

Stagnacja gospodarcza i innowacje techniczne w okresie przedindustrialnym

Wojciech Pacho

Stagnacja gospodarcza i innowacje techniczne w okresie przedindustrialnym



OFICyna WYDAWNICZA
SZKOŁA GŁÓWNA HANDLOWA W WARSZAWIE
WARSZAWA 2013

Recenzent

Maciej K. Dudek

Redaktor

Aleksandra Mankiewicz-Malinowska

© Copyright by Wojciech Pacho & Szkoła Główna Handlowa w Warszawie,
Warszawa 2013

Wszelkie prawa zastrzeżone. Kopiowanie, przedrukowywanie i rozpowszechnianie całości
lub fragmentów niniejszej publikacji bez zgody wydawcy zabronione.

Wydanie I

ISBN 978-83-7378-863-3

Szkoła Główna Handlowa w Warszawie – Oficyna Wydawnicza

02-554 Warszawa, al. Niepodległości 162

tel. 22 564 94 77, 22 564 94 86, fax 22 564 86 86

www.wydawnictwo.sgh.waw.pl

e-mail: wydawnictwo@sgh.waw.pl

Projekt i wykonanie okładki

Studio Graficzne AGAT Jerzy Burski

Skład i łamanie

DM Quadro

Druk i oprawa

QUICK-DRUK s.c.

tel. 42 639 52 92

e-mail: quick@druk.pdi.pl

Zamówienie 167/IX/13

Chciałbym podziękować za merytoryczne wskazówki gronu pierwszych czytelników rękopisu niniejszej książki. Szczególne słowa podziękowania należą się Piotrowi Dworczakowi, którego wnikliwa krytyka pozwoliła mi udoskonalić wywód analityczny.

Spis treści

Wstęp	9
Rozdział 1	
Ewolucja hominidów – fakty archeologiczne	13
Rozdział 2	
Model ekspansji gospodarki łowiecko-zbierackiej	21
Rozdział 3	
Postęp technologiczny w społeczności przedagrarniej	43
Rozdział 4	
Okres przejściowy: od łowiectwa-zbieractwa do rolnictwa	71
Rozdział 5	
Zmienność klimatu a postęp techniczny	93
Rozdział 6	
Postęp techniczny w okresie agrarnym. Wyjście z pułapki stagnacji	115
Zakończenie	147
Bibliografia	153
Aneks do rozdziału 3	157

Wstęp

Anatomicznie wyodrębniony człowiek współczesny istnieje najprawdopodobniej od 200 tys. lat. Prawie przez cały ten okres posługuje się stworzonymi przez siebie narzędziami – najpierw bardzo prymitywnymi, stopniowo udoskonalanymi. Jak wynika z badań archeologicznych, proces zmian technicznych następował niezwykle powolnie. Właściwie dopiero mniej więcej od 200 lat, od rewolucji przemysłowej, ma miejsce przyspieszenie postępu technicznego. Jest to raptem 0,1% całego okresu naszego istnienia. To przyspieszenie jest tak silne, że współczesne pokolenia żyją w świecie, w którym dynamika i spektakularne efekty zmian technicznych są wprost obserwowalne, łatwo uchwytnie na poziomie świadomości potocznej – aby je dostrzec, nie trzeba być wyposażonym w wyrafinowane narzędzia badawcze. Za życia jednego pokolenia następuje wielokrotna wymiana używanych narzędzi w produkcji i dóbr konsumpcyjnych na całkowicie nowe, oparte na nowych ideach technicznych, produkty. Równoległe z przyspieszeniem postępu technicznego nastąpił niebywały wzrost poziomu życia, ogarniający w miarę upływu czasu coraz większą część ludzkości. Do rewolucji przemysłowej przeciętny poziom życia mierzony spożywanymi dobrami, jak również oczekiwana długość życia w momencie narodzin, były mniej więcej stabilne przez tysiące lat istnienia nowoczesnego człowieka. Dlaczego stagnacja w tych kluczowych obszarach dla życia człowieka trwała tak długo? Dlaczego postęp techniczny był tak powolny? Jaką właściwie odgrywał rolę w epoce przedindustrialnej? Oczywiście można rzec, że jego powolność była spowodowana biologiczną niedoskonałością mózgu człowieka, który potrzebował bardzo długiego okresu, aby wykształcić swoje możliwości poznawcze. Tak jednak nie było. Mniej więcej 100–70 tys. lat temu mózg człowiek był zdolny do takiej samej ekspresji jak u współczesnych ludzi. Co zatem spowalniało zmiany techniczne? A gdy już się dokonała jedna z najważniejszych zmian w społecznym życiu człowieka, a mianowicie przejście do rolnictwa (tzw. rewolucja neolityczna) mniej więcej 11 tys. lat temu, to dlaczego stagnacja przeciętnego poziomu życia nadal trwała? Przecież nie ulega wątpliwości, że rolnictwo przyniosło spektakularne zmiany techniczne polegające na umiejętności wytwarzania żywności w takiej ilości, że część społeczeństwa mogła trudnić się innymi zajęciami, takimi jak: rzemiosło, budownictwo, służba wojskowa, nauka, rządzenie. A mimo to stagnacja trwała nadal. Jeżeli miał miejsce postęp techniczny, to dlaczego nie przełamywał stagnacji?

Ponadto rozprzestrzenianie się zmian technicznych nie przebiegało równomiernie w skali globalnej. Niektóre społeczności „zastygły” w swoich archaicznych strukturach pochodzących z różnych okresów historycznych. Niektóre nie wyszły poza proste formy łowiectwa i zbieractwa, inne miały bardziej zaawansowane techniki polowania i zbierania żywności, jeszcze inne pozostały w różnych konstelacjach pasterstwa, ogrodnictwa, rolnictwa, myślistwa i zbieractwa. Skąd takie zróżnicowanie?

Mimo powolności postępu technicznego i stagnacji w poziomie życia naszemu gatunkowi udało się zasiedlić wszystkie kontynenty. Takiego wyczynu nie dokonały inne hominidy. Mało tego, one wymarły, a nasz gatunek pozostał niekwestionowanym zdobywcą wszystkich kontynentów. Jak to było możliwe, skoro postęp techniczny był tak niewielki?

Na te wszystkie pytania poszukuje się odpowiedzi w niniejszej książce. Przy czym nie jest ona pracą z zakresu archeologii. Nie interesuje nas zbieranie faktów i ich interpretacja w świetle wiedzy historycznej i archeologicznej. Na problematykę tę patrzymy jak ekonomiści na historię wzrostu gospodarczego w bardzo długiej perspektywie. Dzięki takiej długiej perspektywie można uchwycić rzeczywistą rolę zmiany technicznej i demograficznej oraz zidentyfikować przyczyny stagnacji w dziejach ludzkości. Wykorzystując narzędzia ekonomiczne, głównie funkcję produkcji jako klasyczny instrument w ekonomii przekształcania nakładów w wyniki oraz dążenie lokalnych układów do samoregulacji opartej na równowadze różnorodnych krańcowych czynników społecznych i przyrodniczych, staramy się ustalić, czy istnieją prawidłowości rządzące losami ludzkimi. Dlaczego tak długo trwało budowanie podwalin pod przejście do rolnictwa? Czy pojawienie się rolnictwa było nieuniknionym wynikiem procesów ewolucyjnych, w które był uwikłany człowiek? Czy wyjście z agrarnej stagnacji również było nieuchronnym wynikiem działalności człowieka?

Problematyka wzrostu gospodarczego z perspektywy niezwykle odległych okresów historycznych zyskuje ostatnio coraz większe zainteresowanie wśród ekonomistów. Jest to między innymi wynik postawionej przez J. Diamonda hipotezy, że przyczyn występowania różnic w poziomach rozwoju społeczności zamieszkujących różne kontynenty, a także dominacji jednych społeczności nad innymi i całkowitej marginalizacji innych, należy szukać w zamierzczłych czasach ewolucji człowieka, kiedy to pojawienie się rolnictwa było fundamentalną zmianą tworzącą podwaliny pod współczesną cywilizację¹. Wstępne badania wykazały między innymi istnienie

¹ J. Diamond, *Strzelby, zarazki, maszyny. Losy ludzkich społeczeństw*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.

związku pomiędzy długookresowymi zmianami demograficznymi a postępem technicznym, datą przejścia na rolnictwo a aktualnym poziomem rozwoju gospodarczego, pomiędzy początkowymi warunkami biologiczno-geograficznymi a momentem przejścia z łowiectwa-zbieractwa do rolnictwa i następnie produkcji przemysłowej. Okazało się, że przeszłość rzutuje na teraźniejszość, że pomiędzy różnymi fazami rozwoju ludzkości mogą wystąpić niewidoczne wprost zależności przyczynowo-skutkowe. Dało to asumpt do zbudowania całościowej teorii zdolnej do wyjaśnienia pojawiania się różnych historycznych faz wzrostu gospodarczego i prawidłowości przechodzenia od jednej fazy do drugiej. Została nawet ukuta nazwa na ten nowy nurt badawczy: *unified growth theory*. Ma on już swoich wybitnych przedstawicieli, jak: O. Galor, O. Olsson, O. Moav, N.-P. Lagerlöf, H. Strulik, J. Weisdorf, M. Goodfriend, J. McDermott, D. Weil, D.A. Hibbs². W niniejszej książce stawiamy sobie skromny cel, aby przyczynić się do poszerzenia wiedzy o wczesnych fazach ewolucji człowieka i tym samym wzbogacić dorobek *unified growth theory*.

Rozważania rozpoczynamy od krótkiego przeglądu ewolucji hominidów, aby pokazać pewną historyczną unikatowość naszego gatunku. Następnie podejmujemy próbę wyjaśnienia, w jaki sposób początkowo mała liczebnie grupa ludzi mogła w niedługim czasie zasiedlić wszystkie kontynenty (oprócz Antarktydy). Główną wagę przykładamy do wzajemnego oddziaływania czynników demograficznych i środowiskowych. Na tym etapie abstrahujemy od postępu technicznego, o którym szerzej będzie mowa w rozdziale 3. Postęp ten w początkowych okresach ewolucji człowieka opierał się na rozpoznawaniu i opanowywaniu wiedzy o funkcjonowaniu przyrody, z której bezpośrednio czerpano pożywienie. Przy czym jego dynamikę wiążemy z czynnikami demograficznymi. Zgodnie z tradycją ekonomii

² Zob. między innymi: J. Weisdorf, *From Stagnation to Growth. Revisiting Three Historical Regimes*, „Journal of Population Economics” 2004, vol. 17, no. 3; H. Strulik, J. Weisdorf, *Population, food, and knowledge: a simple unified growth theory*, „Journal of Economic Growth”, September 2008, vol. 13, no. 3; H. Strulik, *Knowledge and growth in the very long run*, University of Goettingen, „Center for European, Governance and Economic Development Research Discussion Papers” 2012, no. 145; O. Olsson, D.A. Hibbs, *Geography, Biogeography, and Why Some Countries Are Rich and Others Are Poor*, „Proceedings of the National Academy of Sciences” 2004, vol. 101, no. 10, www.pnas.org/content/101/10/3715.full.pdf+html, 10.08.2013; N.-P. Lagerlöf, *From Malthus to Modern Growth. Can Epidemics Explain the Three Regimes?*, „International Economic Review”, May 2003, vol. 44, no. 2; N.-P. Lagerlöf, *The Galor-Weil Model Revisited. A Quantitative Exercise*, „Review of Economic Dynamics”, January 2006, vol. 9, no. 1; M. Goodfriend, J. McDermott, *Early Development*, „American Economic Review” 1995, vol. 85, no. 1; O. Galor, *Unified growth theory*, Princeton University Press, Princeton 2011; O. Galor, D. Weil, *From Malthusian Stagnation to Modern Growth*, „American Economic Review” 1999, vol. 89, no. 2; O. Galor, D. Weil, *Population, Technology, and Growth. From Malthusian Stagnation to Demographic Transition and Beyond*, „American Economic Review” 2000, vol. 90, no. 4; O. Galor, *From Stagnation to Growth. Unified Growth Theory*, w: *Handbook of Economic Growth*, red. P. Aghion, S. Durlauf, North Holland, Amsterdam 2005.

dynamika ludności jest bezpośrednią siłą wprawiającą w ruch postęp techniczny. Jeśli równocześnie działają mechanizmy sprowadzające lokalne społeczne układy do równowagi, to zmiany techniczne wygasają. Istotne jednak były warunki zewnętrzne, które silnie oddziaływały na funkcjonowanie lokalnych społeczności, a mianowicie duża zmienność klimatu w okresie ostatniego zlodowacenia na Ziemi. W jaki sposób oddziaływały one na zmiany techniczne, omawiamy w rozdziale 5. Również w tym rozdziale podejmujemy fundamentalną kwestię: czy dynamika zmian technicznych w powiązaniu z dużą zmiennością klimatu nieuchronnie kierowała ewolucję ku rolnictwu? Gdy już pojawiło się rolnictwo, to radykalnie zmienił się przedmiot postępu technicznego. Nie było to już tylko poznawanie przyrody. Proces, który doprowadził ostatecznie do uformowania się gospodarki rolniczej, obejmuje etapy: od zidentyfikowania roślin (i zwierząt) nadających się do udomowienia, poprzez ich sianie (organizowanie hodowli zwierząt), nawadnianie, wprowadzenie zabiegów mających zwiększyć urodzaj (użyźnianie gleby, pielenie itp.) i wreszcie zbieranie plonów (pozyskiwanie produktów zwierzęcych). Każdy z tych etapów stał się obszarem poznawczym doskonałym i zmienianym poprzez proces *learning by doing*. Rozdział 6 poświęcony jest analizie warunków, dzięki którym ta nowa forma postępu technicznego mogła pomóc gospodarkom przełamać stagnację w poziomie życia.

Rozdział 1

Ewolucja hominidów – fakty archeologiczne

Początki powstania człowieka nadal są dosyć tajemnicze, nie do końca jeszcze precyzyjnie poznane. Przyjmuje się, że około 2,5 mln lat temu we wschodniej Afryce pojawiły się istoty praludzkie, nazwane *homo habilis*, czyli „człowiek zręczny”, które jako pierwsze potrafiły posługiwać się narzędziami. Były to bardzo proste, z dzisiejszej perspektywy, kamienne narzędzia służące do rozcinania upolowanych lub znalezionych zwierząt. Powstawały przez odłupanie od kamienia bocznych płatów poprzez uderzanie innym kamieniem. Powstały w ten sposób odłupek miał cienką, ostrą krawędź nadającą się do ćwiartowania mięsa. *Homo habilis* anatomicznie nie był podobny do współczesnego człowieka. Miał zdecydowanie mniejszy mózg, a jego długie ręce świadczą o tym, że był nie tylko istotą dwunożną, lecz także potrafił się wspinać po drzewach. Budową ciała był bardziej podobny do swoich przodków – australopiteków, czyli małpoludów – niż do człowieka współczesnego. Jednak to, co jest istotne w jego zachowaniu, to umiejętność świadomego projektowania i następnie wytwarzania narzędzi. Najprawdopodobniej nikt przed nim tego nie potrafił. W jego niewielkim umyśle (mniej więcej połowa rozmiaru mózgu współczesnego człowieka) musiało powstać wyobrażenie rezultatów sporządzenia narzędzia odłupanego od obłego kamienia (zwanego otoczakiem). Ta prosta czynność jest jednak istotnym świadectwem ogromnego postępu, jaki dokonał się w rozwoju zdolności poznawczych wczesnych praludzi (hominidów). Potrafili dostrzec ogromne możliwości tkwiące w otaczającej ich przyrodzie i poprzez praktyczne eksperymenty zrealizować plan wytworzenia i zastosowania narzędzi. Dowodem na to, iż stosowanie narzędzi przez *homo habilis* nie miało charakteru spontanicznego działania, lecz poprzedzone było namysłem, jest przenoszenie surowych otoczków z miejsc, gdzie występowały (na przykład w potokach rzek) do miejsc, gdzie były niezbędne, aby poćwiartować zwierzynę. Zatem świadomie planowano zapotrzebowanie na tego typu narzędzia³.

Około 1,8 mln lat temu klimat we wschodniej Afryce stał się bardziej zimny i suchy, co spowodowało powstanie sawanny na miejscu obszarów leśnych, które

³ D.R. Headrick, *Technology. A World History*, Oxford University Press, New York 2009, s. 2.

były naturalnym środowiskiem *homo habilis*. Został on wtedy wyparty przez gatunek hominida – *homo ergaster* (człowiek pracy, robotnik) – lepiej przystosowanego do zmienionego środowiska. Ten nowy gatunek posiadał budowę podobną do współczesnego człowieka: miał krótsze ręce i dłuższe nogi niż *homo habilis* i był wysokiego wzrostu (około 180 cm). Miał również zdecydowanie wyprostowaną postawę w trakcie chodzenia. Jego czaszka mieściła mózg większy niż wcześniejszych hominidów, a zęby i szczęka były mniejsze. Stracił więc częściowo zdolności do przeżuwania, gryzienia i kłusania pomagające w zdobywaniu i przetwarzaniu pożywienia. Był więc bardziej niż jego przodkowie uzależniony od stosowania narzędzi.

Homo ergaster wprowadził trzy kluczowe zmiany w łańcuchu ewolucji. Po pierwsze, udoskonalił narzędzia kamienne. Był twórcą słynnego pięściaka (*hand axe*), czyli obrobionego kamienia w kształcie trójkąta o dwóch symetrycznych ostrzach. Bez wątplenia wymagało to już zdecydowanie większych umiejętności poznawczych. W umyśle twórcy musiał powstać dosyć złożony obraz przyszłego narzędzia i sposobu, w jaki można wykonać to narzędzie z surowego kamienia. Narzędzie to miało tak uniwersalne zastosowanie, że zostało żartobliwie nazwane przez badaczy tamtych czasów „szwajcarskim szczyrykiem paleolitu”⁴. Było pomocne w polowaniu, ćwiartowaniu, oprawianiu zwierzyny ze skóry i czyszczenia samej skóry, i wreszcie służyło do cięcia drewna. Jego praktyczna przydatność musiała być istotnie niebagatelna, skoro był wykorzystywany przez blisko milion lat.

Drugim wielkim osiągnięciem *homo ergaster* było ujarzmienie ognia. Mógł go wykorzystywać do ochrony przed zwierzętami, do ogrzania i, co okazało się kluczowe dla dalszej ewolucji, do sporządzania posiłków z upolowanej zwierzyny. Dzięki temu nie potrzebował tak mocnego uzębienia i silnych szczęk, jak jego przodkowie. Spowodowało to istotne przeobrażenia w twarzoczaszce kolejnych pokoleń. Również łatwiejsze trawienie mięsa, dzięki wykorzystaniu ognia, na tyle poprawiło jakość odżywiania, że miało to prawdopodobnie wpływ na ewolucję rozmiaru mózgu, którego funkcjonowanie jest niezwykle energochłonne.

Trzecią kwestią jest rozpoczęcie wędrówek na niespotykaną wcześniej skalę. Całkowicie odmienny szkielet oraz inne usprawnienia, jak ciemny kolor skóry chroniący organizm przed nadmiernym nasłonecznieniem, zanik owłosienia na ciele i mechanizm wydzielania potu, co chroniło organizm przed przegrzaniem, czyniły z *homo ergaster* istotę niezwykle sprawną w pokonywaniu dużych odległości, głównie w poszukiwaniu żywności. Takie rozpraszanie się (trudno chyba mówić o racjonalnych decyzjach migracyjnych), początkowo po kontynencie afrykańskim

⁴ I. Tattersall, *Dzieje człowieka od jego początków do IV tysiąclecia p.n.e.*, PIW, Warszawa 2010, s. 87.

i następnie poza nim, w kierunku Azji, co miało miejsce krótko po pojawieniu się *homo ergaster*, czyli około 1,8 mln lat temu, zaowocowało niezwykłym wprost zjawiskiem zasiedlenia hominidami obszaru od Afryki aż po południowo-wschodnią Azję. Na kontynencie azjatyckim zapoczątkowało to nowy kierunek ewolucji hominidów ku nowemu gatunkowi *homo erectus* (około 1 mln lat temu). Od tej pory w Azji rozwija się *homo erectus* (mniej więcej około 40 tys. lat temu ostatecznie wymarł), natomiast w Afryce nadal rozprzestrzenia się *homo ergaster*, który zostaje „zastąpiony” około 800 tys. lat temu przez *homo heidelbergensis*.

Homo heidelbergensis pochodził z Afryki. Szybko jednak zasiedlił również Europę i część Azji. Charakteryzował się dużym mózgiem (około 1200 cm³), większym od mózgu *homo erectusa* (średnio około 1000 cm³), który to gatunek równolegle rozwijał się we wschodniej Azji. Można zatem przypuszczać, że miał spory potencjał poznawczy. Znajdywane w Europie pozostałości siedlisk *homo heidelbergensis* po części potwierdzają to przypuszczenie. Wniósł trzy istotne innowacje. Po pierwsze, usprawnił wytwarzanie narzędzi kamiennych w taki sposób, że można było uzyskać dużo mniejsze, lżejsze i poręczniejsze w użyciu odłupki kamienne i dodatkowo o zdecydowanie lepszym ostrzu. Być może były one w jakiś sposób mocowane do drewnianych trzonków, tworząc bardziej wyrafinowane narzędzia. Po drugie, najprawdopodobniej posługiwał się oszczepem bądź dzidą. Nie wiemy, czy służyły do dźgania z bliskiej odległości, czy też były miotane z pewnego dystansu. Bez względu na te wątpliwości posługiwanie się włócznią i szczególnymi ostrzami kamiennymi świadczą o w miarę dużym postępie w technice myśliwskiej. Stało się możliwe skuteczne polowanie na duże ssaki, jak nosorożce włochate, jelenie olbrzymie, mamuty. Trzecią innowacją była budowa dosyć złożonych szałasów, w których umieszczano paleniska.

Być może *homo heidelbergensis* miał aparat głosowy, umożliwiający prostą komunikację za pomocą mowy. Na pewno nie przypominało to tego, co współcześnie rozumiemy przez komunikację głosową, ale stanowiło znaczny postęp ku symbolicznemu myśleniu, do którego najprawdopodobniej ten gatunek hominida nie był jeszcze w pełni zdolny.

