLAN, F., MCINTYRE, A., VAN LOOVEREN, J. (2002). Crucial factors in the origins of word-meaning. W: A. Wray, red., *The transition to language*, rozdz. 12, s. 252–271. Oxford University Press, Oxford, UK.
- STERMAN, J.D. (1994). Learning in and about complex systems. *System Dynamics Review*, 10(2), s. 291–330.
- SZATHMÁRY, E. (2000). The evolution of replicators. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 355(1403), s. 1669–1676.
- SZATHMÁRY, E. (2010). Evolution of language as one of the major evolutionary transitions. W: S. Nolfi, M. Mirolli, red., *Evolution of Communication and Language in Embodied Agents*, s. 37–53. Springer, Berlin Heidelberg.
- SZATHMÁRY, E., SZATHMÁRY, Z., ITTZÉS, P., ORBAÁN, G., ZACHÁR, I., HUSZÁR, F., FEDOR, A., VARGA, M., SZÁMADÓ, S. (2007). *In silico* evolutionary developmental neurobiology and the origin of natural language. W: C. Lyon, C. Nehaniv, A. Cangelosi, red., *Emergence of Communication and Language*, s. 151–187. Springer, London.

- ŚWIDZIŃSKI, M., DERWOJEDOWA, M., RUDOLF, M. (2002). Dehomonimizacja i desynkretyzacja w procesie automatycznego przetwarzania wielkich korpusów tekstów polskich. *Biuletyn Polskiego Towarzystwa Językoznawczego*, LVIII, s. 175–186.
- THOMPSON, B., KIRBY, S., SMITH, K. (2016). Culture shapes the evolution of cognition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Online: <https://doi.org/10.1073/pnas.1523631113> (Dostęp 11.04.2016).
- THOMPSON, W.I. (2009). *Self and Society: Studies in the Evolution of Culture*. Wyd. 2, rozsz. Imprint Academic, Charlottesville, VA.
- TOMASELLO, M. (2002). *Kulturowe źródła ludzkiego poznawania*. Przeł. J. Rączaszek. PIW, Warszawa.
- TOMASELLO, M. (2009). *Constructing a Language: A Usage-based Theory of Language Acquisition*. Harvard University Press, Cambridge.
- TOMASELLO, M., TODD, J. (1983). Joint attention and lexical acquisition style. *First Language*, 4(12), s. 197–211.
- TURKEL, W.J. (2002). The learning guided evolution of natural language. W: E.J. Briscoe, red., *Linguistic Evolution through Language Acquisition: Formal and Computational Models*, s. 235–254. Cambridge University Press, Cambridge.
- TURNEY, P. (1996). Myths and legends of the Baldwin effect. W: T. Fogarty, G. Venturini, red., *Proceedings of the ICML-96 (13th International Conference on Machine Learning, Workshop on Evolutionary Computing and Machine Learning, Bari, Italy)*, s. 135–142.
- TURNEY, P., WHITLEY, D., ANDERSON, R.W. (1996). Evolution, learning, and instinct: 100 years of the Baldwin effect. *Evolutionary Computation*, 4(3), s. iv–viii. Special Issue: The Baldwin Effect.
- ULBAEK, I. (1998). The origin of language and cognition. W: J.R. Hurford, M. Studdert-Kennedy, C. Knight, red., *Approaches to the Evolution of Language: Social and Cognitive Bases*, s. 30–43. Cambridge University Press, Cambridge.
- ULLMANN, S. (1976). *The Principles of Semantics. A Linguistic Approach to Meaning*. Blackwell, Oxford.
- UNESCO (2003). *Language Vitality and Endangerment*. UNESCO Ad Hoc Expert Group on Endangered Languages. Document submitted to the International Expert Meeting on UNESCO Programme Safeguarding of Endangered Languages, Paris, 10–12 March 2003.
- UTT, J., PADÓ, S. (2011). Ontology-based distinction between polysemy and homonymy. W: *Proceedings of the Ninth International Conference*