Homo heidelbergensis ewoluował w dwa odrębne gatunki. Na kontynencie europejskim wykształcił się *homo neanderthalensis* (około 250 tys. lat temu). Natomiast na kontynencie afrykańskim pojawił się *homo sapiens* (około 195 tys. lat temu), czyli człowiek anatomicznie odpowiadający współczesnemu. Były to dwa dość istotnie różniące się budową gatunki ludzi. *Homo neanderthalensis* był niższy i bardziej krępy niż jego przodkowie. *Homo sapiens* natomiast był wysoki i smukły. Te różnice były spowodowane odmiennymi warunkami klimatycznymi panującymi na obydwu kontynentach: zimnym w Europie i gorącym w Afryce.

Neandertalczyk doskonalił technikę wytwarzania narzędzi kamiennych. Nie jest łatwo zmierzyć postęp, jaki dokonał się na przestrzeni prawie 2,5 mln lat w tworzeniu narzędzi z kamienia. Można się posłużyć pomiarem długości zaostrej powierzchni uzyskiwanej z jednego funta kamienia. *Homo habilis* potrafił otrzymać tylko 3 cale zaostrej krawędzi. Mniej więcej 300 tys. lat temu nasi praprzodkowie byli w stanie uzyskać 8 do 12 cali takiego ostrza. Natomiast neandertalczyk jakies 100 tys. lat temu potrafił z funta kamienia pozyskać już od 30 do 40 cali krawędzi tnącej. Z naszej perspektywy taki postęp nie jest imponujący. Mniej więcej co 60 tys. lat hominidom udawało się wydłużyć tnącą powierzchnię o 3 cale. Ten wynik szczególnie wydaje się bardzo skromny, jeśli weźmiemy osiągnięcia *homo sapiens* sprzed 30 tys. lat. Z funta kamienia potrafił osiągnąć długość ostrzy od 30 do 40 stóp⁵, czyli 12 razy więcej niż neandertalczyk 70 tys. lat wcześniej. Zatem zaledwie w ciągu tak niedługiego czasu udało się *homo sapiens* osiągnąć to, co wielu pokoleniom hominidów zabrało prawie 2,4 mln lat.

Neandertalczyk najprawdopodobniej pojawił się 250 tys. lat temu i zniknął jakies 25 tys. lat temu. Jego istnienie przypada zatem na dwa okresy lodowcowe. Żyjąc w Europie i we wschodniej Azji, wykazał się znakomitymi zdolnościami przystosowawczymi do ciężkich warunków klimatycznych panujących na tych obszarach. Charakteryzował się największym mózgiem wśród wszystkich dotychczasowych hominidów (pojemność około 1450 cm³). Nie wiadomo jednak, w jakim stopniu był zdolny do myślenia symbolicznego i ekspresji swoich emocji, gdyż nie pozostawił żadnych wyraźnych śladów, z których można by wysnuć jednoznaczne wnioski o jego zdolności do abstrakcyjnego myślenia. Znajdywane są miejsca, wskazujące na celowe grzebanie zmarłych połączone z rytualnymi praktykami, pokrywaniem ochrą ciała zmarłego i wkładaniem do grobu żywności i narzędzi. Może to świadczyć o rozwiniętym systemie wierzeń w życie pozagrobowe, które wskazywałoby na daleko idącej zdolności neandertalczyków do kreowania abstrakcyjnych wyobrażeń.

Niezależnie od tego, jakimi zdolnościami do symbolicznego myślenia charakteryzował się neandertalczyk, w jakim stopniu posługiwał się mową, jak daleko udoskonalił techniki łowieckie, to *homo sapiens*, czyli człowiek współczesny, okazał się ostatecznym zwycięzcą walki o przetrwanie wśród hominidów.

Najprawdopodobniej powstaliśmy około 195 tys. lat temu, czyli trochę później niż *homo neanderthalensis*. Przez pierwsze 125 tys. lat naszego istnienia niczym szczególnym się nie wyróżniliśmy spośród dotychczasowych gatunków hominidów. Najprawdopodobniej był to okres ostatecznego anatomicznego uformowania

⁵ D.R. Headrick, op.cit., s. 5.

się naszego gatunku, które nastąpiło około 150 tys. lat temu, oraz terytorialnego rozpraszania się w Afryce i na Bliskim Wschodzie. Na terenie Lewantu (północ Bliskiego Wschodu) *homo sapiens* i neandertalczyki zamieszkiwali obok siebie około 100 tys. lat temu. Jednak *homo sapiens* nie wykazywał cech dominacji nad neandertalczykami. Najprawdopodobniej przez kilka tysięcy lat żyli obok siebie w całkowitej równowadze.

Niebywałego wyczynu, który zmienił bieg światowych dziejów, dokonaliśmy, jako gatunek, jakieś 70 tys. lat temu. Wyruszyliśmy z Afryki na podbój, jak się później okazało, wszystkich kontynentów oprócz Antarktydy. Specjaliści spierają się o drogi ekspansji i liczbę migrujących grup: czy był to szlak ze wschodniej Afryki przez Morze Czerwone (wówczas był bardzo niski poziom wody), czy też dodatkowo *homo sapiens* wywędrował z obszaru dzisiejszego Egiptu poprzez krainę Lewantu, czy była jedna, czy kilka fal migracyjnych. Niezależnie od tego, jakie to były szlaki i ile razy wykorzystywane, po upływie niecałych 60 tys. lat *homo sapiens* dotarł z Afryki aż do Ameryki Południowej (stało się to około 12 tys. lat temu). Po drodze, już 60 tys. lat temu, dokonał niebywałego wyczynu, docierając do Australii. Wiązało się to z pokonaniem około 80 km otwartych wód oceanu, aby przedostać się na ten kontynent z wybrzeży obecnej Indonezji. Wyczyn zaprawdę godny wytrawnego żeglarza. Jakież 35–40 tys. lat temu *homo sapiens* zawędrował na kontynent europejski. Taka niebywała szybkość rozproszenia się niemal po całym świecie, szybkość prawie 50-krotnie wyższa niż pierwsza migracja *homo ergaster*, jest imponującym osiągnięciem. Średnio rocznie pokonywano jedną milę⁶. Okazaliśmy się znakomicie przystosowani do odbywania długich wędrówek oraz radzenia sobie w zróżnicowanym środowisku przyrodniczym. Być może posiadaliśmy również jakieś wrodzone zdolności nawigacyjne, skoro udało się przepłynąć 80 km otwartej powierzchni oceanu, gdy drugi brzeg nie jest widoczny gołym okiem. Drugą niezwykle ciekawą obserwacją dotyczącą tych wędrówek jest osiągnięcie dominującej pozycji na każdym kontynencie – chodzi przede wszystkim o Eurazję, która była zamieszkała na zachodzie przez neandertalczyków, a na wschodzie przez *homo erectus*. Była to absolutna dominacja – gatunki te po prostu przestały istnieć. *Homo sapiens* został sam jako reprezentant linii hominidów⁷. Paleoantropologowie dyskutują, w jaki sposób doszło do takiego masowego wymarcia. Być może *homo sapiens*, konkurując o tereny łowieckie, wyparł, mniej lub bardziej pokojowo, wszystkie pozostałe gatunki *homo*. Albo

⁶ I. Morris, *Why the West rules – for Now. The Patterns of History, and What They Reveal About the Future*, eBook edition, 2010, s. 75.

⁷ Oczywiście w badanym przedziale czasu. Co będzie dalej, tego niestety nie wiemy.

być może poprzez krzyżowanie, jako silniejszy gatunek niejako ich wchłonął. Za tą ostatnią możliwością przemawia fakt, iż sekwencja naszego DNA zawiera mniej więcej 1–4% genów pochodzących od neandertalczyka. Odnosi się to do populacji zamieszkującej Eurazję. Populacja afrykańska pozbawiona jest takich cech. Bardzo interesujące w ewolucji *homo sapiens* jest również to, że badanie mitochondrialnego DNA (mtDNA)⁸ reprezentatywnych grup na wszystkich kontynentach wskazuje, że wszyscy mamy wspólny zbiór genów. To sugeruje, że wszyscy ludzie na ziemi musieli mieć teoretycznie wspólną matkę, która przekazała tę pierwszą sekwencję mtDNA. Jest to o tyle ciekawe, że w praktyce musi to oznaczać, że cała ludzka populacja, która zasiedliła cały świat, miała swój początek w niewielkiej, parotysięcznej grupie (być może tylko 10–40 tys. osobników)⁹. Przypuszcza się, że powodem mogła być erupcja wulkanu Toba na Sumatrze 71 tys. lat temu, która miała taką skalę, iż spowodowała oziębienie globalnego klimatu na tysiąc lat. W Afryce temperatura spadła o około 9°C¹⁰. Spowodowany tą zmianą niedostatek żywności wywołał głód i spadek liczebności populacji. Tak więc populacja, która wywędrowała z Afryki, była nieliczna, ale na tyle płodna, iż w poszukiwaniu nowych obszarów łowieckich zasiedliła wszystkie kontynenty.

Jeśli chcemy śledzić ekspansję gatunku *homo sapiens*, to istotne jest, aby analizą objąć okres, w którym ukształtowały się dwie kluczowe zdolności. Pierwsza to zdolność do myślenia symbolicznego, typowego dla współczesnego człowieka. Tworzenie projektów, planów, wizji, w których obiekty mają swoje stałe ogólne nazwy i dzięki temu można je w trwały sposób przekształcać na powtarzalne wzorce działania i następnie obserwować efekty i korygować kolejne działania. Ta umiejętność jest ściśle powiązana z posługiwaniem się mową, która umożliwia artykułowanie wykreowanych w naszym umyśle abstrakcyjnych pojęć. Myślenie symboliczne w połączeniu z mową ostatecznie prowadzi do wykreowania mechanizmu powstawania nowej użytecznej wiedzy, poprzez praktyczne rozwiązywanie problemów, która dzięki mowie może rozprzestrzeniać się na wszystkich członków lokalnej społeczności i osadzać w zbiorowej pamięci. Druga zdolność jest nie mniej istotna niż pierwsza. Chodzi o ekspresję swojej osobowości poprzez przeróżne

⁸ Mitochondrialny zapis genetyczny jest przekazywany wyłącznie w linii żeńskiej, dlatego też jego zmiany nie są wynikiem kontaktów seksualnych. Wszyscy ludzie zatem mają wspólny zapis genetyczny mtDNA. Jeśli pojawiają się zmiany, to są one powodowane wyłącznie przypadkowymi mutacjami. Przyjmując pewne założenia co do częstotliwości tych zmian, obserwacja mtDNA dostarcza istotnego materiału o drzewie genologicznym i prawdopodobnych szlakach wędrówek *homo sapiens*.

⁹ S.H. Ambrose, *Late Pleistocene human population bottlenecks, volcanic winter, and differentiation of modern humans*, „Journal of Human Evolution”, June 1998, vol. 34, no. 6, s. 639–641.

¹⁰ P. Kessler, *Prehistoric World. Hominid Chronology*, 26.07.2005, <http://www.historyfiles.co.uk/FeaturesAfrica/HominidChronology7.htm>, 22.07.2013.

formy sztuki, systemy wierzeń religijnych, wrażliwość na śmierć bliskich i członków lokalnej społeczności.

Paleoantropolodzy spierają się, kiedy nastąpiło ostateczne ukształtowanie nowoczesnych zachowań. Wiele faktów wskazuje na to, że mogło się to stać 70–50 tys. lat temu, a może nawet wcześniej¹¹. Szczególnie istotny jest przełom w dziejach, który dokonał się około 50 tys. lat temu. Wówczas następuje dosyć istotna zmiana w rytualnych zachowaniach, zwiększa się różnorodność ozdób wykonywanych z kości i zębów zwierząt (np. kości słoniowej) oraz wzrasta specjalizacja w zakresie wytwarzanych narzędzi. Ich kształty i rozmiary są coraz lepiej dostosowane do wyspecjalizowanego zastosowania. Narzędzia wytwarzane są już nie tylko z kamienia, lecz także z kości i rogów zwierząt. Ślady bytności pozostawione przez *homo sapiens* na kontynencie europejskim (kromanieńczyk) świadczą o w pełni ukształtowanym nowoczesnym zachowaniu. Świadczą o tym m.in.: piękno pozostawionych malowideł na ścianach jaskiń, figurki o metaforycznym znaczeniu, różnorodność i często bardzo duża precyzja narzędzi, rozwinięty rytuał pochówku, instrumenty muzyczne, ozdoby ciała¹².

Ta dosyć szybka w wymiarze historycznym zmiana w zachowaniu człowieka, w wyniku której 40 tys. lat temu powstała całkiem nowa kultura, świadcząca o wykształceniu typowych cech nowoczesnego zachowania, nazywana jest rewolucją górnego paleolitu. Jednak nowe odkrycia w południowej Afryce w jaskini Blombos, m.in. ozdób do ciała sprzed 77 tys. lat, mogą wskazywać na wcześniejsze wykształcenie elementów nowoczesnego zachowania. Również narzędzia znajduwane w południowej Afryce przypominają kształtami te stosowane w Europie 40 tys. lat temu¹³. Pozostawiając paleoantropologom ostateczne rozstrzygnięcie, kiedy u człowieka ostatecznie wykształciły się nowoczesne zachowania i czy zmiana zachowań nastąpiła gwałtownie czy stopniowo, możemy przyjąć, że 40 tys. lat temu doszło ostatecznie do uformowania się takich zachowań ludzkich, w których pojawiają się świadome ludzkie kalkulacje o wyborze kierunku działania.

¹¹ Zob. K. Wong, *Kiedy człowiek nauczył się myśleć*, „Świat Nauki” 2006, nr 1; C.S. Henshilwood, C.W. Marean, *The Origin of Modern Human Behavior*, „Current Anthropology”, December 2003, vol. 44, no. 5; S. McBrearty, A.S. Brooks, *The revolution that wasn't: a new interpretation of the origin of modern human behavior*, „Journal of Human Evolution” 2000, vol. 39, s. 453–563; A. Bouzouggar et al., *82,000-year-old shell beads from North Africa and implications for the origins of modern human behavior*, „Proceedings of the National Academy of Sciences” 2007, vol. 104, no. 24, <http://www.pnas.org/content/104/24/9964>, 10.08.2013.

¹² Zob. O. Bar-Yosef, *The Upper Paleolithic Revolution*, „Annual Review of Anthropology” 2002, vol. 31, s. 363–393.

¹³ P. Mellars, *Why did modern human populations disperse from Africa ca. 60,000 years ago? A new model*, „Proceedings of National Academy of Science” 2006, vol. 103, no. 25, s. 9381–9386.

Wybory te i działania grup społecznych nie wiążą się wyłącznie z przypadkowym charakterem mechanizmu doboru naturalnego, ale w coraz większym stopniu wynikają z przemyślanych kierunków działania. Czyli odnajdujemy elementy myślenia ekonomicznego. Ludzie ustalali pewne cele, które w tamtych zamierzonych czasach zapewne ogniskowały się wokół zapewnienia sobie pożywienia. Napotykali bez wątplenia ograniczenia w postaci rzadkich zasobów i musieli dokonywać świadomych wyborów. Na przykład, daleko rozwinięte formy ekspresji własnej świadomości poprzez sztukę (rzeźby, malowidła, ozdoby ciała, muzyka) wskazują, że rozdzielano czas na pozyskiwanie żywności i czas wolny (na sztukę i muzykę). Z kolei w związku z napotykanymi ograniczeniami w zakresie dostępu do żywności musiały być podejmowane decyzje o momencie migracji, zmianie diety czy sposobach kontroli urodzeń.

Interesujące jest zatem, w jaki sposób, napotykając lokalnie rzadkość zasobów, nasi przodkowie zdołali ostatecznie opanować wszystkie dostępne tereny. Jaką rolę w tej ekspansji odegrały innowacje techniczne?

Rozdział 2

Model ekspansji gospodarki łowiecko-zbierackiej

Jednym z większych fenomenów w dziejach ludzkości jest jej szybkie rozprzestrzenienie na wszystkie kontynenty (oprócz Antarktydy) w okresie między 70 tys. a 12 tys. lat temu. To wydarzenie miało ogromne konsekwencje dla dalszego gospodarczego rozwoju ludzkości. Ekspansja *homo sapiens* stworzyła podwaliny pod przyszłą gospodarkę agrarną, która z kolei stanowi załóżek całej naszej współczesnej cywilizacji. Tak odległy okres historyczny był zazwyczaj poza głównym nurtem badań ekonomistów. W ostatnim dziesięcioleciu nastąpiła jednak radykalna zmiana w zainteresowaniach ekonomistów zajmujących się badaniem długiego okresu. W ramach szeroko rozumianej teorii wzrostu gospodarczego czynione są owocne próby wyjaśnienia ewolucji od gospodarki łowiecko-zbierackiej do agrarnej¹⁴. Trochę mniej uwagi poświęca się wewnętrznej dynamice gospodarki łowiecko-zbierackiej. W niniejszej pracy zamierzamy wypełnić tę lukę, poszukując teoretycznych wyjaśnień źródeł ekspansji ludnościowej w górnym paleolicie. Nacisk kładziemy na wzajemne oddziaływanie naturalnych warunków zasiedlanego środowiska oraz dynamiki ludności. Każdy z tych obszarów ma swoją wewnętrzną równowagę. Ekosystem jest w równowadze, gdy jest w stanie odtworzyć zużyte zasoby, a ludność osiąga swój stan równowagi, gdy urodzenia równoważą się ze zgonami. Wzajemne oddziaływanie ekosystemu i ludności w nim żyjącej, kiedy każdy z tych układów dąży do osiągnięcia równowagi, może kierować gospodarkę łowiecko-zbieracką ku stagnacji albo ekspansji. Pomijamy całkowicie postęp techniczny, jaki bez wątpienia dokonał się w górnym paleolicie (jest to okres fascynującego rozkwitu technik krzemieniarskich). Sądzymy, że wystarczającym czynnikiem ekspansji ludności jest wzajemne oddziaływanie ekosystemu i zasiedlającej go ludności. Natomiast postęp techniczny, wpływający przede wszystkim na doskonalenie technik łowieckich i budowanie siedzib mieszkalnych, ułatwiał uzyskiwanie dominującej pozycji w zasiedlanych regionach i wypieranie z nich innych hominidów.

¹⁴ W tym nurcie istotne znaczenie mają prace O. Olssona i D. Hibbsa, O. Galora i O. Moava, N. Lagerlöfa, J. Weisdorfa, F.L. Pryora, V.L. Smitha, M. Kremera.

Przyjmujemy, że mamy gospodarkę, w której dominującym czynnikiem jest ziemia (Z), a wytworzony produkt (Y) jest w całości konsumowany. Na produkcję składają się wyłącznie dobra żywnościowe. Ziemię potraktujemy jako specyficzny czynnik wytwórczy. Przyjmujemy, że nie może ona być wytwarzana. Przy czym ziemię traktujemy szeroko, jako pewien wyodrębniony ekosystem, czyli skończony zbiór roślin i zwierząt (biocenoza) oraz grunt, wodę i powietrze (biotop). Do tak szeroko rozumianego ekosystemu należy również gatunek ludzki. Jednak do dalszej analizy wyodrębnimy go z ekosystemu i potraktujemy jako użytkownika składników ekosystemu, który je wykorzystuje w celu pozyskania pożywienia. Przyjmujemy, że ekosystem posiada naturalną zdolność do reprodukcji. Drugim niezbędnym czynnikiem jest praca. Niech L oznacza liczbę ludności, która z założenia jest równa liczbie pracowników (łowców-zbieraczy). Każdy z pracowników jest wyposażony w jedną jednostkę czasu, którą przeznaczają na pracę. Zatem w danym momencie t liczba ludności L jest równa podaży pracy, która, zakładamy, jest w pełni wykorzystana.

Punktem wyjścia naszej analizy są prymitywne sposoby pozyskiwania żywności polegające na zbieraniu jadalnych roślin, polowaniu na zwierzęta i połowie ryb. Żywność nie jest produkowana, lecz pozyskiwana wprost z ekosystemu. Grupa ludzi w zorganizowany sposób przemierza dany region geograficzny, tworzący lokalny ekosystem, w poszukiwaniu roślin i zwierząt. Y zatem w tym przypadku oznacza uszczuplenie ekosystemu o pozyskaną z niego żywność. Co prawda, ani zwierzęta, ani roślinność nie były reprodukowane poprzez wytwórczą działalność człowieka, nie oznacza to jednak, że lokalne społeczności nie próbowały oddziaływać na eksploatowane środowisko. Udokumentowane są przypadki wpływu na urodzajność dziko rosnących jadalnych roślin (wypalanie ziemi przez Aborygenów w Australii) i częstotliwość połowów ryb (oficjalne ogłoszenie rozpoczęcia sezonu połowów łososi przez niektóre grupy w Europie) i gromadzenie zapasów żywności w jamach w ziemi (człowiek kromański). Innym sposobem może być kontrolowanie urodzeń, co – wyhamowując dynamikę populacji na danym terenie – wpływało na tempo zużywania lokalnych zasobów ekosystemu¹⁵. Wszystkie te działania miały na celu przeciwdziałanie nadmiernej eksploatacji lokalnego ekosystemu. Jednak nie zmieniały istotnie głównej charakterystyki sposobu pozyskiwania żywności: poprzez zbieractwo i myślistwo.

¹⁵ Zob. N. Marceau, G.M. Myers, *From Foraging to Agriculture*, Center for Research on Economic Fluctuations and Employment, Université du Québec à Montréal, „Working Paper” February 2000, no. 103, s. 4–5; J. Diamond, *Strzelby...*, op.cit., s. 105–106; F.L. Pryor, *From Foraging to Farming. The So-Called „Neolithic Revolution”*, 22.01.2003, http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=395040, 22.07.2013.

Zakładamy, że regiony geograficzne różnicują się ze względu na istniejący w nich ekosystem. Różnicowanie jest wynikiem położenia geograficznego i związanego z nim klimatu, ukształtowania terenu i dostępności wody. Te naturalne warunki z kolei determinowały ilość zwierzyny łownej i jadalnej roślinności. Fakt istnienia różnic pomiędzy ekosystemami powoduje, że gdyby zostały one zasiedlone przez lokalne społeczności, to ich członkowie musieliby ponosić różne nakłady na pozyskanie jednostki pożywienia. Inaczej mówiąc, regiony różniłyby się krańcową produktywnością pracy. Jednak należy przyjąć, że w tych prehistorycznych czasach zdecydowanie dominującym czynnikiem wytwórczym była ziemia. Wkład pracy w pozyskanie pożywienia był relatywnie niski.

Prymitywne sposoby pozyskiwania pożywienia w dowolnym okresie t na terenie lokalnego regionu możemy zapisać:

$$Y(t) = Z(t)^{1-\alpha} L(t)^\alpha, \quad 0 < \alpha < 1. \quad (2.1)$$

Założenie, że $\alpha \in (0, 1)$ oznacza, że praca charakteryzuje się malejącą krańcową produktywnością. Dla wygody dalszego wywodu przyjmujemy również, że mamy stałe przychody względem ziemi i pracy. Zgodnie z założeniem o dominacji ziemi w wytwórczości pożywienia α jest relatywnie niskie we wszystkich dostępnych do zasiedlenia regionach. Przy czym regiony obfite w jadalne zasoby, gdzie ziemia stosunkowo „łatwo” wytwarza żywność, będą charakteryzowały się niższym α .

Interesuje nas ścieżka produkcji na mieszkańca w lokalnym regionie. W tym celu przekształcimy wzór (2.1) do postaci¹⁶:

$$y = l^{\alpha-1}, \quad \text{gdzie: } y \equiv \frac{Y}{L}, \quad l \equiv \frac{L}{Z}. \quad (2.2)$$

Produkcja na mieszkańca y danego regionu jest malejącą funkcją gęstości jego zaludnienia (l). Przy czym przyjmujemy, że l zmienia się w przedziale $\langle 0, 1 \rangle$. Gdy $l = 0$, to nikt nie zamieszkuje w danym regionie. Gdy $l = 1$, to dany ekosystem osiągnął kres możliwości zasiedlania, co oznacza sytuację, że jest w całości zużywany przez zamieszkującą go ludność. Nie ma więcej miejsca na kolejne jednostki gatunku ludzkiego. Aby znaleźć ścieżkę produkcję na mieszkańca w danym regionie, należy rozpatrzyć przebieg ścieżki gęstości zaludnienia. Zależy ona od wzajemnej dynamiki liczby ludności i ekosystemu.

¹⁶ Dla uproszczenia zapisu pomijamy w dalszym wywodzie zmienną oznaczającą czas t . Pamiętajmy jednak, że L i Z są funkcjami czasu, co powoduje, że Y jest również zależne od czasu.

Założmy, że stopa urodzeń $b > 0$ jest determinowana przez czynniki pozaekonomiczne. Chodzi o czynniki biologiczne i społeczne określające liczbę dzieci przypadających na jedną kobietę. Te pierwsze określają średnią częstotliwość urodzeń oraz długość okresu rozrodczego. Krótko mówiąc, determinanty biologiczne wyznaczają potencjalnie, ile razy kobieta jest zdolna do rozrodu w okresie od początku do końca okresu płodności¹⁷. Natomiast czynniki społeczne modyfikują biologiczne możliwości rozrodu. Przyjmijmy, że egzogeniczny czynnik społeczny sprowadza się do sposobu (stylu) życia lokalnych społeczności. Rozróżnimy wędrowny i osiadły tryb życia. W przypadku wędrownego trybu życia przemieszczanie się na duże odległości w poszukiwaniu żywności z małymi dziećmi jest bardzo kłopotliwe i wymaga dużego wysiłku od rodziców, bądź, przy skąpych możliwościach technicznych, podróżowanie jest wręcz niemożliwe. Wówczas, poprzez wydłużenie okresu karmienia piersią, zmniejszono częstotliwość urodzeń, a poprzez opóźnienie łączenia się w stabilne pary skracano faktyczny okres rozrodczy¹⁸. Natomiast w przypadku osiadłego trybu życia liczba urodzeń może być wyższa, gdyż znika czynnik konieczności ciągłego przemieszczania się. Stopa urodzeń może być zatem w tym przypadku relatywnie wyższa.

Natomiast stopa zgonów $a > 0$ niech zależy od pozyskanego pożywienia na jednego mieszkańca. Organizm wykorzystuje żywność w trzech głównych fizjologicznych obszarach. Po pierwsze, na zapewnienie sobie bieżącego funkcjonowania w zdrowiu i dobrej kondycji. Po drugie, na wzrost organizmu w początkowym okresie życia. Po trzecie, na reprodukcję gatunku, czyli wydanie na świat potomstwa. Jednostka spożywanej żywności może być użyta tylko w jednym z tych zastosowań. Nie może równocześnie obsłużyć wszystkich trzech funkcji fizjologicznych. Dlatego też w warunkach rzadkości zasobów żywnościowych występuje pomiędzy nimi konkurencja o dostęp do niej¹⁹. Oznacza to, że organizm może nie być w stanie zapewnić prawidłowego funkcjonowania w tych trzech obszarach na raz w przypadku niedoboru żywności, co może stworzyć zagrożenie śmiercią. Szczególnie są na to narażone młode organizmy w fazie wzrostu, gdy niedożywienie jest źródłem osłabienia sprawności funkcjonowania, głównie w wyniku niewydolności układu odpornościowego. Stwarza to ogromne ryzyko zachorowania na wiele chorób, które

¹⁷ Zob. M. Livi-Bacci, *A Concise History of World Population*, Blackwell Publishing, Oxford 2007, s. 9–17.

¹⁸ Tolerowany społecznie wyższy wiek zawierania związków małżeńskich opóźniał początek okresu rozrodczego. Natomiast w trakcie okresu karmienia piersią, przy pewnych dodatkowych warunkach, kobiety nie są w stanie zająć w ciążę. Jego wydłużenie zmniejszyło wobec tego liczbę możliwych zająć w ciążę w okresie rozrodczym.

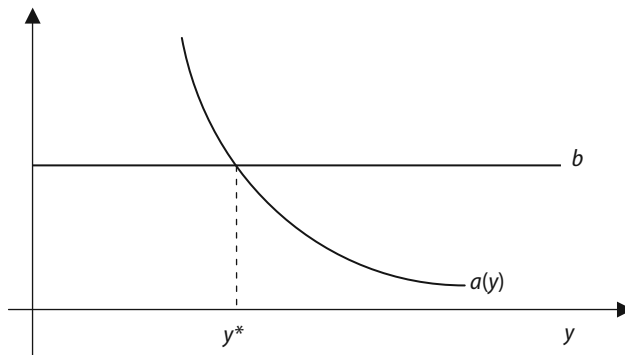
¹⁹ Zob. J. W. Wood, *A Theory of Preindustrial Population Dynamics. Demography, Economy, and Well-Being in Malthusian Systems*, „Current Anthropology”, February 1998, vol. 39, no. 1.

mogą okazać się śmiertelne. Zatem obfitsze pożywienie, zwłaszcza bogate w proteiny i węglowodany, zapewnia sprawne funkcjonowanie we wszystkich trzech obszarach, organizm ludzki jest w stanie skuteczniej oprzeć się chorobom i epidemiom, dzięki czemu możliwe jest aktywne poszukiwanie żywności²⁰. Zmniejsza się zatem śmiertelność wśród ludzi i wydłuża oczekiwana w momencie narodzin długość życia. Przy czym zakładamy, iż spadki stopy zgonów są coraz mniejsze w miarę wzrostu produkcji na mieszkańca ($a'(y) < 0$, $a''(y) > 0$, $a(1) = +\infty$, $a(+\infty) = 0$).

Ruch ludności, z założenia odpowiadający zmianie dostępnego zasobu pracy, możemy zapisać w postaci równania²¹:

$$\dot{L} = [b - a(y)]L. \quad (2.3)$$

Długookresowa równowaga L wystąpi, gdy $\dot{L} = 0$. To zachodzi dla $L = 0$ lub gdy $b - a(y) = 0$. Rozwiązanie pierwsze jest całkowicie nieatrakcyjne ekonomicznie, gdyż oznacza brak gospodarki. Należy zatem sprawdzić, czy istnieje takie y^* , dla którego zajdzie $b - a(y) = 0$. Ponieważ nie mamy konkretnej postaci funkcji zgonów, poziom y^* można znaleźć graficznie. Na rysunku 2.1 przedstawiono funkcję zgonów i stopę urodzeń. Z własności funkcji zgonów (jest ona ściśle monotonicznie malejąca dla $y > 0$) oraz dla każdego $b > 0$ będzie istniało tylko jedno jedyne takie y^* , dla którego zachodzi $b = a(y)$. Mamy zatem takie $L^* > 0$, które jest rozwiązaniem długookresowej równowagi dla ruchu ludności. Poziom produkcji równy y^* będziemy interpretowali jako poziom zapewniający stabilną egzystencję.

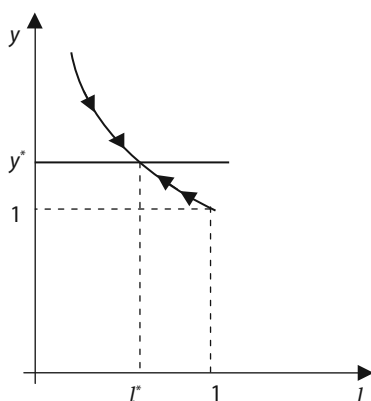


Rysunek 2.1. Wyznaczenie y^* na podstawie funkcji zgonów i stopy urodzeń

²⁰ J.L. Boone, *Subsistence Strategies and Early Human Population History. An Evolutionary Ecological Perspective*, „World Archaeology” 2002, vol. 34, no. 1.

²¹ Pochodną funkcji $y = f(t)$ po t , gdzie t jest czasem ciągłym, będziemy oznaczali $\frac{dy}{dt} = \dot{y}$.

Pozostaje ustalenie, czy L^* jest punktem stabilnej równowagi, tzn. czy po jakimkolwiek odchyleniu od tego punktu gospodarka powraca do niego. Rysunek 2.2 pokazuje zależność między produkcją żywności na mieszkańca regionu a gęstością zaludnienia ekosystemu. Załóżmy, że zasoby ekosystemu są stałe. Wówczas zmiana gęstości zaludnienia jest wyłącznie wynikiem zmiany liczby mieszkańców w danym regionie. Poziom egzystencji y^* wyznacza gęstość zaludnienia w długookresowej równowadze l^* . Jeżeli $y < y^*$, to z rysunku 2.1 wynika, że $b - a(y) < 0$, czyli zbyt mało żywności spowodowałoby, że stopa zgonów wzrosła powyżej stopy urodzeń. Zmniejszyłaby się liczba ludności. To z kolei zaowocowałoby wzrostem krańcowej produktywności pracy i powiększeniem pozyskiwanej żywności na mieszkańca (na rys. 2.2 ilustrują to strzałki skierowane ku górze). Poprawa wyżywienia zmniejszyłaby stopę zgonów. Nadal jednak liczba ludności spadałaby, co przyczyniałoby się do wzrostu produkcji, która rosłaby aż do poziomu y^* . Przy tym poziomie produkcji liczba ludności powróciłaby do L^* , a gęstość ustaliłaby się ponownie na poziomie l^* . Gdy $y > y^*$, czyli faktyczna produkcja jest wyższa od poziomu egzystencji, to $b - a(y) > 0$, czyli liczba ludności rosłaby. To powodowałoby spadek krańcowej produktywności pracy i w konsekwencji zmniejszenie pozyskiwanej produkcji na mieszkańca (na rys. 2.2 ilustrują to strzałki skierowane ku dołowi). Pogorszenie wyżywienia podniosłoby stopę zgonów, obniżając dynamikę przyrostu ludności. Dynamika ta wyniesie zero ($b - a(y) = 0$), gdy produkcja powróci do poziomu y^* . Zasób pracy ponownie równa się L^* , a gęstość zaludnienia l^* . Widzimy zatem, że jeśli zasób pracy odchyli się w którąkolwiek stronę od poziomu L^* , to z powrotem będzie zbiegać do poziomu L^* , a gęstość zaludnienia będzie zmierzała do l^* .



Rysunek 2.2. Równowaga gęstości zaludnienia przy założeniu stałego zasobu ekosystemu

Do tej pory przyjmowaliśmy, że ekosystem nie stanowi ograniczenia w osiągnięciu równowagi przez ludność na danym obszarze. Jednak lokalne ekosystemy różnią się naturalną zdolnością do wytworzenia biomasy na jednostkę powierzchni. Przykładowo²², tereny półpustynne dostarczają tylko 800 kg/km² rocznie biomasy, podczas gdy sawanna 10 000 kg/km². Aby uwzględnić ograniczenie stwarzane przez ekosystem, przedstawmy ruch ludności w postaci zmiany gęstości zaludnienia. W tym celu zapiszmy równanie ruchu ludności w postaci:

$$\frac{\dot{L}}{Z} = [b - a(y)] \frac{L}{Z}. \quad (2.4)$$

Wykorzystując, że $L = lZ$ i różniczkując to równanie po czasie, po przekształceniach otrzymujemy ruch gęstości zaludnienia:

$$\dot{l} = [b - a(y) - z]l, \text{ gdzie: } z \equiv \frac{\dot{Z}}{Z}. \quad (2.5)$$

Stopa zmiany gęstości zaludnienia jest wynikiem przyrostu naturalnego $b - a(y)$ oraz dynamiki ekosystemu z . Gdy $b - a(y) > z$, to gęstość zaludnienia rośnie, w przeciwnym przypadku spada. Gęstość zaludnienia stabilizuje się dla $b - a(y) = z$.

Ponieważ produkcja żywności zależy od gęstości zaludnienia, to współczynnik zgonów możemy przedstawić również jako funkcję gęstości zaludnienia: $a = f(l)$ o własnościach: $f(0) = 0$, $f(1) = +\infty$, $f' > 0$, $f'' > 0$. Otrzymujemy zmodyfikowany wzór na ruch gęstości zaludnienia:

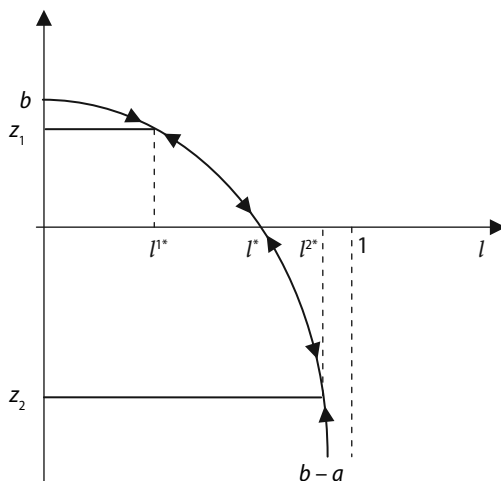
$$\dot{l} = [b - f(l) - z]l. \quad (2.6)$$

Długookresowa równowaga gęstości zaludnienia ma miejsce wtedy, gdy $\dot{l} = 0$, czyli gdy dynamika przyrostu naturalnego zrówna się z dynamiką ekosystemu: $b - f(l) = z$. Załóżmy chwilowo, że dynamika ekosystemu jest dana i może ona przybrać dowolną wartość z przedziału $(-1, +\infty)$. Wówczas możemy graficznie wyznaczyć l , które spełnia warunek $b - f(l) = z$.

Linia $b - a$ (rys. 2.3) jest wykresem tempa przyrostu naturalnego w funkcji gęstości zaludnienia ($b - f(l)$). Gdyby dynamika ekosystemu była równa zero (jego zasoby pozostawałyby na niezmiennym poziomie), wówczas gęstość zaludnienia w długookresowej równowadze wyniosłaby l^* . Dla dynamiki z_1 gęstość jest równa l^* , a dla z_2 wynosi l^2 . Każdy z tych punktów, dla danej dynamiki ekosystemu, jest

²² Zob. M. Livi-Bacci, op.cit., s. 22.

stabilnym punktem, do którego zbiega gęstość zaludnienia. Gdy $b - f(l) > z$, to $\dot{l} > 0$, a gdy $b - f(l) < z$, to $\dot{l} < 0$. Zatem gdy gęstość odchyli się od punktu równowagi, to z powrotem do niego zbiega.



Rysunek 2.3. Wyznaczenie gęstości zaludnienia ekosystemu

Analiza dynamiki ludności od strony gęstości zaludnienia przynosi kilka istotnych spostrzeżeń. Przede wszystkim wskazuje na dynamikę ekosystemu jako na główne źródło trwałej poprawy lub pogorszenia warunków życia. Gdy ekosystem pozostaje stabilny, to poziom gęstości zaludnienia l^* wyznacza produkcję y^* , którą nazwalibyśmy niezbędnym poziomem egzystencji (por. rys. 2.2). Jednak gdyby ekosystem danego regionu miał trwałą dodatnią dynamikę z_1 , to równowagowy poziom gęstości zaludnienia $l^* < l^*$ wyznacza rozmiar produkcji żywności większy niż y^* . Lokalna społeczność mogłaby się rozwijać przy wyższym standardzie życia. W krańcowym przypadku, gdyby ekosystem rozwijał się w tempie wyższym niż dynamika urodzeń b , to gęstość zaludnienia zmierzałaby do zera, a poziom życia rósłby do nieskończoności. Taka prymitywna gospodarka wkroczyłaby na ścieżkę trwałego wzrostu dzięki niezwykle sprzyjającym warunkom naturalnym²³.

Natomiast kurczenie się ekosystemu przy ujemnym tempie z_2 byłoby źródłem atrofii lokalnej społeczności. Równowagowy poziom gęstości zaludnienia $l^* > l^*$ wyznacza rozmiar pozyskiwanej żywności poniżej poziomu niezbędnej egzysten-

²³ Można rzec, że dynamika ekosystemu byłaby substytutem współczesnego postępu technologicznego.

cji y^* . Społeczność lokalna kurczy się w wyniku wyższej stopy zgonów niż urodzeń. Jednak ekosystem kurczy się w takim samym stopniu jak populacja ludzi i dlatego gęstość zaludnienia nie zmienia się. To uniemożliwia podniesienie krańcowej produktywności pracy i tym samym nie pozwala na powiększenie pozyskiwanej żywności na mieszkańca. Gospodarka, mimo iż jest w równowadze, zmierza ku całkowitej zagładzie.

Warto przyrzeć się czynnikom wpływającym na krytyczną wartość gęstości zasiedlenia l^* . Występuje ona dla $\dot{l} = 0$ i $z = 0$. Wstawiając te wartości do równania (2.6), otrzymujemy równanie pokazujące zależność pomiędzy stopą urodzeń a gęstością zaludnienia, gdy przyrost naturalny jest równy zero i ekosystem jest stabilny:

$$b = f(l^*). \quad (2.7)$$

Założmy, że stopa zgonów jest opisana przez funkcję o stałej elastyczności zgonów względem poziomu żywności na mieszkańca:

$$a(y) = y^{-\varepsilon}, \quad \varepsilon > 0. \quad (2.8)$$

Wykorzystując, że $y = l^{\alpha-1}$, ostatecznie otrzymujemy stopę zgonów w funkcji gęstości zaludnienia:

$$f(l) = l^{(1-\alpha)\varepsilon}. \quad (2.9)$$

Równanie (2.7) ma teraz postać:

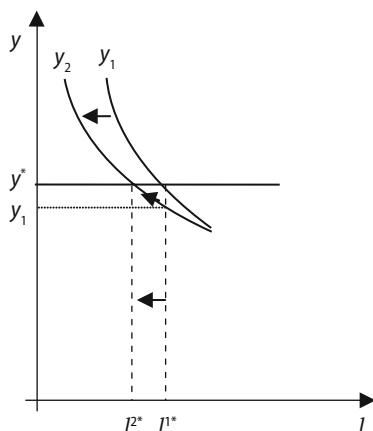
$$b = (l^*)^{(1-\alpha)\varepsilon}. \quad (2.10)$$

Z (2.10) ostatecznie uzyskujemy wzór na graniczną wartość gęstości zaludnienia:

$$l^* = b^{\frac{1}{(1-\alpha)\varepsilon}}. \quad (2.11)$$

Ponieważ rozpatrujemy wyłącznie lokalne społeczności o wędrownym trybie życia, to można przyjąć, że b i ε są determinowane wyłącznie czynnikami biologicznymi, które są takie same dla wszystkich grup społecznych. Jediną zmienną wpływającą na l^* jest wówczas udział pracy w pozyskaniu żywności (α). Im jest on wyższy, tym gęstość zaludnienia w równowadze jest niższa. Inaczej mówiąc, gdy grupy społeczne w poszukiwaniu żywności trafiały na obszary, w których

pozyskanie żywności wymagało powiększania nakładów starań, to, przy danej liczbie grupy, ilość żywności *per capita* spadała poniżej poziomu stabilnej egzystencji ($y_1 < y^*$ na rys. 2.4). To pociągało za sobą zwiększenie wymieralności. Rosła produktywność krańcowa pracy i ponownie następował powrót do poziomu stabilnej egzystencji, ale przy niższym poziomie gęstości zaludnienia (z l^* na l^{2*}).



Rysunek 2.4. Przesunięcie wykresu z y_1 na y_2 obrazuje powiększenie parametru w wyniku wzrostu nakładów starań na pozyskanie żywności

Aby ostatecznie ustalić dynamikę lokalnej społeczności, należy uwzględnić również zmienność ekosystemu. Przypadek stale rosnącego ekosystemu w danym regionie jest całkowicie nierealistyczny. Region charakteryzuje się ograniczonym terytorium, dlatego też trudno sobie wyobrazić, że na ograniczonej powierzchni stale będzie przybywać roślinności i zwierząt. Jest to raczej możliwe we wstępnym okresie rozwoju ekosystemu, gdy jego niewielkie początkowe rozmiary umożliwiają mu przez pewien czas osiągnięcie dodatniej dynamiki wzrostu. W tym okresie przebywająca na jego terenie społeczność ludzka może prowadzić dostatnie życie, mieć pokarmu pod dostatkiem, wręcz powyżej niezbędnego poziomu do egzystencji. Jednak po pewnym czasie ekosystem osiąga maksymalny rozmiary w danym ograniczonym regionie i efekty poprawy standardu żywienia znikają. Gospodarka zmierza wówczas do gęstości zaludnienia l^* i poziomu życia y^* . Przyjmijmy zatem, że punktem wyjścia jest dojrzały, już ukształtowany ekosystem w danym regionie. Zakładamy, że w stabilnych warunkach klimatycznych taki dojrzały ekosystem ma naturalną zdolność do odtwarzania zużytych w jego obrębie składników. To zużycie jest zwykłym wynikiem skończonego okresu trwania poszczególnych pokoleń roślin i zwierząt. Zakładamy zatem, że bez obecności ludzi w lokalnym

ekosystemie charakteryzuje się on stabilnym poziomem swoich zasobów, to znaczy przyroda odtwarza bez problemu wszystko to, co zużyło się w naturalny sposób wyniku upływu czasu.