- on *Computational Semantics*, s. 265–274. Association for Computational Linguistics.
- VETULANI, Z., KUBIS, M., OBRĘBSKI, T. (2010). PolNet – Polish WordNet: Data and tools. W: N. Calzolari, K. Choukri, B. Maegaard, J. Mariani, J. Odijk, S. Piperidis, M. Rosner, D. Tapias, red., *Proceedings of the Seventh International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'10)*, s. 3793–3797, Valletta, Malta. European Language Resources Association (ELRA).
- VOGT, P. (2000). *Lexicon Grounding on Mobile Robots*. Ph.D. thesis, Vrije Universiteit Brussel, Brussels.
- VOGT, P. (2001). The impact of non-verbal communication on lexicon formation. W: B. Kröse, M. De Rijke, G. Schreiber, M. Van Someren, red., *Proceedings of the 13th Belgian/Netherlands Artificial Intelligence Conference, BNAIC'01*.
- VOGT, P. (2003). Anchoring of semiotic symbols. *Robotics and Autonomous Systems*, 43(2), s. 109–120.
- VOGT, P. (2009). Modeling interactions between language evolution and demography. *Human Biology*, 81(2), s. 237–258.
- VOGT, P., COUMANS, H. (2003). Investigating social interaction strategies for bootstrapping lexicon development. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(1).
- VOGT, P., DE BOER, B. (2010). Language evolution: Computer models for empirical data. *Adaptive Behavior*, 18(1), s. 5–11.
- VOGT, P., DIVINA, F. (2007). Social symbol grounding and language evolution. *Interaction Studies*, 8(1), s. 31–52.
- WACEWICZ, S. (2008). Ewolucja języka: horyzont metodologiczny. W: P. Stalmaszczyk, red., *Metodologie językoznawstwa. Współczesne tendencje i kontrowersje*, s. 27–42. Wydawnictwo LEXIS, Kraków.
- WACEWICZ, S. (2013). Ewolucja języka – współczesne kontrowersje. W: P. Stalmaszczyk, red., *Metodologie językoznawstwa 1. Ewolucja języka. Ewolucja teorii językoznawczych*, s. 11–26. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- WACEWICZ, S., ŻYWICZYŃSKI, P. (2015). Language evolution: Why Hockett's design features are a non-starter. *Biosemiotics*, 8(1), s. 29–46.
- WADDINGTON, C.H. (1975). *The Evolution of an Evolutionist*. Edinburgh University Press, Edinburgh.
- WAGNER, K. (2000). Cooperative strategies and the evolution of communication. *Artificial Life*, 6(2), s. 149–179.

- WAGNER, K., REGGIA, J.A., URIAGEREKA, J., WILKINSON, G.S. (2003). Progress in the simulation of emergent communication and language. *Adaptive Behavior*, 11(1), s. 37–69.
- WANG, W., LIN, B., TANG, C., CHEN, G. (2007). Agreement dynamics of finite-memory language games on networks. *The European Physical Journal B*, 60(4), s. 529–536.
- WANG, W.S.-Y., KE, J., MINETT, J.W. (2004). Computational studies of language evolution. W: C.-R. Huang, W. Lenders, red., *Computational Linguistics and Beyond: Perspectives at the beginning of the 21st Century*, vol. 1 of *Language and Linguistics Monograph Series B: Frontiers in Linguistics*, s. 65–108. Academia Sinica, Taipei.
- WASSERMAN, S., FAUST, K. (1994). *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge.
- WATANABE, Y., SUZUKI, R., ARITA, T. (2008). Language evolution and the Baldwin effect. *Artificial Life and Robotics*, 12(1-2), s. 65–69.
- WEBER, B.H., DEPEW, D.J. (2003). *Evolution and Learning: The Baldwin Effect Reconsidered*. The MIT Press, Cambridge, MA.
- WEBER, G. (1997). Top languages: The world's 10 most influential languages. *Language Today*, 2. Online: <http://www.andaman.org/BOOK/reprints/weber/Weber-TopTen.htm> (Dostęp 05.01.2011).
- WELLENS, P. (2012). *Adaptive Strategies in the Emergence of Lexical Systems*. Ph.D. thesis, Vrije Universiteit Brussel, Brussels.
- WELLENS, P., LOETZSCH, M. (2012). Multidimensional meanings in lexicon formation. W: L. Steels, red., *Experiments in Cultural Language Evolution*, vol. 3, s. 143–166. John Benjamins Publishing, Amsterdam.
- WEXLER, K., CULICOVER, P. (1980). *Formal Principles of Language Acquisition*. MIT Press, Cambridge, MA.
- WHEELER, M.W. (1980). Analogy and inflectional affix replacement. W: E.C. Traugott, R. Labrum, S. Shepherd, red., *Papers from the 4th International Conference on Historical Linguistics*, vol. 14 of *Current Issues in Linguistics Theory*, s. 273–283. John Benjamins Publishing.
- WHITE, H.C., BOORMAN, S.A., BREIGER, R.L. (1976). Social structure from multiple networks. I. Blockmodels of roles and positions. *American Journal of Sociology*, 81(4), s. 730–780.
- WIERTLEWSKA-BIELARZ, J. (2010). O pojęciu użycia w *Dociekaniach filozoficznych*. *Principia*, LIII, s. 67–84.
- WILES, J., WATSON, J., TONKES, B., DEACON, T. (2002). Strange loops in learning and evolution. *InterJournal Complex Systems* [572]. Presented