Dynamika takiego dojrzałego ekosystemu, który zamieszkują ludzie myśliwi-zbieracze, jest wynikiem dwóch przeciwstawnych zjawisk: dodatkowego, ponadnaturalnego zużycia wynikającego z działalności człowieka i ze zdolności ekosystemu do reprodukcji. Gdy w lokalnym ekosystemie pojawiają się ludzie, to jego charakterystyka się zmienia. Rośnie zużycie ekosystemu ponad naturalny poziom wyznaczony przez upływ czasu. Działalność człowieka powoduje pewne utrudnienia w naturalnym przebiegu odnowy ekosystemu. Przyroda musi teraz „ciężej pracować”, bowiem zużycie nie jest tylko wynikiem upływu czasu, ale również dodatkowo efektem odkrywania nowych elementów ekosystemu przez człowieka i zużywania ich. Można więc powiedzieć, że odkrywany ekosystem zużywa się przed czasem wyznaczonym przez naturalny proces odnowy. To, jak ostatecznie przyroda sobie poradzi z tym dodatkowym zużyciem ekosystemu, jest wynikiem jego naturalnej zdolności do odnowy. Tę naturalną zdolność będziemy wobec tego traktowali jako zmienną egzogeniczną charakteryzującą środowisko naturalne. Przy czym reprodukcja ekosystemu podąża za zużyciem ekosystemu. Inaczej mówiąc, naturalną cechą ekosystemu jest dążenie do odtworzenia tego, co się zużyło. Dodatkowe zużycie ekosystemu jest więc równe pozyskanej żywności poprzez myślistwo, zbieractwo i połowy. Uzyskanie żywności nie jest wynikiem przetworzenia dóbr pośrednich – żywność jest uzyskiwana bezpośrednio z ekosystemu²⁴. W danym momencie t zużycie lokalnego ekosystemu możemy przedstawić w postaci:

$$D(t) = \gamma(t)Z(t). \quad (2.12)$$

Przez γ rozumiemy współczynnik zużycia ekosystemu. Ponieważ zużycie równa się pozyskanej żywności, wzór (2.12) można przekształcić:

$$Z(t)^{1-\alpha} L(t)^\alpha = \gamma(t)Z(t). \quad (2.13)$$

Z (2.13) otrzymujemy współczynnik zużycia (dla uproszczenia pomijamy zmienną t):

$$\gamma = l^\alpha. \quad (2.14)$$

²⁴ Pomijamy fazy przygotowania do spożycia zebranych i upolowanych produktów jako nieistotne dla analizy.

Współczynnik zużycia zależy od gęstości zaludnienia danego ekosystemu oraz od udziału pracy w pozyskaniu pożywienia (α). Im wyższy udział pracy w pozyskaniu pożywienia (zasoby ekosystemu są relatywnie mniej obfite), czyli trzeba ponieść relatywnie więcej nakładów starań przez mieszkańców, aby zdobyć pożywienie, tym wyższe zużycie ekosystemu.

Zakładamy, że ekosystem charakteryzuje się naturalną zdolnością do reprodukcji pozyskanej przez człowieka żywności. Rośliny i zwierzęta odnawiają swoją liczebność dzięki siłom przyrody. Oznaczmy przez δ współczynnik naturalnej zdolności ekosystemu do reprodukcji. Wówczas odnowa ekosystemu równa się:

$$O = \delta Z. \quad (2.15)$$

Ponieważ jednak przyroda musi teraz „ciężej pracować”, to może być tak, że w pewnym momencie nie będzie w stanie odtworzyć wszystkiego, co zostało zużyte w wyniku upływu czasu i działalności człowieka. Sensowne wydaje się zatem przypuszczenie, że zdolność do odbudowy zużytego przez działalność człowieka ekosystemu jest jednak ograniczona. Gdy niektóre gatunki zwierząt zostaną nadmiernie odłowione, to obserwujemy tendencję do ich wymierania. Podobnie dzieje się z roślinami. Utrata zdolności do reprodukcji jest wynikiem trwałego naruszenia wewnętrznej równowagi pomiędzy gatunkami tworzącymi dany ekosystem. Oznaczmy przez δ_{\max} współczynnik maksymalnej zdolności ekosystemu do odnowy. Wzór (2.15) możemy wówczas zapisać w postaci:

$$O = \begin{cases} \gamma Z & \text{dla } \gamma Z < \delta_{\max} Z, \\ \delta_{\max} Z & \text{dla } \gamma Z \geq \delta_{\max} Z. \end{cases} \quad (2.16)$$

Przyjmujemy zatem, że zanim ekosystem osiągnie swoją maksymalną zdolność do reprodukcji, to skala odnowy dokładnie równa się pozyskanej ilości pożywienia. Wzór (2.16) można przekształcić do prostszej postaci:

$$\delta = \begin{cases} \gamma = l^\alpha & \text{dla } \gamma < \delta_{\max}, \\ \delta_{\max} & \text{dla } \gamma \geq \delta_{\max}. \end{cases} \quad (2.17)$$

Zmianę zasobów ekosystemu w danym momencie t możemy zapisać jako różnicę odnowy i zużycia:

$$\dot{Z} = \delta Z - \gamma Z. \quad (2.18)$$

Warunkiem stabilizacji zasobów ekosystemu jest $\dot{Z} = 0$. Ma to miejsce wtedy gdy²⁵:

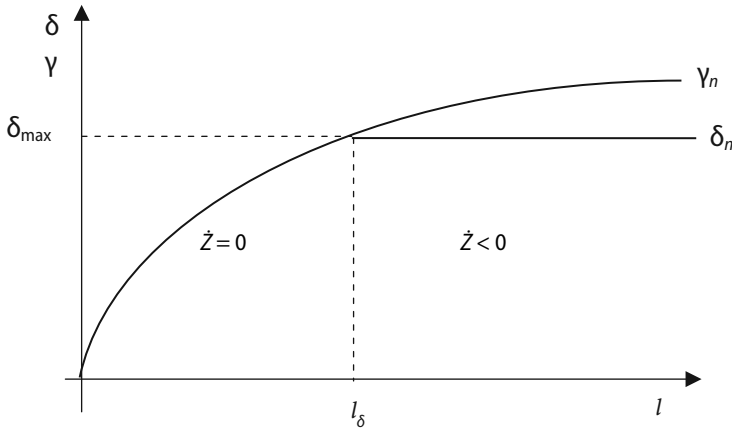
$$\delta = \gamma = l^\alpha \quad \text{dla } \gamma \leq \delta_{\max}. \quad (2.19)$$

Zwróćmy uwagę, że zgodnie z przyjętymi założeniami nigdy nie zajdzie $\dot{Z} > 0$, gdyż przyjęliśmy, iż odnowa nie może być wyższa od aktualnego zużycia. Może być natomiast niższa, gdy zużycie przekroczy maksymalną zdolność ekosystemu do reprodukcji, czyli $\dot{Z} < 0$, gdy:

$$\delta = \delta_{\max} \quad \text{dla } \gamma > \delta_{\max}. \quad (2.20)$$

Gdy zajdzie (2.20), to wówczas ekosystem się skurczy.

Rysunek 2.5 podsumowuje dotychczasowe rozważania o odnowie i zużyciu ekosystemu. Przedstawia on linię zmiany współczynnika zużycia i odnowy w funkcji gęstości zaludnienia. l_δ jest krytyczną wartością gęstości zaludnienia, przy której ekosystem osiąga maksymalną zdolność do reprodukcji. Do punktu $(l_\delta, \delta_{\max})$ wykresy funkcji współczynników zużycia i odnowy pokrywają się. Co oznacza, że ekosystem reprodukuje się do wysokości pozyskanej żywności i zachowuje stabilny rozmiar ($\dot{Z} = 0$). Po przekroczeniu tego punktu zużycie przekracza maksymalną zdolność ekosystemu do reprodukcji i w konsekwencji będzie on się kurczył ($\dot{Z} < 0$).



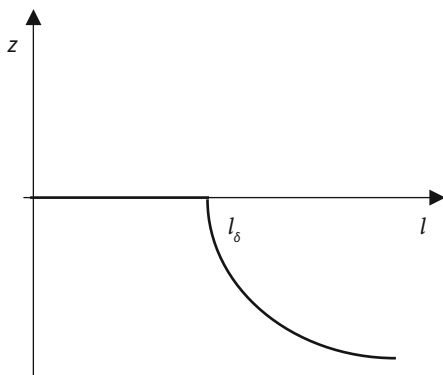
Rysunek 2.5. Współczynniki zużycia i zdolności do reprodukcji ekosystemu w funkcji gęstości zaludnienia

²⁵ Pomijamy przypadek $Z = 0$, dla którego również $\dot{Z} = 0$. Jest to przypadek, gdy zasoby w ekosystemie nie istnieją. Nie jest to więc sytuacja warta rozpatrywania.

Na podstawie wzorów (2.18), (2.19), (2.20) możemy określić dynamikę ekosystemu w regionie n :

$$z = \begin{cases} 0 & \text{dla } l \leq l_\delta, \\ l_\delta^\alpha - l^\alpha & \text{dla } l > l_\delta, \end{cases} \text{ gdzie: } z \equiv \frac{\dot{Z}}{Z}. \quad (2.21)$$

Rysunek 2.5 przedstawia przebieg dynamiki ekosystemu w funkcji gęstości zaludnienia danego regionu. Do krytycznej wartości zaludnienia l_δ ekosystem zachowuje swoją zdolność do pełnej reprodukcji. Jego dynamika jest zatem równa zero. Po przekroczeniu tej krytycznej wartości dynamika jest ujemna, czyli ekosystem przy gęstości $l > l_\delta$ nie jest w stanie odtwarzać zużytych składników. Będzie się zatem kurczył w tempie z . Jeśli takie tempo utrzyma się w długim okresie, to zasoby ekosystemu będą asymptotycznie zmierzały do zera. Ekosystem ulegnie zagładzie w wyniku wyeksploatowania go przez zamieszkujących w nim ludzi łowców-zbieraczy.



Rysunek 2.6. Dynamika dojrzałego ekosystemu

Na podstawie (2.21) można wyznaczyć wartość gęstości zaludnienia, przy której ekosystem osiąga maksymalną zdolność do reprodukcji:

$$l_\delta = \delta_{\max}^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (2.22)$$

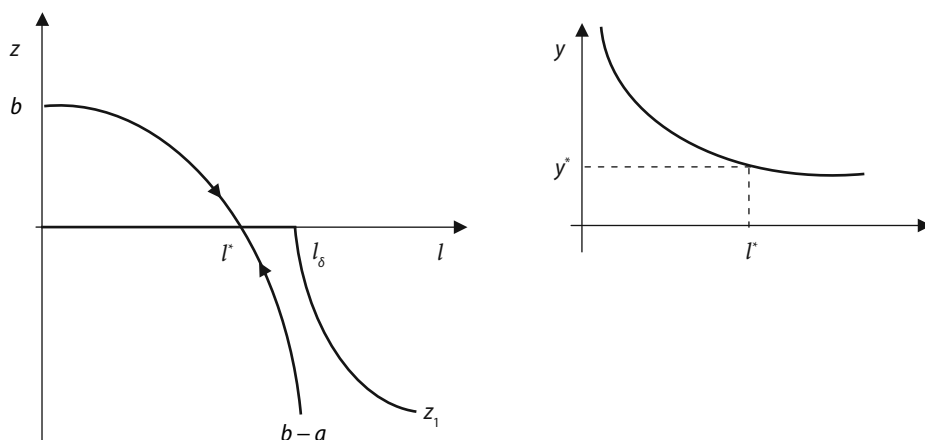
Ta krytyczna wartość zależy dodatnio od współczynnika maksymalnej zdolności ekosystemu do reprodukcji i również dodatnio od udziału nakładów pracy w pozyskaniu żywności w danym regionie (parametr α). Pierwsza zależność jest oczywista. Więcej ludności w danym regionie powoduje wyższy wskaźnik zużycia

ekosystemu. Zatem odpowiednio wyższy współczynnik odnowy, równoważący wskaźnik zużycia, pozwala pomieścić w danym regionie więcej ludności. Druga zależność wskazuje, że im niższy wkład pracy w pozyskiwanie żywności, tym niższa jest krytyczna wartość gęstości zaludnienia, z punktu widzenia zdolności do odnowy ekosystemu. Inaczej mówiąc, ten sam poziom żywności można pozyskać dzięki niższym nakładom pracy, gdyż jadalne składniki ekosystemu są relatywnie obfite i łatwe do zebrania i upolowania dzięki wysokiej naturalnej urodzajności ekosystemu. Można zatem uzyskać większy wolumen żywności na mieszkańca przy danej gęstości zaludnienia. Z kolei im większa ilość żywności na mieszkańca, tym wyższy współczynniki zużycia przy danej gęstości zaludnienia²⁶. A im wyższy współczynnik zużycia, tym niższa krytyczna wartość l_s dla danego współczynnika δ_{\max} .

Dynamika gospodarki jest wynikiem dążenia do równowagi dwóch głównych elementów ją tworzących: ludności i ekosystemu. Dla danego zasobu ekosystemu wzajemne oddziaływanie dynamiki ludności (L) i dynamiki pozyskania żywności na mieszkańca (y) powoduje, że gospodarka zmierza do gęstości zaludnienia danego regionu l^* przy produkcji y^* (rys. 2.2). Pozyskaniu żywności towarzyszy równolegle naruszanie równowagi ekosystemu. Pozyskanie jednostki żywności oznacza zużycie ekosystemu. Istotne jest, czy dążąc do l^* , ekosystem zachowuje zdolność do pełnej reprodukcji. Z tego punktu widzenia możemy wyróżnić dwa przypadki wzajemnego oddziaływania dynamiki ludności i dynamiki ekosystemu.

Pierwszy miałby miejsce wtedy, gdy $l^* \leq l_s$, czyli gęstość zaludnienia wynikająca z równowagi ludności jest nie większa niż krytyczna wartość gęstości zapewniająca jeszcze odnowę ekosystemu (rys. 2.7). Dla $l < l^*$ zachodzi $b - f(l) > z$, co oznacza, że $\dot{l} > 0$, czyli gęstość zaludnienia będzie rosła i zbiegała do l^* . Natomiast gdy $l > l^*$, wówczas $b - f(l) < z$, to $\dot{l} < 0$ i gęstość zaludnienia spada, dążąc do l^* . W punkcie l^* mamy $b - f(l) = z$, więc gęstość zaludnienia się stabilizuje. Temu poziomowi gęstości zaludnienia odpowiada produkcja żywności w długim okresie na poziomie y^* , niezbędnym do egzystencji gatunku. Liczba ludności i zasoby ekosystemu są stałym poziomem. Zjawisko wzrostu gospodarczego, rozumianego jako stały wzrost produkcji na mieszkańca, nie wystąpi. Nie istnieją wewnętrzne czynniki, które mogłyby wytrącić system z długookresowej równowagi i wprowadzić taką prymitywną gospodarkę na ścieżkę trwałego wzrostu.

²⁶ Wynika to z prostych przekształceń wzoru na produkcję na mieszkańca. Możemy ją zapisać: $y = \frac{l^\alpha}{l}$. Wiemy, że $\gamma = l^\alpha$. Możemy zatem współczynnik zużycia zapisać w postaci: $\gamma = yl$. Nietrudno dostrzec, że dla danej gęstości zaludnienia, jeśli wzrośnie produkcja na mieszkańca, to pociąga ona za sobą wzrost współczynnika zużycia ekosystemu.

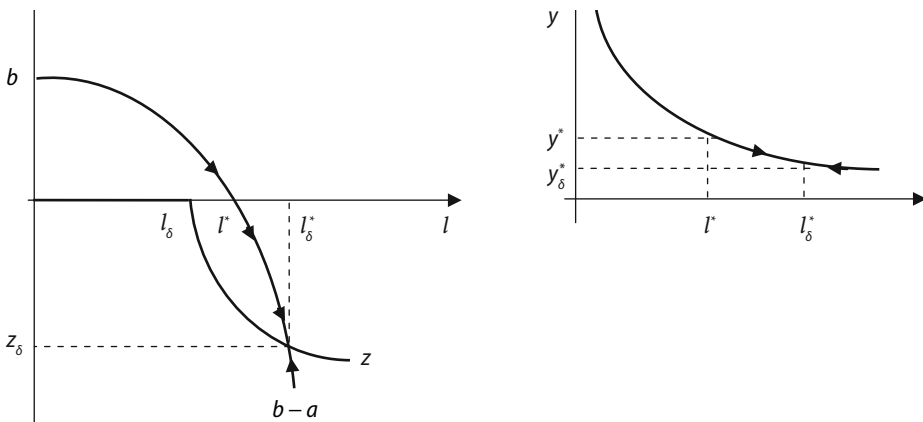


Rysunek 2.7. Równowaga dla $l \leq l_\delta$

Rozpatrzmy przypadek $l^* > l_\delta$, czyli punkt równowagi stabilnej egzystencji ludności leżałby w obszarze destabilizacji ekosystemu ($z < 0$, por. rys. 2.8). Przedstawione powyżej procesy zmian ludnościowych pchałyby system ku l^* . Spowodowałyby to przekroczenie l_δ i wzrost współczynnika zużycia (y) powyżej poziomu maksymalnej zdolności do odnowy (δ_{\max}). Ekosystem znajduje się w obszarze zmniejszenia swoich zasobów, gdyż nie może ich w pełni odnowić. Po przekroczeniu l_δ gospodarka charakteryzuje się $b - f(l) > z$, czyli $\dot{l} > 0$. Rośnie gęstość zaludnienia, co prowadzi do zmniejszenia krańcowej produktywności pracy i spadku produkcji żywności na mieszkańca poniżej y^* . Dla $l > l^*$, mimo iż przyrost naturalny jest ujemny, nadal zachodzi $b - f(l) > z$, gdyż tempo spadku ludności jest wyższe niż tempo spadku zasobów ekosystemu, i w konsekwencji gęstość zaludnienia rośnie aż do l_δ^* . W tym punkcie $b - f(l) = z$ i lokalna społeczność osiąga stan równowagi. Jest to jednak punkt, w którym pozyskiwana ilość żywności znajduje się poniżej niezbędnego poziomu do egzystencji ($y_\delta^* < y^*$), co prowadzi do ujemnego przyrostu naturalnego $b - f(l_\delta^*) < 0$. Równocześnie przy tym poziomie gęstości zaludnienia dynamika ekosystemu jest również ujemna ($z_\delta < 0$). Stan równowagi charakteryzuje się identyczną ujemną dynamiką ludności i ekosystemu, co utrzymuje gęstość zaludnienia na stałym poziomie l_δ^* . Stały poziom gęstości uniemożliwia podniesienie krańcowej produktywności pracy i zwiększenie ilości żywności na mieszkańca. Ponieważ w tym stanie równowagi zarówno dynamika ekosystemu, jak i ludności jest ujemna, to społeczność lokalna zmierza ku zagładzie.

Punkt równowagi (l_δ^*, y_δ^*) (rys. 2.8) nie jest jednak punktem, w którym lokalne społeczności będą tkwiły i biernie oczekiwały ostatecznego samounicestwienia.

Jeżeli przyjmiemy, że istnieje nadrzędny zbiorowy cel lokalnej społeczności, jakim jest przetrwanie, to zostaną podjęte działania mające na celu ochronę gatunku. Wydaje się, że strategicznie istotnym czynnikiem poprawiającym los lokalnej społeczności była emigracja do sąsiednich regionów. Analizujemy okres dziejów ludzkości (70–10 tys. lat temu), kiedy liczba dostępnych niezamieszkałych regionów była bardzo duża. Taka jednorazowa emigracja zmniejsza gęstość zaludnienia i przeciwdziałała poruszaniu się ku punktom równowagi z ujemnymi dynamikami ludności i ekosystemu. Jednak emigracja, niezależnie od skali, nie zapewnia trwałego uniknięcia zagrożenia zagłady lokalnej społeczności. Punkt (l_δ^*, y_δ^*) jest punktem stabilnej równowagi, dlatego też jakikolwiek spadek gęstości zaludnienia w wyniku emigracji powoduje ponowny ruch ku ujemnej dynamice ekosystemu i ludności. Taki region stałby się źródłem permanentnej emigracji, która chroniłaby lokalną społeczność przed zagładą²⁷.



Rysunek 2.8. Równowaga dla $l' > l_\delta$

Ostatecznie, lokalne myśliwsko-zbierackie społeczności można podzielić na dwie grupy: stagnacyjną i ekspansywną. Pierwsza tkwiła w idealnej równowadze pomiędzy dynamiką ludności i ekosystemu ($l' \leq l_\delta$). Póki nie zmieniły się naturalne warunki lokalnego regionu, nic nie zagrażało trwałości egzystencji gatunku. Zasoby danego regionu w pełni wystarczały na wyżywienie lokalnej społeczności, której

²⁷ Pomijamy w tym momencie terytorialne konflikty, jakie mogłyby powstać, gdyby emigracja odbyła się na terytorium już zajęte przez jakąś społeczność. Szerzej na temat strategii rozwiązywania takich konfliktów we współczesnych gospodarkach myśliwsko-zbierackich w: M.J. Baker, *An Equilibrium Conflict Model of Land Tenure in Hunter-Gatherer Societies*, „Journal of Political Economy” 2005, vol. 111, no. 1.

liczebność kształtowała się na stałym poziomie. Druga grupa charakteryzowała się brakiem możliwości osiągnięcia stabilnej równowagi ludnościowej. Ograniczeniem powiększania liczby członków lokalnej społeczności była niezdolność ekosystemu do odtwarzania swoich zasobów ($l^* > l_\delta$). Aby nie dopuścić do przeludnienia danego regionu i wynikającego z niego głodu, nadwyżkowa ludność emigrowała na sąsiednie niezamieszkane regiony. Ponieważ taka migracja tylko okresowo przeciwdziałałaby zagrożeniu atrofią, to emigracja mogłaby się utrzymywać stosunkowo długo. W tym sensie były to społeczności ekspansywne w zaludnianiu wolnych regionów. Zaludnianie coraz większych połąci lądów tworzyło rosnące zapotrzebowanie na zasoby ekosystemów w różnych regionach świata. Funkcjonowanie ekspansywnych społeczności lokalnych prowadziło zatem, wcześniej czy później, do bariery zasobów naturalnych w coraz większej liczbie regionów. Można powiedzieć, że dzięki ekspansywnym grupom rozpoczął się wzrost gospodarczy w rozumieniu powiększania absolutnego strumienia żywności. Ta historyczna faza rozwoju charakteryzowała się przede wszystkim wzrostem zasobu ludności, który w przyszłości miał stać się podstawowym czynnikiem wytwórczym.

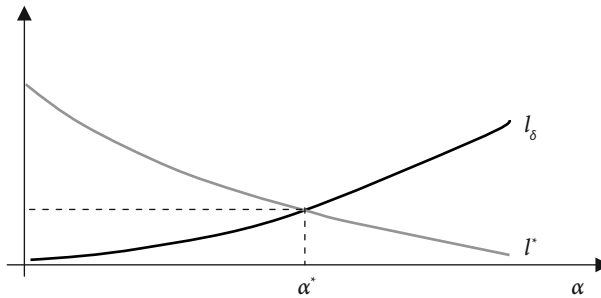
Czy możemy stwierdzić, jakie cechy rozstrzygały o tym, czy dana grupa była ekspansywna czy stagnacyjna? Warunkiem ekspansywności jest $l^* > l_\delta$, co możemy zapisać:

$$b^{\frac{1}{(1-\alpha)\varepsilon}} > \delta_{\max}^\alpha. \quad (2.23)$$

Założmy, że b oraz ε są biologicznie determinowane i takie same dla wszystkich lokalnych grup. Przyjmijmy również, że naturalne zdolności ekosystemu do odnowy δ_{\max} są identyczne we wszystkich regionach. Wówczas czynnikiem różnicującym krytyczne wartości gęstości zaludnienia jest współczynnik α , czyli wymagany udział pracy w pozyskaniu żywności w zróżnicowanych regionach. Funkcja z lewej strony równania (2.23) jest ściśle monotonicznie malejąca dla $\alpha \in (0, 1)$, przy czym

dla $\alpha \rightarrow 0$, $l^* = b^{\frac{1}{\varepsilon}} > 0$, a dla $\alpha \rightarrow 1$, $l^* = 0$. Natomiast funkcja z prawej strony dla tego samego przedziału α jest ściśle monotonicznie rosnąca i dla $\alpha \rightarrow 0$, $l_\delta = 0$, a dla $\alpha \rightarrow 1$, $l_\delta = \delta_{\max}$. Z tych własności wynika, że istnieje $0 < \alpha^* < 1$, dla którego obydwie krytyczne wartości gęstości zaludnienia zrównują się (rys. 2.9). Wówczas dla $\alpha < \alpha^*$ zawsze zachodzi $l^* > l_\delta$, czyli społeczności są ekspansywne. Natomiast dla $\alpha > \alpha^*$ zawsze mamy $l^* < l_\delta$, czyli społeczności są stagnacyjne. Zatem przy danej biologicznej charakterystyce gatunku ludzkiego jego zdolność do ekspansji była determinowana przez naturalne warunki środowiskowe, które określały łatwość pozyskania żywności z ekosystemu. Jeśli dana lokalna grupa znalazła się w regio-

nie charakteryzującym się $\alpha < \alpha^*$, stawała się grupą ekspansywną. *Homo sapiens* narodził się w środkowej Afryce, gdzie warunki środowiskowe sprzyjały obfitości pożywienia przez cały rok. Dzięki tej okoliczności terenów charakteryzujących się $\alpha < \alpha^*$ na pewno nie brakowało.



Rysunek 2.9. Wpływ udziału pracy na ekspansywność lokalnych grup społecznych

Z powyższych ustaleń wynika ważny wniosek: aby rozpocząć zaludnianie globu wystarczyło, aby tylko jedna lokalna grupa społeczna żyła w środowisku sprzyjającym ekspansji ludności²⁸ ($\alpha < \alpha^*$). Załóżmy, że rozpatrujemy początkowy stan światowej gospodarki z jedną społecznością lokalną. Gdyby była to społeczność stagnacyjna, to pozostałe regiony nigdy nie zostałyby zasiedlone. Niech zatem w punkcie wyjścia będzie społeczeństwo o cechach ekspansywnych. Przyjmijmy, że członkowie lokalnej społeczności potrafią rozpoznać moment kurczenia się zasobów ekosystemu, czyli znają punkt l_0 . Wiedzą również, że dalszy wzrost gęstości zaludnienia będzie prowadził do pogłębiania ubożenia ekosystemu. Inaczej mówiąc, zdają sobie sprawę z możliwości nadejścia katastrofy żywnościowej²⁹. Ostateczną decyzję o emigracji podejmują w punkcie l^* . Załóżmy, że skala emigracji powoduje spadek gęstości zaludnienia do punktu l_0 . Dana społeczność lokalna znajduje się krótkookresowo powyżej poziomu stabilnej egzystencji y^* . Przyjmijmy, że sąsiedni region charakteryzuje się gorszymi warunkami naturalnym, wymagającymi zaangażowania większych nakładów pracy na pozyskanie żywności (wyższy parametr α). Emigracja przynosi trzy istotne efekty.

²⁸ Jest to zgodne z najnowszymi ustaleniami paleoantropologii. Ekspansja zaczęła się od wyjścia niewielkiej grupy ludzi z Afryki około 80–70 tys. lat temu.

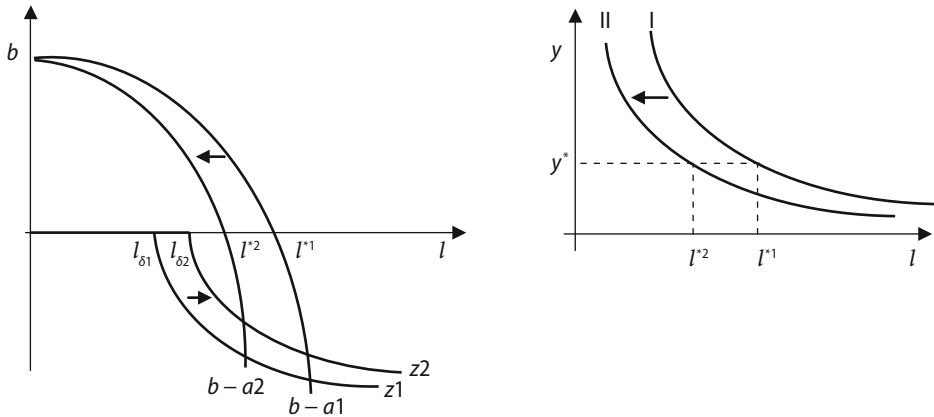
²⁹ Zob. K.V. Flannery, *Origins and ecological effects of early domestication in Iran and Near East*, w: *The Domestication and Exploitation of Plants and Animals*, red. P.J. Ucko, G.H. Dimbleby, Aldine Transaction, New Jersey 2009, s. 75.

Pierwszy występuje w regionie, z którego wyruszyła grupa emigrująca. Spadek gęstości zaludnienia podnosi krańcową produktywność pracy i przyczynia się do wzrostu produkcji żywności na mieszkańca powyżej poziomu stabilnej egzystencji y^* . To powoduje ponowny wzrost ludności i zmniejszenie zasobów ekosystemu i ruchu poziomowi zaludnienia równemu l . Prowadzi to do konieczności ponownego podjęcia decyzji o emigracji. Cykl emigracyjny odtwarza się jeszcze raz.

Drugi efekt ma miejsce w regionie, do którego przybyła migrująca grupa. Pojawia się obniżenie produkcji na mieszkańca dla każdego poziomu gęstości zaludnienia z powodu wzrostu parametru α . Ponieważ stopa zgonów w funkcji ilości żywności na mieszkańca ($a = a(y)$) i stopa urodzeń pozostały bez zmian, to poziom stabilnej egzystencji y^* również pozostał na dotychczasowej wysokości. Z tego wynika, że gęstość zaludnienia wyznaczająca równowagę ludności l^* musiała spaść przy danym y^* z l^1 na l^2 (rys. 2.10). Równocześnie zwiększenie udziału nakładów pracy w pozyskaniu żywności przesunęło wykres dynamiki zasobów ekosystemu z $z1$ na $z2$, powodując ustalenie krytycznej wartości gęstości zaludnienia na $l_{\delta 2}$. Ostateczny wynik tych przesunięć jest trudny do przewidzenia. Zależy od siły reakcji l^* na zmianę α (przesunięcie wykresu funkcji przyrostu naturalnego $b - a$ na lewo) oraz od reakcji l_{δ} na zmianę α (przesunięcie wykresu funkcji z na prawo). Na rysunku 2.10 jest przedstawiona sytuacja, gdy ostateczny wynik tych przesunięć pozostawia daną społeczność lokalną jako ekspansywną. Jednak równie dobrze wynik może być taki, że ukształtuje się relacja $l^* \leq l_{\delta}$, czyli powstanie społeczeństwo stagnacyjne i proces dalszej emigracji zostanie zahamowany. Istotne jest również to, że pomiędzy regionami w wyniku migracji wyrównuje się standard życia na poziomie y^* , przy zróżnicowanej gęstości zaludnienia.

Ciągła ekspansja ludności do kolejnych regionów, szczególnie wzdłuż tej samej długości geograficznej, musiała wiązać się z na tyle istotnym pogorszeniem klimatu, iż żywność stawała się coraz trudniej dostępna i jej zdobycie wymagało coraz większych nakładów starań ludzkiej pracy. To owocowało relatywnym wzrostem krytycznej wartości równowagi ekosystemu l_{δ} oraz równoczesnym relatywnym spadkiem krytycznej wartości równowagi ludności l^* . Społeczności, wcześniej czy później, z ekspansywnych przekształcały się w stagnacyjne i ekspansja wzdłuż długości geograficznych była wyhamowana³⁰. Inaczej było w przypadku tych samych szerokości geograficznych, wzdłuż których klimat był w miarę podobny i nie wywoływał radykalnych zmian w ekosystemie. Migrujące społeczności mogły długo utrzymać swoje ekspansywne własności.

³⁰ Daleko wysunięte na północ rejony arktyczne albo wcale nie były zasiedlone, albo bardzo słabo, a Antarktyda nie została w ogóle opanowana przez ludzi (stało się to dopiero w XX wieku).



Rysunek 2.10. Efekty migracji

Opis: I, II – produkcja na mieszkańca odpowiednio w regionie wyjściowym i docelowym; $b - a_1$, $b - a_2$ – stopa przyrostu naturalnego odpowiednio w regionie wyjściowym i docelowym; z_1 , z_2 – dynamika ekosystemu odpowiednio w regionie wyjściowym i docelowym.

Trzeci efekt występuje w regionie wyjściowym. Emigracja, podnosząc krótko-terminowo spożycie żywności ponad poziom stabilnej egzystencji (y^*), jeżeli będzie pojawiała się cyklicznie, to ostatecznie w długim okresie podniesie średnie spożycie ponad y^* . Ma to niezwykle istotne znaczenie dla charakterystyki funkcji produkcji. Dzięki relatywnie obfitemu odżywianiu ludzie stają się silniejsi fizycznie i dzięki temu bardziej wydajni w pozyskiwaniu żywności³¹. Jeżeli charakterystyka funkcji zgonów ($a = a(y)$) nie zmienia się, to poziom stabilnej egzystencji (y^*) również pozostanie stały. Jednakże dzięki wzrostowi wydajności ten poziom produkcji może być wytworzony przy większej gęstości zaludnienia. Zatem gęstość zaludnienia w równowadze l rośnie, co wzmacnia ekspansywne cechy danej społeczności lokalnej (wykres stopy przyrostu naturalnego $b - a$ przesunął się na prawo). To z kolei, w przypadku podjęcia kolejnej decyzji o emigracji, powiększa jej skalę (wzrosła rozpiętość między l_{δ} a nowym poziomem l). W ten sposób przyspiesza tempo zaludniania we wszystkich regionach.

Nie można wykluczyć sytuacji, że cykliczne fale migracyjne być może były postrzegane jako dosyć kosztowna strategia. Trzeba było pokonać relatywnie duże odległości na nieznanymi terenach, narażając się na przeróżne niebezpieczeństwa.

³¹ Uwzględnienie tego efektu wymaga modyfikacji funkcji produkcji. Można ją zapisać jako $y = El^{n-1}$, gdzie parametr E uwzględniałby efekty poprawy produktywności w wyniku lepszego odżywiania się. W całej dotychczasowej analizie milcząco przyjmowaliśmy, że $E = 1$.

To absorbowало rzadkie zasoby. Z tego powodu społeczności lokalne wybierały również inne strategie dostosowania do warunków środowiskowych, aby przywrócić trwałą równowagę pomiędzy dynamiką ludności i ekosystemu, czyli żeby wejść w obszar charakteryzujący się $l' \leq l_\delta$, co trwale zapobiegało zagładzie. Przede wszystkim mogły to być próby zmiany współczynnika maksymalnej odnowy (δ_{\max}). Wcześniej wspominaliśmy o próbach wpływania na zdolność ekosystemu do odnowy (na przykład wypalanie ziemi przez Aborygenów w Australii). Dzięki takim działaniom krytyczna wartość gęstości zaludnienia l_δ przesunie się w jakimś stopniu na prawo. Można również obniżyć przyrost naturalny poprzez kontrolę urodzeń. Typowe środki tej kontroli to społeczne mechanizmy opóźniania pożycia seksualnego, wydłużenie okresu karmienia noworodków mlekiem matki oraz dzieciobójstwo³². Dzięki tym działaniom l' przesunie się na lewo. Powstaje wobec tego szansa, że gospodarka znajdzie się w położeniu charakteryzowanym dla społeczności stagnacyjnych i osiągnie trwałą równowagę przy poziomie niezbędnej egzystencji.

Historia jednak pokazała, że strategie te nie były w stanie wytlumić ekspansywności lokalnych społeczności. Mniej więcej 10–12 tys. lat temu ludzkość zasiedliła większość dostępnych regionów.

Trzeba jednak stwierdzić, że zbadanie wzajemnego oddziaływania naturalnych warunków zasiedlanego środowiska oraz dynamiki ludności jest niewystarczające do wyjaśnienia ludnościowej ekspansji naszego gatunku niemalże na całym globie ziemskim. Przemieszczając się na nowe obszary, ludzie trafiali na różną faunę i florę, warunki klimatyczne oraz ukształtowanie terenu. Aby przetrwać, musieli adaptować się do tych nowych warunków. Zimniejszy klimat nie tylko powodował konieczność zmiany diety, lecz także sposobów zapewnienia bezpiecznego schronienia i nowych ubiorów. Równocześnie rosnąca gęstość zaludnienia sprawiała, że na danym obszarze coraz trudniej było zapewnić wyżywienie na poziomie stabilnej egzystencji, bazując na stałym zestawie spożywanych pokarmów. Wszystkie te czynniki tworzyły presję na wprowadzanie szeregu innowacyjnych zmian w wielu obszarach ludzkiej egzystencji. Używając współczesnej terminologii, owe innowacje tworzyły zjawisko postępu technicznego. Z powyższych rozważań wynika zatem, że mechanizm wzajemnego oddziaływania ekosystemu i zasiedlającej go ludności (kiedy każdy z tych układów dąży do osiągnięcia równowagi) wymaga uzupełnienia o zjawisko postępu technicznego.

³² Szerzej o sposobach kontroli urodzeń w: B. Hayden, *Population Control among Hunter-Gatherers*, „World Archeology” 1972, vol. 4, no. 2, s. 205–221.

Rozdział 3

Postęp technologiczny w społeczności przedagrarniej

Rosnąca populacja ludzi, opanowująca coraz większe terytoria, musiała stworzyć presję na rzadkie zasoby. Gdyby wszyscy pozyskiwali to samo dobro z zasobów przyrody, tak jak zakładaliśmy w poprzednim rozdziale, to wynikiem rosnącej gęstości zaludnienia byłyby głód i rozmiar populacji dostosowałby się do potencjału żywieniowego. Takiej stagnacyjnej równowagi wymuszonej głodem nie obserwowaliśmy w górnym paleolicie. Przeciwnie, populacja ludzi rosła, najprawdopodobniej wolno i w zmiennym tempie, zasiedlając coraz większe obszary. Było to możliwe dzięki niezwykłym zdolnościom adaptacyjnym człowieka do środowiska naturalnego, polegającym na zmianie palety dóbr pozyskiwanych z przyrody. Po prostu zwiększano liczbę spożywanych produktów³³. Na początku górnego paleolitu w diecie dominowały duże zwierzęta, jak mamuty, żubry, konie czy jelenie. Nie było łatwo je upolować, ale sukces łowiecki dostarczał jednorazowo dużo kalorycznego pożywienia. W diecie pojawiają się również żółwie, które ze względu na swoją powolność były w miarę łatwą zdobyczą.

W miarę upływu czasu dieta była rozszerzana o drobniejsze zwierzęta, jak króliki, zające, lisy, ptaki, ślimaki oraz ryby i inne drobne owoce morza, a także orzechy oraz przeróżne owoce i wreszcie przeróżne nasiona traw³⁴. Takie urozmaicenie diety wymagało stosowania nowych technik myśliwskich i zbierackich. Na przykład upolowanie małych szybkich zwierząt wymagało umiejętności zastawiania sidła i precyzyjnych narzędzi do oprawiania zwierzyny. Łowienie ryb wiązało się z wytwarzaniem sieci. Przetworzenie nasion i bulw do jadalnej postaci wymagało opracowania nowych sposobów ich suszenia, rozdrabniania i następnie przechowywania.

³³ M. Stiner, *Thirty years on the „Broad Spectrum Revolution” and Paleolithic Demography*, „Proceedings of National Academy of Science” 2001, vol. 98, no. 13, s. 6993–6996.

³⁴ Bardzo dobrym świadectwem poszerzania diety są odkrycia dokonane na stanowisku archeologicznym Ohalo II (obecne terytorium Izraela) datowanym na około 20 tys. lat temu. Znalezione tam pozostałości różnorodnych zwierząt, w tym również drobnych, jak ptaki i zające, oraz pozostałości prawie 100 gatunków nasion i owoców.

To, że poszerzanie diety było wymuszone przez rosnącą populację, wynika z prostej obserwacji. Ponieważ zapewnienie sobie w diecie nowych produktów wymagało wynalezienia nowych technik łowieckich i zbierackich, to wydaje się racjonalne, że nie podejmowano wysiłku, aby je opracować, aż do momentu, kiedy pojawiały się trudności ze znajdowaniem dużych bądź wolniej poruszających się zwierząt. Kłopot z pozyskaniem nowych terenów łowieckich mógł być natomiast wynikiem tego, że okoliczne obszary mogły być zajęte przez inne grupy ludzi. Konkurencja o rzadkie zasoby najprawdopodobniej tworzyła presję, aby poszerzyć potencjał żywieniowy lokalnego obszaru poprzez zastosowanie nowych technik łowieckich, pozwalających chwytać mniejsze i szybsze zwierzęta³⁵.

Inaczej mówiąc, pozyskanie każdego nowego produktu w diecie związane było z jakimś nowym udoskonaleniem technicznym, którego wprowadzenie zapewne poprzedzone było różnymi praktycznymi eksperymentami, które metodą prób i błędów doprowadzały do najlepszego rozwiązania. Ludzie uczyli się dobierać jadalne produkty poprzez bezpośredni kontakt z ekosystemem. Podobnie działo się z doborem najskuteczniejszych technik łowieckich. Z pewnością samo polowanie pobudzało powstanie pomysłów w zakresie jego doskonalenia. Tak zapewne doszło do jednej z największych zmian w technice polowania, a mianowicie możliwe stało się polowanie z dystansu, dzięki pomysłowej broni miotanej (np. włóczniom) i następnie wynalezieniu łuku. Mówiąc dzisiejszym językiem, powstawanie nowych idei było wynikiem procesu *learning by doing*, dzięki któremu następowało ostatecznie poszerzanie dostępnego potencjału żywieniowego na danym obszarze.

Kreowanie nowych idei odzwierciedlało się zatem w rozszerzaniu palety zbieranych roślin i zwierzyny łownej, które przekształcano w finalny produkt, jakim była żywność. Oznaczmy przez x_i konkretny i -ty produkt pozyskany z ekosystemu i następnie przetworzony na pokarm. Dobro x_i jest w takim ujęciu dobrem pośrednim transformowanym następnie na żywność Y . W danym okresie liczba dóbr pośrednich jest równa A . Wówczas funkcja produkcji wytwarzania żywności, czyli finalnego produktu, ma postać:

$$Y = L^\alpha \int_0^A x_i^{1-\alpha} di, \quad 0 < \alpha < 1. \quad (3.1)$$

Proces pozyskiwania dóbr pośrednich opisuje technologia:

$$x_i = x. \quad (3.2)$$

³⁵ W.J. Burroughs, *Climate Change in Prehistory. The End of the Reign of Chaos*, Cambridge University Press, Cambridge–New York 2005, s. 152.