- at the International Conference on Complex Systems (ICCS 2002).
- WITTGENSTEIN, L. (2000). *Dociekania filozoficzne*. [Philosophical Investigations 1953] Przeł. B. Wolniewicz. Wyd. 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- WOŁOS, M. (2002). *Koncepcja „gry językowej” Wittgensteina w świetle badań współczesnego językoznawstwa*. TAIWPN Universitas, Kraków.
- WORDNET (2010). *Princeton University „About WordNet”*. Princeton University. Online: <http://wordnet.princeton.edu/> (Dostęp 23.07.2015).
- WRAY, A. (1998). Protolanguage as a holistic system for social interaction. *Language & Communication*, 18(1), s. 47–67.
- YAMAUCHI, H. (2004). *Baldwinian Accounts of Language Evolution*. Ph.D. thesis, Theoretical and Applied Linguistics, University of Edinburgh, Scotland.
- YU, C., SMITH, L.B. (2007). Rapid word learning under uncertainty via cross-situational statistics. *Psychological Science*, 18(5), s. 414–420.
- ZHANG, W., LIM, C.C. (2010). Noise in naming games, partial synchronization and community detection in social networks. Online: ArXiv preprint [arXiv:1008.4115](https://arxiv.org/abs/1008.4115) (Dostęp 01.04.2014).
- ZIPF, G.K. (1945). The meaning-frequency relationship of words. *The Journal of General Psychology*, 33(2), s. 251–256.
- ZUIDEMA, W., WESTERMANN, G. (2003). Evolution of an optimal lexicon under constraints from embodiment. *Artificial Life*, 9(4), s. 387–402.
- ŻYWICZYŃSKI, P., WACEWICZ, S. (2015). *Ewolucja języka. W stronę hipotez gesturalnych*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń.

Computational modelling of language evolution (Summary)

Language evolution is a new but rapidly developing discipline, which aims, or at least hopes, to explain the origin and evolution of language. This is certainly an interdisciplinary research field, which integrates human biology, our culture and language with more basic or empirical sciences. Using the evolutionary paradigm, one examines various biological and cultural mechanisms that could lead, during human phylogenesis, to the emergence of this unique ability to acquire and use language. The present monograph covers certain aspects of this research area, especially those related to evolutionary linguistics. One of the main objectives of evolutionary linguistics is to explain how language structures could develop as a result of cultural transmission. In a broader context this problem might be considered as an emergent effect in complex adaptive systems. Recently, computer modelling has become a tool which is efficient and increasingly used to analyze such systems. The monograph is focused on the applications of computer modelling in evolutionary linguistics, and in particular on the use of language games implemented as multi-agent systems. Computer simulations of language games enable us to examine how a population of individuals can reach a consensus on some linguistic conventions, e.g., names. The emergence of such a global synchronization results entirely from local interactions between these individuals, without any central control or steering.

Chapter 1 introduces us to the problems of the evolution of language, examined especially from a selectionist perspective. Language is considered as a complex adaptive system which obeys the principles of selection and self-organization. The complexity of such systems implies that computer modelling is an indispensable and virtually the only possible research tool. The basic techniques of computer modelling that could be used in evolutionary linguistics are also briefly described.