Zgodnie z równaniem (3.2) surowe jednostki ekosystemu x są przekształcane w taką samą ilość dóbr pośrednich x_i . To, że surowe jednostki³⁶ nadają się do przekształcania w żywność, zawdzięczmy przypadkowym odkryciom dokonywanym przez człowieka w procesie eksploatacji ekosystemu (*learning by doing*). Zastosowanie x_i jest wynikiem pomysłowości ludzi, wytworzenia przez nich wiedzy w procesie eksperymentowania z ekosystemem. Suma zużytych surowych jednostek składa się na odkryty i poznany w celach gospodarczych (w tym przypadku wytworzenia żywności) ekosystem w danym regionie. Oznaczmy go Z_p . Natomiast cały zasób ekosystemu oznaczmy Z . Suma x_i musi również być równa odkrytemu ekosystemowi:

$$\int_0^A x_i di = Z_p < Z. \quad (3.3)$$

Liczba możliwych odkryć praktycznych zastosowań poszczególnych surowych elementów ekosystemu jest skończona i wynosi \bar{A} . Parametr \bar{A} będziemy nazywać potencjalnym do osiągnięcia postępowaniem technicznym w danym regionie lub potencjałem żywieniowym. Gdyby zostało osiągnięte \bar{A} , wszystko z czego składa się ekosystem zostałoby odkryte i wykorzystane do przetworzenia na konsumpcję. Wówczas zachodziłoby:

$$\int_0^{\bar{A}} x_i di = Z. \quad (3.4)$$

Załóżmy, że x_i jest stałe dla każdego zastosowania i równe \bar{x} . Wówczas z (3.3) i (3.4) otrzymujemy:

$$\bar{x} = \begin{cases} \frac{Z_p}{A}, & Z_p < Z, \\ \frac{Z}{\bar{A}}, & Z_p = Z. \end{cases} \quad (3.5)$$

Po podstawieniu (3.5) do funkcji produkcji (3.1) otrzymujemy:

$$Y = \begin{cases} Z_p^{1-\alpha} A^\alpha L^\alpha, & Z_p < Z, \\ Z^{1-\alpha} \bar{A}^\alpha L^\alpha, & Z_p = Z. \end{cases} \quad (3.6)$$

Górny wiersz równania (3.6) opisuje wytwórczość, gdy nie wszystkie zasoby ekosystemu zostały odkryte. Dolny natomiast, gdy wszystkie potencjalnie dostępne

³⁶ Przez „surowe elementy ekosystemu” rozumiemy nieprzetworzone, pobrane wprost z ekosystemu składniki.

zwierzęta oraz rośliny w danym obszarze geograficznym są zbierane lub łowione. Tak jak poprzednio interesuje nas pozyskiwanie żywności na jednego mieszkańca. Dla $A \in (0, \bar{A})$ produkcja na mieszkańca jest równa:

$$y = A\bar{A}^{\alpha-1}l^{\alpha-1}, \text{ gdzie: } l = \frac{L}{Z}. \quad (3.7)$$

Zależy ona dodatnio od faktycznego postępu technologicznego (A) i ujemnie od gęstości zaludnienia l , która jest definiowana jako stosunek liczby ludności do całkowitego zasobu ekosystemu w danym regionie. Natomiast dla danego faktycznego poziomu techniki pozyskanie żywności na mieszkańca jest niezależne od potencjalnego do osiągnięcia postępu technicznego³⁷ $\left(\frac{\partial y}{\partial \bar{A}} = 0\right)$.

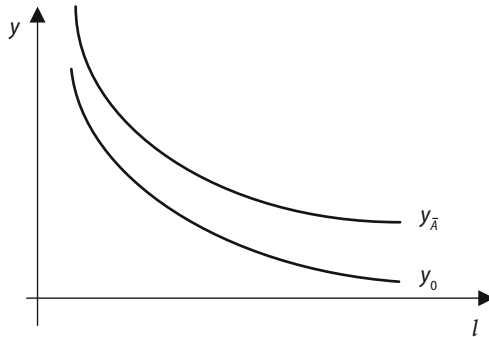
W szczególnym przypadku, gdy $A = \bar{A}$, czyli cały potencjał ekosystemu jest w pełni wykorzystany, funkcja produkcji na mieszkańca wynosi:

$$y_{\bar{A}} = \bar{A}^{\alpha} l^{\alpha-1}. \quad (3.8)$$

Produkcja ta jest maksymalna z punktu widzenia osiągnięcia kresu postępu technologicznego, rozumianego jako odkrywanie możliwości ekosystemu. Gdy cały ekosystem jest zagospodarowany, to produkcja na mieszkańca zależy tylko od gęstości zaludnienia ekosystemu.

Dzięki postępowi technologicznemu przełamywana jest malejąca krańcowa produktywność pracy. Istotne jest jednak to, iż rozumienie postępu jako powiększanie wachlarza odkrywanych surowych elementów ekosystemu nadających się do spożycia ma górny kres poprawy wyżywienia na mieszkańca (rys. 3.1). Zatem interesujące jest, czy taki postęp techniczny, który wymagał również zmiany technik łowieckich, aby pozyskać nowe surowe jednostki ekosystemu, przyczynia się do złagodzenia presji ludnościowej na pozyskanie żywności. Inaczej mówiąc, czy osłabia ekspansywność ludności lokalnych społeczności i umożliwia kreowanie społeczności stagnacyjnych ludnościowo.

³⁷ Brak wrażliwości zmiennej y na potencjał żywniowy wynika z prostych przekształceń. Żywność *per capita* można zapisać jako: $y = A\bar{A}^{\alpha-1} \left(\frac{L}{\bar{A}}\right)^{\alpha-1}$, co daje ostatecznie $y = A \left(\frac{L}{\bar{A}}\right)^{\alpha-1}$, które nie zależy od potencjału żywniowego.



Rysunek 3.2. Pozyskanie żywności na mieszkańca w warunkach postępu technicznego

Opis: y_0 – produkcja dla najniższego poziomu technologicznego $A = 1$, $y_{\bar{A}}$ – produkcja dla w pełni odkrytych zasobów ekosystemu.

Aby znaleźć ścieżkę czasową pozyskiwanej żywności na mieszkańca, musimy określić ścieżki postępu technologicznego i ludności. Równanie ruchu ludności wyrazimy tak jak poprzednio – w postaci zmiany gęstości zaludnienia:

$$\dot{l} = [b - a(y) - z]l. \quad (3.9)$$

Obecnie żywność na mieszkańca zależy od gęstości zaludnienia i postępu technologicznego (wzory 3.7 i 3.8). Zatem stopę zgonów również możemy przedstawić jako funkcję tych dwóch zmiennych: $a = h(A, l)$ o własnościach: $h(A, 0) = 0$, $h(A, +\infty) = +\infty$, $h(+\infty, l) = 0$, $h_A < 0$, $h_{AA} > 0$, $h_l > 0$, $h_{ll} > 0$. Zmodyfikowany wzór na ruch gęstości zaludnienia ma postać:

$$\dot{l} = [b - h(A, l) - z]l. \quad (3.10)$$

Przyjmijmy chwilowo dla uproszczenia, że $z = 0$, czyli ekosystem ma zdolność do samoodnowy na dowolnym poziomie. Wówczas ruch ludności jest w całości determinowany przez stopę przyrostu naturalnego: $u = b - h(A, l)$. Stan stacjonarny dla gęstości zaludnienia wystąpi dla $\dot{l} = 0$, co oczywiście ma miejsce, gdy stopa urodzeń zrówna się ze stopą zgonów:

$$b = h(A, l). \quad (3.11)$$

Wydaje się, że tworzenie nowych idei technicznych w tamtym okresie jest determinowane głównie przez umiejętności gatunku ludzkiego w zakresie poznawania swojego środowiska i uczenia się od samego ekosystemu. Ukryta wiedza, której muszą nauczyć się ludzie, jest zakumulowana przez ekosystem danego regionu w liczbie potencjalnych zastosowań \bar{A} . Ludzie przejawiają naturalną zdolność do uczenia się na podstawie obserwacji efektów swoich działań w procesie przekształcania surowych składników ekosystemu w dobra pośrednie i następnie w finalne. W każdym z tych etapów człowiek nabywał nowe umiejętności, które pozwalały mu zrozumieć nowe możliwości ekosystemu. Jest to właśnie swoisty *learning by doing*, czyli pozyskiwanie wiedzy w procesie codziennej penetracji ekosystemu w poszukiwaniu pożywienia. Przyjmijmy, że łowcy-zbieracze są zdolni do poznania i zrozumienia średnio drobnego ułamka β całego potencjału żywieniowego. Gdy go poznają w całości, czyli A osiągnie górny kres \bar{A} możliwych praktycznych zastosowań ekosystemu, postęp technologiczny i proces uczenia ustaje dla warunków wyznaczonych przez łowiecko-zbieraczy tryb życia³⁸. Zatem w danym odcinku czasu odkrywają nowe idee równie:

$$\dot{A} = \begin{cases} \beta \bar{A}, & A < \bar{A}, \\ 0, & A = \bar{A}. \end{cases} \quad (3.12)$$

Bez wątpienia w tym procesie uczenia się decydującą rolę odgrywał przypadek i zwykły lut szczęścia. Być może również przeprowadzane były drobne praktyczne eksperymenty przed ostatecznym zastosowaniem nowo odkrytego dobra pośredniego. Raczej jednak nie były stosowane one zbyt szeroko, gdyż wymagałoby to poświęcania rzadkich zasobów. Nauka i doświadczenie były raczej zdobywane bezpośrednio podczas pozyskiwania żywności. Wydaje się, że skłonność do uczenia się od ekosystemu jest determinowana nie tylko przez wrodzone zdolności gatunku ludzkiego, ale bez wątpienia dużym ułatwieniem w rozpoznawaniu ekosystemu ma już zdobyta wiedza o praktycznym wykorzystaniu poznanych składników. Przyjmijmy zatem, że β jest wprost proporcjonalne do już rozpoznanego ekosystemu, czyli im więcej się wie, tym szybciej pozyskuje się kolejne porcje wiedzy:

$$\beta = \lambda A. \quad (3.13)$$

Ostatecznie powstawanie postępu technicznego jest opisane jako:

³⁸ Zupełnie innym problemem jest to, czy postęp technologiczny trwa nadal w sensie ogólnej zmiany.

$$\dot{A} = \begin{cases} \lambda A \bar{A}, & A < \bar{A}, \\ 0, & A = \bar{A}. \end{cases} \quad (3.14)$$

Istotną cechą tak opisanego postępu technicznego jest jego semiautonomiczny charakter w stosunku do pozostałych obszarów gospodarki łowiecko-zbierackiej. Z jednej strony ma on cechy endogeniczne w tym sensie, że jest wynikiem procesu uczenia się, opanowywania, rozumienia ekosystemu w procesie jego eksploatacji na potrzeby przetwarzania w żywność (wyraża to wprowadzenie do wzoru (3.14) potencjału dóbr pośrednich \bar{A}). Jest więc powiązany z wytwórczością i dynamiką ludności. Z drugiej strony jest on niezależny od tych procesów, gdyż jest wynikiem wrodzonych cech, umiejętności poszukiwania najlepszych sposobów dostosowywania się do środowiska za pomocą unikatowych instrumentów, których nie posiadały inne gatunki hominidów, jak na przykład zdolność do myślenia symbolicznego oraz posługiwanie się mową (to prezentuje parametr λ).

Współczynnik λ nazwiemy intensywnością postępu technicznego i będziemy go interpretowali jako naturalną, wrodzoną skłonność ludzi do adaptowania się do warunków środowiskowych poprzez uczenie się od ekosystemu nowych zastosowań jego składników. Przyjmujemy, że ta skłonność jest zmienna, uzależniona od presji środowiska. Przez presję środowiska będziemy rozumieli gęstość zaludnienia. Przy czym przyjmujemy nie tyle absolutny poziom gęstości zaludnienia, ile raczej zmienność gęstości zaludnienia. Inaczej mówiąc, gdy gęstość zaludnienia jest stabilna, to adaptacja do środowiska ustaje, czyli ustaje proces uczenia się od środowiska, rozpoznawania jego kolejnych składników. Z kolei zmienność gęstości zaludnienia zależy od stopy przyrostu naturalnego. Przyjmujemy, że im jest wyższa bezwzględna stopa przyrostu naturalnego, tym wyższa presja na angażowanie się w procesy poznawcze składników ekosystemu. Chodzi o bezwzględną wartość, gdyż wysoka ujemna stopa przyrostu naturalnego skłania do podjęcia dużego trudu w rozpoznawaniu składników ekosystemu, aby poprzez rozszerzenie diety przeciwdziałać kurczeniu się lokalnej społeczności. Natomiast wysoka dodatnia stopa przyrostu naturalnego nakłania do zwiększenia wysiłku w zakresie rozpoznawaniu ekosystemu, aby można było jak najdłużej utrzymać ekspansję lokalnej społeczności, przeciwdziałając w ten sposób spadającej krańcowej produktywności pracy. Zatem λ możemy opisać jako:

$$\lambda = \lambda(u), \quad \lambda(0) = 0, \quad \lambda' > 0 \text{ dla } u > 0, \quad \lambda' < 0 \text{ dla } u < 0.$$

Stopa przyrostu naturalnego jest równa zero, gdy stopa urodzeń jest równa stopie zgonów. Załóżmy, że stopa zgonów jest opisana przez funkcję o stałej elastyczności zgonów względem poziomu żywności na mieszkańca:

$$h(A, l) = y^{-\varepsilon}, \quad \varepsilon > 0. \quad (3.15)$$

Po przekształceniach otrzymujemy stopę przyrostu naturalnego:

$$u = b - h(A, l) = b - A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)}. \quad (3.16)$$

Dla $u = 0$ można wyznaczyć wszystkie możliwe kombinacje A i l , przy których ustaje zmienność gęstości zaludnienia:

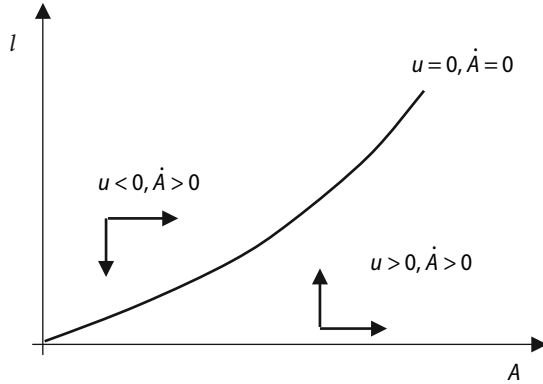
$$l = cA^{\frac{1}{1-\alpha}}, \quad \text{gdzie: } c = \frac{b^{\frac{1}{\varepsilon(1-\alpha)}}}{\bar{A}}. \quad (3.17)$$

Na rysunku 3.2 linia $u = 0$ pokazuje wszystkie możliwe kombinacje gęstości zaludnienia i postępu technicznego, gdy gęstość zaludnienia stabilizuje się z powodu osiągnięcia zerowej stopy przyrostu naturalnego. Punkty leżące powyżej tej linii

charakteryzują się $l > cA^{\frac{1}{1-\alpha}}$, czyli $u < 0$. Gęstość zaludnienia zmniejszałaby się zatem w wyniku ujemnego przyrostu naturalnego (ilustruje to strzałka skierowana

do dołu). Natomiast punkty leżące poniżej linii $u = 0$ spełniają warunek $l < cA^{\frac{1}{1-\alpha}}$, czyli $u > 0$ i gęstość zaludnienia rosłaby (strzałka skierowana ku górze). Na rysunku 3.2 możemy również pokazać kierunek ewolucji postępu technicznego. Wszystkie kombinacje A i l leżące na linii $u = 0$ charakteryzują się stabilnym poziomem postępu technicznego $\dot{A} = 0$, gdyż wówczas $\lambda = 0$. Natomiast wszystkie punkty poniżej i powyżej pobudzają postęp techniczny, gdyż $\lambda > 0$ (poziome strzałki pokazują kierunek zmiany postępu technicznego).

Na podstawie tylko informacji o kształtowaniu się zależności między A i l dla $u = 0$ nie jesteśmy w stanie odpowiedzieć, do jakiego ostatecznie poziomu techniki zbiega lokalna społeczność. Szczególnie interesujący jest problem, czy wzajemne oddziaływanie dynamiki gęstości zaludnienia i dynamiki techniki kieruje lokalne społeczności do pełnego wykorzystania potencjału żywieniowego, czy też może gęstość zaludnienia stabilizuje się ($u = 0$) przed jego osiągnięciem i lokalna społeczność traci bodźce do dalszego rozwijania techniki.



Rysunek 3.2. Pary A i l zapewniające stabilność gęstości zaludnienia i żywności na mieszkańca

Obliczmy stopę zmiany przyrostu naturalnego ze względu na zmienność gęstości zaludnienia i postępu technicznego:

$$\dot{u} = \varepsilon h(A, l) \left[\frac{\dot{A}}{A} - (1 - \alpha) \frac{\dot{l}}{l} \right]. \quad (3.18)$$

Z (3.18) wynika, że $\dot{u} = 0$, gdy $\frac{\dot{A}}{A} - (1 - \alpha) \frac{\dot{l}}{l} = 0$. Załóżmy, że współczynnik intensywności postępu technicznego jest opisany worem $\lambda = u^2$ i podstawmy go do wzoru na stopę postępu technicznego (3.14). Wówczas otrzymujemy warunek na $\dot{u} = 0$:

$$u^2 \bar{A} - (1 - \alpha) u = 0. \quad (3.19)$$

Rozwiązanie tego równania kwadratowego daje nam dwa punkty stopy przyrostu naturalnego, których osiągnięcie stabilizuje jej poziom: $u = 0$ oraz $u = \frac{1 - \alpha}{\bar{A}}$. Natomiast dla $u < 0$ lub $u > \frac{1 - \alpha}{\bar{A}}$ mamy $\dot{u} > 0$. Gdy $0 < u < \frac{1 - \alpha}{\bar{A}}$, to $\dot{u} < 0$.

Wykorzystując z rozwiązania równania (3.19) to, że nie tylko dla $u = 0$ mamy $\dot{u} = 0$, lecz także dla $u = \frac{1 - \alpha}{\bar{A}}$, możemy uzyskać nową kombinację A i l stabilizującą

stopę przyrostu naturalnego. W tym celu podstawmy $u = \frac{1-\alpha}{A}$ do (3.16) i otrzymamy:

$$l = c^* A^{\frac{1}{1-\alpha}}, \quad \text{gdzie: } c^* = \bar{A}^{-1} \left(b - \frac{1-\alpha}{\bar{A}} \right)^{\frac{1}{\varepsilon(1-\alpha)}}. \quad (3.20)$$

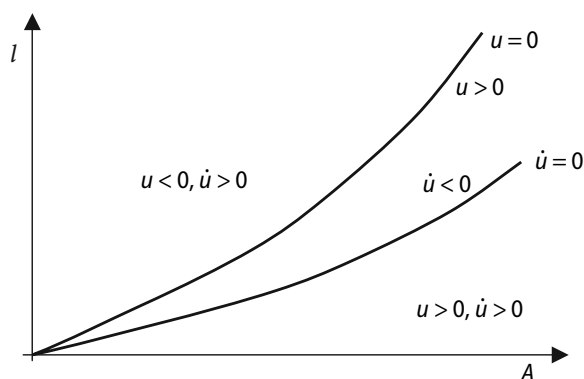
Ponieważ $c > c^*$, to wykres funkcji (3.20) jest położony poniżej wykresu funkcji (3.17). Na rysunku 3.3 linia $\dot{u} = 0$ przedstawia wszystkie kombinacje A i l , które utrzymują

stopę przyrostu naturalnego na poziomie $u = \frac{1-\alpha}{A}$, czyli poruszając się wzdłuż

niej, stopa zmiany przyrostu naturalnego jest równa zero ($\dot{u} = 0$). Wszystkie punkty

leżące pod linią charakteryzują się $u > \frac{1-\alpha}{A}$, co prowadzi do $\dot{u} > 0$. Natomiast

punkty pomiędzy liniami $\dot{u} = 0$ i $u = 0$ przedstawiają dynamikę $\dot{u} < 0$. Natomiast punkty nad linią $u = 0$ charakteryzują się $\dot{u} > 0$.

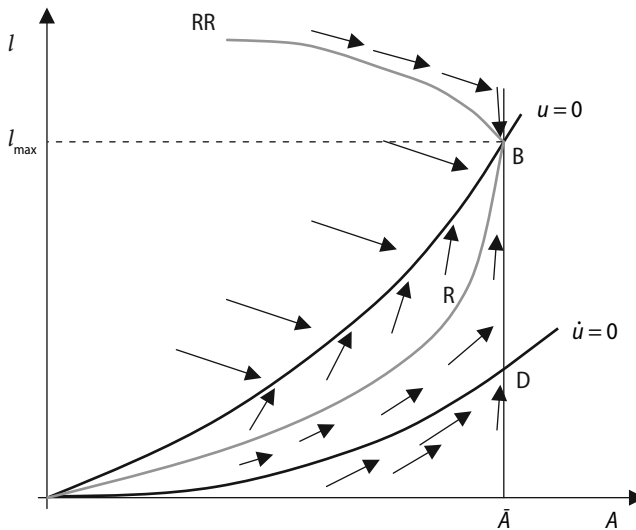


Rysunek 3.3. Obszary stopy zmiany przyrostu naturalnego

Informacje z rysunków 3.2 i 3.3 można umieścić na jednym rysunku (rys. 3.4) i wykorzystać do zanalizowania dynamiki postępu technicznego. W zależności od początkowego punktu (A_0, l_0) może wystąpić pięć wariantów ścieżek postępu technicznego i gęstości zaludnienia.

- 1) Gdy punkt początkowy znajduje się nad linią $u = 0$, to charakteryzuje się ujemną stopą przyrostu naturalnego ($u < 0$) oraz dodatnią stopą zmiany przyrostu naturalnego ($\dot{u} > 0$). Z tego wynika, że występuje dodatnia stopa przyrostu postępu

technicznego ($\dot{A} > 0$) oraz $\dot{l} < 0$. Przy czym stopa zmiany gęstości zaludnienia zmierza do zera. Z tego wynika, że startując z dowolnego punktu początkowego (A_0, l_0), system zmierza do punktu leżącego na linii $u = 0$ (ilustrują to strzałki umieszczone nad linią). Istotne jest jednak, czy wówczas poziom potencjału żywieniowego jest w pełni wykorzystany i lokalna społeczność w pełnym zakresie wykorzystuje możliwości uczenia się od ekosystemu, czy też ruch układu ustaje przy niepełnym wykorzystaniu potencjału żywieniowego. Linia RR rozdziela wszystkie punkty startowe leżące ponad linią $u = 0$, na dwa zbiory³⁹. Pierwszy zbiór stanowią punkty znajdujące się poniżej linii RR, które dają początek trajektoriom prowadzącym do stanu ustalonego charakteryzowanego przez $u = 0$ i $A < \bar{A}$, czyli poniżej potencjału żywieniowego. Natomiast drugi zbiór stanowią punkty leżące powyżej linii RR, które prowadzą do poziomu postępu technicznego odpowiadającego potencjałowi żywieniowemu przed dojściem do linii $u = 0$ (nastąpi zetknięcie z pionową półprostą \bar{A}). Wówczas przesuniemy się w dół wzdłuż pionowej linii \bar{A} do punktu B.



Rysunek 3.4. Dynamika postępu technicznego i gęstości zaludnienia

- 2) Drugi możliwy przypadek to gdy punkt początkowy leży na linii $u = 0$. Wówczas lokalna społeczność pozostanie w tym punkcie, gdyż na tej linii dla każdej kombinacji (A, l) zachodzi $\dot{u} = 0$, co implikuje $\dot{A} = 0$ i $\dot{l} = 0$.

³⁹ Formalne wykazanie istnienia takiej linii – patrz Aneks.

- 3) Trzeci przypadek to punkty początkowe leżące poniżej krzywej $\dot{u} = 0$. Stopa przyrostu naturalnego jest dodatnia i stale rośnie. Jest to wynik relatywnie silniejszego oddziaływania dynamiki postępu technicznego niż stopy przyro-

stu naturalnego – w tym przypadku mamy $\frac{\dot{A}}{A} > (1 - \alpha) \frac{\dot{l}}{l}$. Ale ten stały wzrost

odbywa się cały czas poniżej linii $\dot{u} = 0$, gdyż punkt startu jest dla $u > \frac{1 - \alpha}{A}$

i stopa przyrostu naturalnego stale rośnie, czyli cały czas znajdujemy się poniżej linii $\dot{u} = 0$. Czyli będziemy zmierzać do granicy potencjału żywieniowego \bar{A} poniżej punktu D. Gdy trafimy w tę granicę to, ponieważ nadal $u > 0$, rośnie gęstość zaludnienia i przesuniemy się ku górze do punktu D i następnie do punktu B.

- 4) Gdyby punkt początkowy znajdował się na linii $\dot{u} = 0$, czyli $\frac{\dot{A}}{A} = (1 - \alpha) \frac{\dot{l}}{l}$,

to będziemy się przesuwac wzdłuż tej linii do punktu D i następnie ku górze do B.

- 5) Ostatni przypadek zawiera punkty początkowe pomiędzy obydwoma liniami

rozgraniczającymi $u = 0$ i $\dot{u} = 0$. Charakteryzuje się on $0 < u < \frac{1 - \alpha}{A}$ oraz

$\dot{u} < 0$. Z tego wynika, że stopa postępu technicznego jest dodatnia ($\dot{A} > 0$) oraz stopa przyrostu naturalnego zmierza do zera. Zatem gdyby A mogło rosnać nieograniczenie, to punkt (A, l) , niezależnie od punktu startowego, znajdzie się ostatecznie na linii $u = 0$. Jednak postęp techniczny w naszym rozumieniu ma swój kres w postaci pełnego rozpoznania potencjału żywieniowego. Jest więc istotne, czy trajektoria punktu (A, l) trafia w linię potencjału żywieniowego i następnie ześlizguje się do punktu B, czy też osiąga linię $u = 0$, zanim dotrze do pełnego potencjału żywieniowego. Można wykazać⁴⁰, że zbiór punktów pomiędzy liniami rozgraniczającymi dzieli się na dwa podzbiory: punkty startowe, z których zawsze docieramy do linii $u = 0$, zanim zostanie osiągnięty pełny potencjał żywieniowy, oraz punkty startowe, które zapewniają trafienie w linię pełnego potencjału żywieniowego i dojście do punktu B. Na rysunku 3.4 linia R rozgranicza te dwa podzbiory.

Generalnie można wyróżnić dwa zbiory początkowych punktów startowych (A_0, l_0) . Pierwszy zbiór obejmuje punkty leżące pod krzywą R i nad RR. Startując

⁴⁰ Pełny dowód – patrz Aneks.

z tych punktów, lokalna społeczność zawsze zmierza do pełnego wykorzystania potencjału żywieniowego i tym samym możliwości stwarzanych przez postęp technologiczny. Punkty te charakteryzują się relatywnie dalekim położeniem od linii $u = 0$. Czyli mają albo relatywnie wysoką dodatnią (poniżej R), albo niską ujemną (powyżej RR) stopę przyrostu naturalnego. Inaczej mówiąc, są to społeczności lokalne charakteryzujące się albo wysokim potencjałem wzrostowym w zakresie liczby ludności, albo są to społeczności silnie zagrożone wymarciem.

Drugi zbiór obejmuje punkty leżące pomiędzy liniami RR i R. Start z tych punktów zawsze prowadzi do niepełnego wykorzystania potencjału żywieniowego. Ich cechą jest relatywnie mniejsza odległość do linii $u = 0$, czyli są mniej odchylone od zerowej stopy przyrostu naturalnego. Społeczności te mają zatem niewielki potencjał wzrostowy (punkty pomiędzy linią R a linią $u = 0$) lub są zagrożone w mniejszym stopniu wymarciem (punkty pomiędzy RR a $u = 0$).

Istotna jest również druga obserwacja. Postęp techniczny wcale nie musiał mieć charakteru stale postępującego procesu, aż do pełnego wykorzystania jego możliwości w miarę wzrostu gęstości zaludnienia. Mogły mieć miejsce przypadki, że rosnąca gęstość zaludnienia prowadziła do postępu technicznego, jednak lokalna społeczność mogła utracić dynamizm w wyniku spadku do zera stopy przyrostu naturalnego przed rozpoznaniem wszystkich możliwości ekosystemu. W takiej sytuacji dynamiczne społeczności lokalne, o początkowo wysokiej stopie przyrostu naturalnego, niezależnie od tego, czy na danym terenie gęstość zaludnienia była niska czy wysoka, miały szansę w pełni rozwinąć technikę. Jednak te mniej dynamiczne, o niższej stopie przyrostu naturalnego, mimo nawet wysokiej gęstości zaludnienia na danym terenie, mogły osiągnąć niższy poziom rozwoju technicznego.

Uchylmy założenie o niezmienności zasobów ekosystemu. Chodzi o zmienność zasobów ekosystemu, którą może spowodować działalność człowieka, który poszukuje dóbr pośrednich, aby przekształcić je w pożywienie. Zakładamy zatem, tak jak w poprzednim rozdziale, że bez obecności ludzi w lokalnym ekosystemie charakteryzuje się on stabilnym poziomem swoich zasobów, to znaczy przyroda odtwarza bez problemu wszystko to, co zużyło się w naturalny sposób wyniku upływu czasu. Pojawienie się ludzi w lokalnym ekosystemie powoduje wzrost jego zużycia ponad naturalny poziom wyznaczony przez upływ czasu. Ludzie pozyskują dobra pośrednie wprost z surowych elementów ekosystemu. Po dodaniu pracy dobra pośrednie przekształcane są w finalne dobra konsumpcyjne. Wolumen zużytego środowiska Z_p jest zatem dokładnie równy odkrytym i pozyskanym dobrom pośrednim:

$$Z_p = \bar{x}A, \quad A \leq \bar{A}. \quad (3.21)$$

Z (3.21) jednoznacznie wynika, że dynamika zużywania ekosystemu dokładnie pokrywa się z dynamiką odkrywania jego poszczególnych składników (dla stałej wartości \bar{x}).

Odnawiany ułamek ekosystemu oznaczmy $\delta \equiv \frac{Z_p}{Z}$. Natomiast δ_{\max} jest maksymalną częścią ekosystemu, jaką przyroda jest w stanie odnowić. Załóżmy, że ten maksymalny współczynnik odnowy jest stały. Oznaczmy przez γ współczynnik zużycia ekosystemu definiowany jako $\gamma \equiv \frac{Z_p}{Z}$, który można zapisać jako $\gamma = \frac{A}{\bar{A}}$.

Odnawianą część ekosystemu w każdym dowolnym momencie można wobec tego zapisać jako:

$$\delta Z = \begin{cases} \gamma Z, & Z_p < \delta_{\max} Z, \\ \delta_{\max} Z, & \delta_{\max} Z \leq Z_p \leq Z. \end{cases} \quad (3.22)$$

Ponieważ $Z = \bar{A}\bar{x}$ i $Z_p = A\bar{x}$, to wzór (3.22) możemy zapisać w postaci:

$$\delta \bar{A} = \begin{cases} \gamma \bar{A}, & A < \delta_{\max} \bar{A}, \\ \delta_{\max} \bar{A}, & \delta_{\max} \bar{A} \leq A \leq \bar{A}. \end{cases} \quad (3.23)$$

$\delta_{\max} \bar{A}$ jest liczbą odkrytych i zużytych elementów ekosystemu, które przyroda jest w stanie samodzielnie odtworzyć. Odkrywanie kolejnych jednostek ekosystemu jest możliwe w procesie *learning by doing*, jeśli $u \neq 0$. Jednak powoduje to, iż współczynnik zużycia przekroczy zdolność ekosystemu do reprodukcji i nastąpi spadek potencjału żywieniowego. Zatem zasoby ekosystemu stabilizują się, gdy zużycie nie przekroczy maksymalnej zdolności ekosystemu do odnowy. Zmianę zasobów ekosystemu w danym momencie t możemy zapisać jako różnicę odnowy i zużycia (korzystamy z tego, że $Z = A\bar{x}$)⁴¹:

$$\dot{\bar{A}} = \begin{cases} \delta \bar{A} - \gamma \bar{A} = 0, & \gamma \leq \delta_{\max}, \\ \delta_{\max} \bar{A} - \gamma \bar{A} < 0, & \gamma > \delta_{\max}. \end{cases} \quad (3.24)$$

Jeżeli $\delta_{\max} = 1$, to zawsze $\dot{\bar{A}} = 0$, czyli zasoby ekosystemu są stabilne. Naturalne zdolności ekosystemu do odnowy nie stanowią ograniczenia na ścieżce czasowej

⁴¹ Pomijamy przypadek $Z = 0$, dla którego również $\dot{Z} = 0$. Jest to przypadek, gdy zasoby ekosystemu nie istnieją. Nie jest to z tego względu przypadek wart rozpatrywania.

zmiennych (A, I). Wobec tego analiza sprowadza się do wyżej przeprowadzonej, opartej na założeniu niezmienności zasobów ekosystemu. Interesującym przypadkiem jest natomiast $\delta_{\max} < 1$. Ponieważ mechanizm odnowy oparty jest na naturalnym dążeniu ekosystemu do odtworzenia tego, co zostało zużyte, to kluczową kwestią jest bliższe rozpatrzenie ścieżki czasowej współczynnika zużycia, który jest determinowany przez działalność człowieka w lokalnym ekosystemie. Wykorzystując definicję współczynnika zużycia, można ustalić jego stopę zmiany:

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{\dot{A}}{A} - \frac{\dot{\bar{A}}}{\bar{A}} \right) \gamma. \quad (3.25)$$

Wykorzystując to, że dynamika potencjału żywieniowego jest równa $\frac{\dot{\bar{A}}}{\bar{A}} = \delta - \gamma$

(z równania (3.24)), równanie (3.25) można przekształcić do postaci:

$$\dot{\gamma} = \left[\frac{\dot{A}}{A} - (\delta - \gamma) \right] \gamma \geq 0. \quad (3.26)$$

Z dotychczasowej analizy wiemy, że dynamika postępu technicznego $\frac{\dot{A}}{A}$ (odkryć

kolejnych składników ekosystemu) może przybrać albo wartość zero dla $u = 0$, albo większą od zera dla $u \neq 0$. Natomiast różnica $\delta - \gamma$ może być równa zero, gdy $\delta = \gamma \leq \delta_{\max}$ lub mniejsza od zera, gdy $\delta = \delta_{\max} < \gamma$. Z tego wynika, że wyrażenie w nawiasie kwadratowym nigdy nie jest ujemne. To oznacza, że stopa zmiany współczynnika zużycia również nigdy nie jest ujemna⁴² ($\dot{\gamma} \geq 0$). A to z kolei oznacza, że współczynnik zużycia albo jest stały (dla $\dot{\gamma} = 0$), albo rośnie (dla $\dot{\gamma} > 0$).

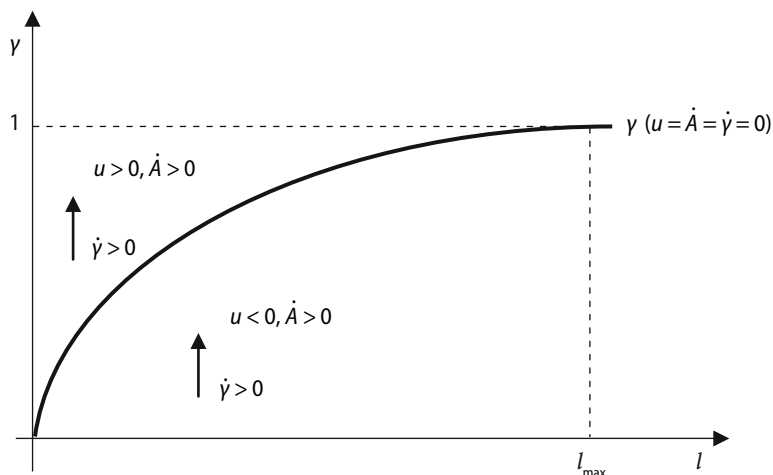
Poprzez odwrócenie funkcji (3.17) można ustalić zależność A od I , gdyby lokalna społeczność osiągnęła swój stan ustalony ($u = 0$, co implikuje $\dot{A} = 0$):

$$A = \left(\frac{I}{c} \right)^{1-\alpha}. \quad (3.27)$$

Wykorzystując (3.27), można opisać współczynnik zużycia ekosystemu w funkcji gęstości zaludnienia dla wszystkich możliwych stanów ustalonych:

⁴² Przyjmujemy, że jeśli ekosystem jest zasiedlony, to współczynnik zużycia zawsze spełnia warunek $\gamma > 0$.

$$\gamma(l) = \frac{\left(\frac{l}{c}\right)^{1-\alpha}}{\bar{A}} \leq 1. \quad (3.28)$$



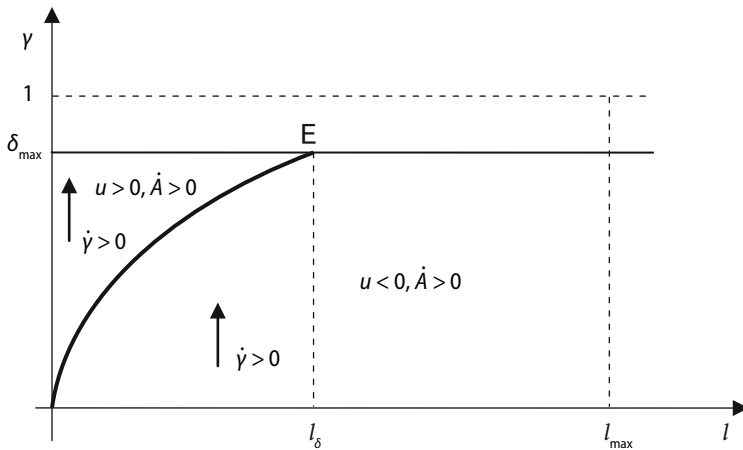
Rysunek 3.5. Współczynnik zużycia ekosystemu

Opis: l_{\max} oznacza gęstość zaludnienia osiągniętą przy pełnym wykorzystaniu potencjału żywieniowego w stanie ustalonym (punkt B na rysunku 3.4).

Na rysunku 3.5 zostały przedstawione wszystkie możliwe kombinacje punktów (l, γ) . Linia γ jest wykresem funkcji (3.28), czyli przedstawia współczynnik zużycia dla różnych poziomów gęstości zaludnienia przy stałym poziomie potencjału żywieniowego (\bar{A}), gdy równocześnie stopa przyrostu naturalnego jest równa $u = 0$, co implikuje stabilizację odkrytej liczby elementów ekosystemu ($\dot{A} = 0$). Linia γ dzieli punkty (l, γ) na dwa zbiory. Pierwszy leży ponad linią γ – charakteryzuje się $u > 0$ i w konsekwencji $\dot{A} > 0$, co prowadzi do wzrostu eksploatacji ekosystemu i tym samym do wzrostu współczynnika zużycia (ilustruje to strzałka pionowa skierowana ku górze) oraz do wzrostu ludności w danym regionie. Drugi zbiór obejmuje punkty położone pod linią γ , gdzie $u < 0$, co prowadzi również do $\dot{A} > 0$ i wzrostu współczynnika zużycia ekosystemu (strzałka ku górze) przy równoczesnym spadku liczby ludności w danym regionie.

Wzajemne oddziaływanie naturalnej zdolności ekosystemu do odnowy i jego zużycia w wyniku działalności odkrywczej człowieka rozstrzyga ostatecznie o dynamice potencjału żywieniowego. Na rysunku 3.6 linia δ_{\max} stanowi górny pułap współczynnika odnowy. Zgodnie z równaniem (3.24) stabilizacja ekosystemu

wymaga, aby maksymalny współczynnik odnowy nie był wyższy od współczynnika zużycia. Ten ostatni natomiast powinien ustabilizować się na stałym poziomie ($\dot{\gamma} = 0$), co dodatkowo wymaga, aby stopa postępu technicznego była równa zero ($\dot{A} = 0$, zgodnie z równaniem (3.26)). Wszystkie punkty (l, γ) leżące na linii γ od zera do punktu E włącznie spełniają ten warunek. Natomiast wszystkie pozostałe już nie⁴³. Przy czym odmienną charakterystykę mają te leżące pod linią δ_{\max} od tych umiejscowionych nad nią. Te leżące pod linią δ_{\max} charakteryzują się chwilową równością stopy odnowy i zużycia. Ponieważ jednak stopa urodzeń jest różna od zera, to postęp techniczny rośnie ($\dot{A} > 0$), co powoduje dalszy wzrost współczynnika zużycia, aż do osiągnięcia jego górnego kresu δ_{\max} . Gdy już jesteśmy na linii δ_{\max} (ale poza punktem E) bądź odrobinę ponad nią, to presja na wzrost współczynnika zużycia nasila się, gdyż dodatkowo pojawia się $\gamma \geq \delta_{\max}$. Czyli na linii δ_{\max} zużycie jest co prawda jeszcze równe odnowie, lecz $u \neq 0$ implikuje taki wzrost zużycia, że system traci zdolność do samoodnowy. Natomiast w obszarze ponad linią δ_{\max} współczynnik zużycia ekosystemu jest tak wysoki, że oznacza to niezdolność ekosystemu do odnowy. Musi to w ostateczności prowadzić do kurczenia się ekosystemu rozumianego jako potencjał żywieniowy ($Z = \bar{A}\bar{x}$). To z kolei prowadzi do zmniejszenia ilości dostępnych składników ekosystemu zgodnie ze wzorem $A_{\delta} = \delta_{\max}\bar{A}$, aż do ich całkowitego zaniku.



Rysunek 3.6. Dynamika ekosystemu

⁴³ Na rysunku 3.6 nie jest pokazany fragment linii γ powyżej δ_{\max} , gdyż po przekroczeniu δ_{\max} zaczyna zmieniać się również potencjał żywieniowy. To powoduje, że współczynnik zużycia zależy zarówno od gęstości zaludnienia, jak i od potencjału żywieniowego. Uniemożliwia to wykreślenie przebiegu linii γ na płaszczyźnie (l, γ) powyżej δ_{\max} .

Gdy dynamikę ekosystemu połączymy z dynamiką ludności i postępu technicznego, otrzymamy ostateczny kierunek ewolucji lokalnej społeczności. Poszukujemy ścieżki zmierzającej do stanu ustalonego. Przez stan ustalony będziemy rozumieć równoczesną stabilizację gęstości zaludnienia i zasobów ekosystemu. Aby to było spełnione, równocześnie muszą być spełnione warunki:

$$b - h(A, l) = z, \quad (3.29)$$

$$\gamma \leq \delta_{\max}, \quad (3.30)$$

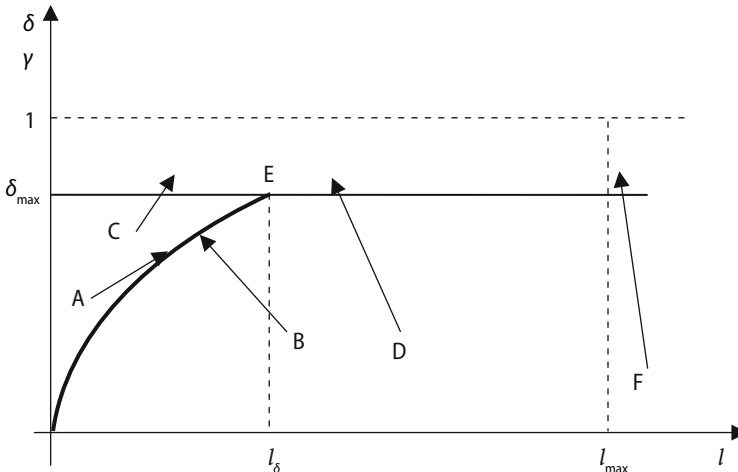
$$b = h(A, l). \quad (3.31)$$

Spełnienie równania (3.29) oznacza stabilizację gęstości zaludnienia: stopa przyrostu naturalnego musi równać się dynamice ekosystemu. Aby ekosystem był na stałym poziomie, to $z = 0$, czyli współczynnik zużycia nie może przekroczyć maksymalnego współczynnika odnowy (równanie (3.30)). Z kolei aby dynamika ekosystemu była trwale równa zero, to współczynnik zużycia nie może rosnać. A to zachodzi tylko dla $u = 0$, gdy ustaje proces odkrywania kolejnych składników ekosystemu (równanie (3.31)). Szukamy zatem takiej pary (A, l) , która spełni te wszystkie warunki.

Gdy ekosystem ma zdolność do odtworzenia każdego możliwego zużycia ($\delta_{\max} = 1$), to zawsze $z = 0$ i znalezienie rozwiązania upraszcza się do wcześniej analizowanych wzajemnych oddziaływań postępu technicznego i dynamiki gęstości zaludnienia. Przypadek ten wydaje się jednak mało prawdopodobny. Nie spotykamy ekosystemów, które zużyte w całości potrafią się odtworzyć do stanu wyjściowego. Jako typowy trzeba przyjąć przypadek, gdy $\delta_{\max} < 1$. Wówczas możliwe ścieżki ewolucji lokalnych społeczności możemy wyznaczyć graficznie (rys. 3.7).