Chapter 2 describes an important class of models, namely language games, which are intended to mimic the process of negotiation in a population of some commonly shared linguistic conventions. Such games demonstrate that a global consensus might spontaneously emerge in a population of locally interacting individuals (here referred to as agents). After a brief mention of Wittgenstein's idea of language games, the general description and basic types of these models are presented. The naming game, which is one of the most fundamental language games, is described in some more details including its overall behaviour and some basic strategies.

The following chapters provide a comprehensive description of three language game models that were introduced by the Author. The results of computer simulations and their various implications are also discussed.

Chapter 3 presents a model that takes into account three processes playing a fundamental role in language evolution, namely, individual learning, cultural transmission, and biological evolution. Agents not only play a naming game but they also breed, mutate and die. Agents are equipped with a certain heritable ability to learn language and such a trait is subject to selection and adaptation. It turns out that in such a population of agents, at a certain moment a rapid increase in the linguistic performance of agents, as well as their ability to learn the language appears. Such a biolinguistic transition shows that learning a language influences (hereditary) learning ability and thus might be considered as a manifestation of the so-called Baldwin effect.

Chapter 4 presents a certain multi-object version of the naming game. In this case the system also self-organizes and as a result agents can successfully communicate. Moreover, the multi-object version of the naming game allows examination of certain additional features of the emerging language, such as homonymy and synonymy. Computer simulations show that during the evolution of the model, synonymy almost disappears, while homonymy seems to persist. Such a behaviour is consistent with observations of natural languages. Perhaps surprisingly, analysis of such properties might contribute to the debate about the adaptive aspects of language. Furthermore, the analyses of the role of noise on the formation of language shows that it helps to differentiate words and reduces homonymy and synonymy.

Chapter 5 describes the naming game on the adaptive weighted network, where agents prefer to communicate with those partners with which previous communication attempts were successful. The behaviour of the model depends on this preference. For a weak preference, as in an ordinary naming game, a global consensus is quickly reached. However, for a stronger

preference, the system stabilizes in a multi-language regime. Although the number of languages in the human population decreases, the current multi-language structure seems to be relatively stable, at least with respect to the most widely spoken ones. An apparent similarity to the predictions of this version of the naming game suggests that computer modelling might be relevant in some linguistic-demography studies.

In the summary, Keller's concept of a phenomenon of the third kind is recalled, an example of which is language as a spontaneous order subject to cultural evolution. Lewens's considerations on cultural evolutionism are also mentioned, leading to the conclusion that language games combine selectionist and kinetic approaches. Moreover, this unit provides a brief and more general description of methodologies used to study the cultural evolution of language with particular emphasis on computer modelling. The advantages and limitations of this technique are also mentioned.



Książka Doroty Lipowskiej spełnia dwa cele. Praca dotyczy ewolucji języka czy ściślej – językoznawstwa ewolucyjnego, czym wypełnia ogromną lukę w polskim piśmiennictwie naukowym na temat tego pola badawczego. Oprócz waloru popularyzatorskiego, który praca niewątpliwie posiada, jej podstawowa zaleta ma charakter ściśle naukowy – Autorka przedstawia własny, realizowany przez lata program badawczy i wynikające z niego dokonania, które stanowią znaczny wkład w rozwój językoznawstwa ewolucyjnego.

Na pochwałę zasługuje styl pracy łączący rygor narracji naukowej ze swadą pisarską, dzięki czemu książka jest doskonałą lekturą dla wszystkich zainteresowanych ogólnie pojętą tematyką języka i jego powstania, a nie tylko zrozumiałą dla specjalistów w dziedzinie modelowania komputerowego.

Monografia jest pracą wybitną, która pokazuje to, co najcenniejsze w badaniach nad ewolucją języka – głębię dociekań prowadzonych na szerokim planie teoretycznym z odwołaniem do własnych, oryginalnych badań empirycznych.

dr hab. Przemysław Żywiczyński, prof. UMK
(z recenzji wydawniczej)

ISBN 978-83-232-3107-3

ISSN 1895-376X