Gdyby punkty początkowe znajdowały się poniżej linii γ i δ_{\max} , to charakteryzowałyby się $u < 0$ i powodowałyby to wzrost współczynnika zużycia ($\dot{\gamma} > 0$). Znajdą się jednak poniżej maksymalnej zdolności do odnowy. Ekosystem będzie zatem w stanie się odtworzyć i jego rozmiar pozostanie stabilny. Ponieważ jednak liczba ludności spada, a ekosystem jest stabilny, to gęstość zaludnienia spadnie. Zatem w przestrzeni (l, γ) ruch odbywa się po skosie na lewo w kierunku linii γ . Jeżeli jednak punkty startowe będą odpowiadały punktom z obszaru nad linią RR z rysunku 3.4, czyli charakteryzującym się niską ujemną stopą przyrostu naturalnego (silnie zagrożone wymarciem) i stąd silna presja na dynamizowanie postępu technicznego prowadzącego do dynamicznego wzrostu współczynnika zużycia (graficznie wyraża to silna stromizna strzałki obrazującej ruch), to wcześniej czy później lokalna społeczność trafi na barierę samoodnowy ekosystemu (na rys. 3.7

ścieżkę taką ilustruje strzałka wychodząca z punktu F). Znajdując się na linii δ_{\max} , nadal $u < 0$. Zatem współczynnik zużycia nadal rośnie w wyniku kolejnych odkryć i w konsekwencji przekracza δ_{\max} . Lokalna społeczność wchodzi w obszar trwałej przewagi współczynnika zużycia nad współczynnikiem odnowy ($\gamma > \delta_{\max}$). Gdyby natomiast punkty początkowe odpowiadały punktom z obszaru pomiędzy liniami RR a $u = 0$ (rys. 3.4), czyli charakteryzującym się relatywnie niewielką ujemną stopą przyrostu naturalnego (mniej zagrożone wymarciem) i stąd mniejsza presja na dynamizowanie postępu technicznego prowadzącego do mniejszego wzrostu współczynnika zużycia (graficznie wyraża to większe spłaszczenie strzałki obrazującej ruch), to lokalna społeczność albo trafiłaby na barierę samoodnowy ekosystemu (na rys. 3.7 ścieżkę taką ilustruje strzałka wychodząca z punktu D), albo trafiłaby w punkt na linii γ (wyjście z punktu B). W tym ostatnim przypadku wszystkie warunki stabilizacji lokalnej społeczności są spełnione, czyli zachodzi $u = 0$ i $\gamma = \delta \leq \delta_{\max}$. Osiągnięty stan ustalony charakteryzuje się wykorzystaniem ekosystemu poniżej potencjału żywieniowego. W szczególnym przypadku można trafić w punkt E i wówczas stan ustalony w całości wyczerpuje naturalne możliwości odnowy ekosystemu ($A \leq A_{\delta} < \bar{A}$). Gdyby jednak zaszedł przypadek dojścia do linii δ_{\max} , to, ponieważ $u < 0$, współczynnik zużycia przekroczyłby współczynnik odnowy, co doprowadziłoby do kurczenia się potencjału żywieniowego i spadku żywności na mieszkańca.



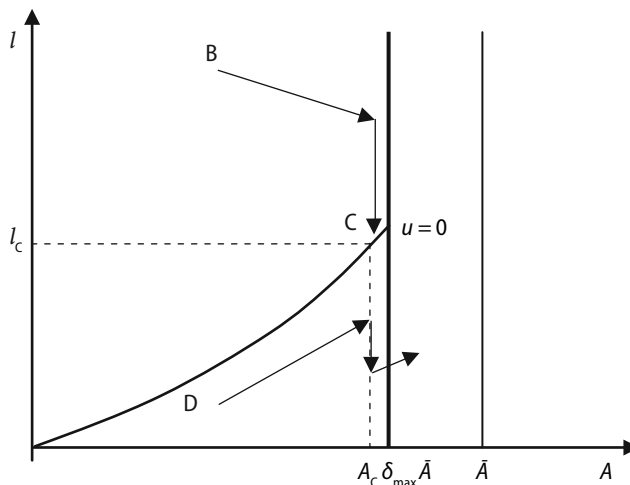
Rysunek 3.7. Możliwe kierunki ewolucji lokalnych społeczności w warunkach postępu technicznego

Punkty początkowe mogą również znaleźć się ponad linią γ i pod δ_{\max} . Te punkty startowe charakteryzują się $u > 0$ i $\dot{\gamma} > 0$, ekosystem jest stabilny, gdyż zachowuje pełną zdolność do odnowy zużytych składników. Wzrośnie więc gęstość zaludnienia przy równoczesnym postępie technicznym prowadzącym do coraz wyższego zużycia ekosystemu. Ruch punktów (l, γ) odbywa się po skosie na prawo w kierunku linii γ . Punkty początkowe z analizowanego obszaru odpowiadają punktom pod krzywą $u=0$ z rysunku 3.4. Gdyby były to punkty z pola pod krzywą R, to charakteryzowałyby się relatywnie wysokimi stopami przyrostu naturalnego, który tworzyłby presję na wysoki dynamizm postępu technicznego i tym samym wysoką dynamikę zużywania ekosystemu. Lokalna społeczność relatywnie szybko zmierzałaby do zagospodarowania całego potencjału żywieniowego ekosystemu. Nie kierowałaby się ku linii γ . Zatem nieuchronnie musiałaby trafić w linię δ_{\max} , co wywołałoby mechanizm kurczenia ekosystemu. Natomiast gdyby były to punkty odpowiadające obszarowi pomiędzy krzywymi $u=0$ a R z rysunku 3.4, końcowy wynik ścieżki nie byłby jednoznaczny. Im wyższa jest zdolność do naturalnej odnowy i im niższa jest stopa przyrostu naturalnego (punkt A), tym większe szanse na trafienie w linię γ i osiągnięcie stanu ustalonego z niepełnym wykorzystaniem potencjału żywieniowego (w szczególnym przypadku społeczność może osiągnąć punkt E). W przeciwnym wypadku (niższa zdolność do odnowy i w miarę wysoka stopa przyrostu naturalnego) społeczność osiągnęłaby linię δ_{\max} i uruchomiony zostałby mechanizm kurczenia potencjału żywieniowego (początkowy punkt C).

W szczególnym przypadku, gdyby punkty początkowe znajdowały się na linii δ_{\max} (oprócz punktu E) lub ponad nią w dowolnym miejscu, lokalna społeczność od razu zmierzałaby do zmniejszenia zasobów ekosystemu.

Rozważmy przebieg procesów dostosowawczych po przekroczeniu przez daną społeczność bariery samoodnowy ekosystemu. Kluczowe znaczenie w wyjaśnieniu ścieżki, po jakiej porusza się lokalna społeczność, ma dynamika potencjału żywieniowego. Przekroczenie zdolności do samoodnowy środowiska naturalnego oznacza wejście na ścieżkę trwałej destrukcji ekosystemu (wzór 3.26). Początkowo, po przekroczeniu zdolności do samoodnowy, gdy $A < \bar{A}$, nadal odkrywane są nowe składniki ekosystemu. To powoduje, że współczynnik zużycia rośnie. Równoległe trwa proces kurczenia się całego potencjału żywieniowego, gdyż nie jest on w stanie odnowić wszystkich zużytych składników. Wcześniej czy później musi nastąpić $A = \bar{A}$, czyli cały istniejący ekosystem zostaje poznany i odkryty. Wówczas współczynnik zużycia osiąga swoją maksymalną wartość $\gamma = 1$. Z równania (3.26) dla $\gamma = 1$ wynika, że A i równe jej \bar{A} będą się kurczyły w tempie $\delta_{\max} - 1$. Wobec tego A nigdy nie spadnie poniżej $\delta_{\max} \bar{A}$. Ekosystem nigdy się nie ustabilizuje, zmierza do zagłady. Wcześniej czy później, w wyniku spadku potencjału żywieniowego,

zmniejszenie się ilości żywności spowoduje pojawienie się $u < 0$. Ludność w danym regionie również zmierza do wymarcia. Taka dynamika lokalnej społeczności wystąpi niezależnie od tego, czy w momencie przekroczenia bariery samoodnowy ekosystemu stopa przyrostu naturalnego była dodatnia czy ujemna. Istotne jest również to, że migracja części lokalnej społeczności na sąsiednie tereny nie powstrzymuje kurczenia się ekosystemu, gdyż nie zmienia tempa zmniejszania się zasobów ekosystemu równego $\delta_{\max} - 1$. Taka migracja części lokalnej społeczności mogłaby przywrócić równowagę tylko w przypadku, gdyby została podjęta przed osiągnięciem bariery samoodnowy ekosystemu i wyłącznie w przypadku, gdyby punkty startowe charakteryzowały się $u < 0$. Na rysunku 3.8 ilustruje ten przypadek punkt startowy B. Gdyby na przykład przy poziomie techniki $A_c < \delta_{\max} \bar{A}$, część lokalnej społeczności wyemigrowała na sąsiednie tereny, w takim rozmiarze, że gęstość zaludnienia obniżyłaby się do poziomu l_c , który leży na linii równowagi $u=0$, to lokalna społeczność znalazłaby się w nowym stanie ustalonym. Zmniejszenie gęstości zaludnienia prowadzi do zwiększenia ilości żywności przypadającej na mieszkańca i równocześnie obniżenia współczynnika umieralności do poziomu stopy urodzeń. Dzięki temu stopa przyrostu naturalnego jest równa zero i przywrócona zostaje równowaga we wzajemnym oddziaływaniu ekosystemu i ludności. Ruch migracyjny musi jednak mieć miejsce, zanim ekosystem, który zamieszkuje lokalna społeczność, utraci zdolność do samoodnowy.



Rysunek 3.8. Migracja, która ma miejsce, zanim ekosystem utraci zdolność do samoodnowy

Opis: Przy poziomie techniki $A_c < \delta_{\max} \bar{A}$ ma miejsce migracja części lokalnej społeczności.

Punkt startowy D znajduje się w obszarze dodatniego przyrostu naturalnego. Gdyby migracja nastąpiła również przy technice A_c , to, w przeciwieństwie do poprzedniej sytuacji, nastąpiłoby oddalenie od linii równowagi $u=0$. Ilustruje to strzałka skierowana pionowo w dół wzdłuż linii techniki A_c . Zmniejszenie gęstości zaludnienia generuje wzrost ilości żywności i podnosi stopę przyrostu naturalnego. To powoduje dalszy wzrost postępu technicznego i nieuchronne przekroczenie bariery samoodnowy ekosystemu. Lokalna społeczność nie odzyskuje równowagi w wyniku cząstkowej migracji.

Lokalna społeczność, aby przetrwać, ma dwa wyjścia. Może dobrowolnie zrezygnować z takiej części używanej technologii, aby zużycie spadło co najmniej do poziomu $\delta_{\max} \bar{A}$. Przy czym, aby wówczas zużycie ustabilizowało się na stałym poziomie, równocześnie stopa przyrostu naturalnego musi być równa zero. W przeciwnym wypadku zużycie ponownie rośnie i ekosystem traci zdolność do samoodnowy. Czyli dobrowolna rezygnacja z części składników ekosystemu, i tym samym z technik łowieckich, nie zapewnia ustabilizowania ekosystemu. Dlatego też ten sposób przeciwdziałania degradacji środowiska, ze względu na nieprzewidywalność wyniku, raczej nie był wybierany przez lokalne społeczności. Mógł być wybierany raczej w społecznościach lokalnych, które znalazły się w izolacji⁴⁴.

Drugim sposobem jest opuszczenie danego regionu przez całą lokalną populację i przeniesienie się w bardziej przyjazne środowiska przyrodnicze. Dzięki temu pojawiała się szansa na zregenerowanie się ekosystemu, a lokalna społeczność mogła przetrwać w innych warunkach środowiskowych. Przy ówczesnej technologii, bazującej na poznawaniu składników ekosystemu i opracowywaniu sposobów ich zdobywania, gromadzenia i przetwarzania, wędrowny styl życia był najlepszym sposobem na przetrwanie. Równowaga między dynamiką populacji a dynamiką ekosystemu była w tamtym okresie dosyć krucha. Jednak dzięki otwartości ekosystemów lokalne społeczności mogły przetrwać mimo napotykania na miejscowe degradacje środowiska naturalnego⁴⁵. Wędrować mogły w całości lub dzieląc się na mniejsze grupy.

Takie naruszenie równowagi między populacją ludzi a ekosystemem może być wytłumaczeniem dla faktu, że stosunkowo niewielka początkowo populacja ludzi (kilka tysięcy osobników) rozproszyła się w przeciagu niespełna 50–60 tys.

⁴⁴ Być może to tłumaczy regres techniczny zaobserwowany wśród plemion zamieszkujących Tasmanię. Gdy Tasmania oddzieliła się od stałego lądu i stała się wyspą, pojawiło się zagrożenie, że ekosystem utraci zdolność do samoodnowy. Być może, aby przetrwać, musiały zrezygnować z szeregu technik łowieckich.

⁴⁵ Lokalne społeczności żyjące w zamkniętych ekosystemach, jeśli dobrowolnie nie ograniczyły składników diety, musiały wyginąć.

lat po wszystkich kontynentach (oprócz Antarktydy). Termin „rozproszenie” jest zdecydowanie trafnym określeniem wędrówek, jakie ludzie odbywali w paleolicie. Nie były to intencjonalne wyprawy mające na celu eksplorację odległych, nieznanymi obszarów. Raczej było to wymuszone poznawanie nowych możliwości ekologicznych w sąsiednich regionach. Przede wszystkim gdy lokalne grupy charakteryzowały się ujemnym przyrostem ludności, to naturalną obroną przed zagładą było wcześniejsze opuszczenie danego środowiska, nie czekając, aż ekosystem utraci zdolność do samoodnowy. Wówczas dla części społeczności, która pozostała na miejscu, równowaga we wzajemnym oddziaływaniu ekosystemu i ludności mogła zostać przywrócona, a ta społeczność, która wywędrowała, szukała możliwości osiedlenia się na obszarze, w którym taka równowaga mogłaby być zachowana. W ten sposób powiększał się zasięg opanowywanych terytoriów. Gdy pojawiało się zagrożenie, że dany ekosystem utraci zdolność do samoodnowy i lokalna społeczność musiała zdecydować się na migrację w nowe regiony, to w tym nowym miejscu mogła trafić na cztery możliwości. Po pierwsze, biorąc pod uwagę rys. 3.8, przypadkowo mogła od razu trafić w linię równowagi $u=0$ i wtedy postęp techniczny oraz gęstość zaludnienia natychmiast ustabilizowały się. Po drugie, mogła znaleźć się na obszarze o relatywnie gorszych warunkach niż region wyjściowy i była wówczas zmuszona do dalszej wędrówki. Po trzecie, region, do którego przybywała grupa, mógł charakteryzować się takimi warunkami, że – przy istniejącej liczebności grupy oraz posiadanej przez nią wiedzy technicznej, stopie urodzeń i elastyczności zgonów względem poziomu żywności – nowy punkt startowy mógł znaleźć się poniżej linii równowagi $u=0$, czyli lokalna społeczność ponownie mogła powiększać swoją populację i zwiększać postęp techniczny aż do momentu, gdy trafiłaby w linię równowagi. Wówczas ruch ustalby lub zostałyby przekroczone bariery samoodnowy ekosystemu. W takiej sytuacji społeczność ponownie musiałaby szukać nowych terytoriów, migrując w całości lub dzieląc się na mniejsze grupy migracyjne. Po czwarte, w nowym regionie grupa mogła się znaleźć powyżej linii równowagi, czyli warunki mogły być na tyle niesprzyjające, że punkt startowy charakteryzowałby się ujemnym przyrostem naturalnym. To mogłoby skłonić grupę do zachowań opisanych wcześniej: część populacji mogłaby zostać (odzyskując równowagę), a część mogłaby dalej wędrować w poszukiwaniu sprzyjających warunków ekologicznych. Wszystkie opisane wyżej przypadki prowadziły do rozpraszania się lokalnych społeczności na coraz większe terytoria. Dzięki temu nawet niewielka początkowo populacja, o niewielkim przyroście naturalnym, mogła w niedługim czasie (z perspektywy epok historycznych) rozproszyć się po całym kontynencie, podzieliwszy się na grupy poszukujące sprzyjających środowisk ekologicznych.

Powyższy opis terytorialnego rozpraszania wskazuje, że sam postęp techniczny był zjawiskiem istotnie z nim powiązany. Pojawiając się w nowym obszarze, dana grupa posiadała ustaloną wiedzę o technice i charakteryzowała się określoną stopą urodzeń oraz elastycznością zgonów względem ilości żywności przypadającej na mieszkańca. Te zmienne rozstrzygały, czy przy danym potencjale żywieniowym nowego regionu grupa znajdowała się od razu na linii równowagi ($u=0$), czy też była poza nią. Jeśli była poza nią, to stopa przyrostu naturalnego różna od zera wprawiała w ruch postęp techniczny. Powstawało sprzężenie zwrotne między wędrownym trybem życia a postępow technicznym. Wzrost postępu technicznego, który w efekcie powodował utratę zdolności przez ekosystem do samoodnowy, wymuszał migrację. Z kolei w wyniku migracji, przenoszenia się grup ludności w nowe regiony, tworzyły się punkty startowe do nowych zmian technologicznych.

Nie można jednoznacznie z góry powiedzieć, czy rozpraszanie się społeczności na kolejne terytoria prowadzi do jakiejś ogólnej równowagi, rozumianej jako wyrównanie poziomu życia pomiędzy wszystkimi regionami⁴⁶ dla $u=0$. Wówczas ruch ludności ustalby i postęp techniczny ustabilizowałby się na stałym poziomie, chociaż zróżnicowanym pomiędzy regionami, i spełniałby warunek $A \leq \delta_{\max} \bar{A}$. Gdyby przyjąć założenie, że wszystkie lokalne społeczności charakteryzują się takimi samymi parametrami demograficznymi (stopa urodzeń, współczynnik elastyczności zgonów względem poziomu żywności) i dynamiki wynalazków (współczynnik intensywności postępu technicznego) oraz uporządkować wszystkie dostępne regiony od najwyższego potencjału żywieniowego do najniższego, to gdyby pojawiła się grupa naruszająca równowagę w najlepszym ekosystemie, to migrując do kolejnych gorszych, zawsze by ją naruszała. Nie byłoby możliwe osiągnięcie globalnej równowagi między regionami. Lokalna społeczność, wędrując od regionu do regionu, musiałaby w końcu wymrzeć. *Homo sapiens* zniknąłby bezpowrotnie. Migracje nie mogły mieć takiego jednokierunkowego przebiegu. Mogły się rozpoczynać zarówno w regionach relatywnie gorszych i kierować do lepszych, jak również mogła zaistnieć sytuacja odwrotna. Jednak kluczowym faktem była bardzo niska przeciętna stopa przyrostu naturalnego w okresie paleolitu⁴⁷, czyli społeczności lokalne poruszały się bardzo blisko linii równowagi $u=0$. Wędrowny tryb życia, wynikający z technik pozyskiwania żywności, ograniczał

⁴⁶ Dążenie do takiej równowagi w okresie przedagrarnym zakładają Gregory K. Dow, Clyde G. Reed. Zob. G.K. Dow, C.G. Reed, *Stagnation and innovation before agriculture*, „Journal of Economic Behavior & Organization” 2011, vol. 77, no. 3.

⁴⁷ Według M. Livi-Bacciego średnioroczna dynamika nie przekraczała 0,01%. Zob. M. Livi-Bacci, *op.cit.*, s. 25–28.

stopę urodzeń. Można zatem przyjąć, że typowym zjawiskiem było osiągnięcie równowagi zanim została naruszona bariera samoodnowy ekosystemu. Migracje występowały raczej sporadycznie, gdy lokalne warunki sprzyjały albo wysokiemu przyrostowi naturalnemu, albo powodowały ujemny przyrost i wzbudzony w ten sposób postęp techniczny prowadził do naruszenia bariery samoodnowy ekosystemu. Emigrując, lokalne społeczności mogły się dzielić na mniejsze zbiorowości poszukujące odpowiednich obszarów łowieckich. Takie małe grupy miały większe szanse na znalezienie dla siebie odpowiednich terenów. Ich zmniejszona liczebność relatywnie obniżała gęstość zaludnienia w nowym regionie. Dzięki temu można było uzyskać względnie wysoki poziom ilości żywności przypadającej na mieszkańca, szczególnie w rejonach charakteryzujących się gorszym potencjałem żywieniowym. Miało to znaczenie szczególnie wtedy, gdy grupy migrowały z obszarów, w których przekroczyły barierę samoodnowy ekosystemu przy ujemnym przyroście naturalnym. Nawet w przypadku gdy przekroczyły barierę samoodnowy ekosystemu przy dodatnim przyroście naturalnym, podział na małe grupy migracyjne mógł ułatwiać znalezienie się w pobliżu linii równowagi w nowym terenie, gdyby grupa trafiła na region o gorszym potencjale żywieniowym. Gdyby był to region o większym potencjale, oczywiście grupa byłaby relatywnie bardziej oddalona od linii równowagi i być może ponownie przekroczyłaby barierę samoodnowy ekosystemu. Zmusiłoby to ją do ponownej migracji. W swojej dalszej wędrówce mogłaby trafić na lepszy bądź gorszy potencjał żywieniowy. W takich kolejnych rundach swoich wędrówek, gdy mamy do czynienia z otwartymi ekosystemami, grupa społeczna mogłaby wreszcie trafić w pobliże linii równowagi i po pewnym czasie ostatecznie ją osiągnąć. Teoretycznie można sobie wyobrazić, że taka grupa jest „wiecznym wędrowcem”. W kolejnych napotkanych regionach zawsze przekracza barierę samoodnowy ekosystemu i w końcu wymiera, nie mogąc znaleźć odpowiedniego środowiska przyrodniczego. Jednak w rzeczywistości wydaje się to wielce nieprawdopodobne ze względu na bardzo niską stopę przyrostu naturalnego oraz relatywnie ogromną liczbę dostępnych nowych terenów. Wydaje się zatem mało prawdopodobne, aby stopa przyrostu naturalnego cały czas utrzymywała na tyle daleko od linii równowagi $u=0$, by dynamika postępu technicznego stale naruszała samoodnowę ekosystemu. Zatem sensowne jest przyjęcie założenia, że wcześniej czy później sporadycznie pojawiające się migracje, wywołane koniecznością zmiany terytorium, wygasają z powodu znalezienia się przez lokalną społeczność na linii równowagi $u=0$.

Powyższa analiza prowadzi do dwóch istotnych konkluzji. Po pierwsze, postęp techniczny, w początkowych fazach dziejów ludzkości, był silnie motywowany biologicznie, tzn. miał służyć, poprzez poszerzenie diety, zapewnieniu wyżywienia

dynamicznie rozwijającym się społecznościom, bądź przeciwdziałać głodowi w społecznościach zagrożonych wymarciem. Zatem siłą wprawiającą w ruch postęp techniczny była dynamika ludności. Gdy przyrost naturalny równał się zero, dzięki czemu stabilizowała się liczba ludności, to postęp techniczny wygasł. Aby dynamizować postęp techniczny, wymagana była destabilizacja liczby ludności. To z kolei, wprawiając w ruch postęp techniczny, mogło naruszać równowagę przyrodniczą, która z kolei destabilizowała dynamikę ludności. Zatem typowym warunkiem wzbudzania postępu technicznego była nierównowaga ludnościowa. Natomiast warunkiem stabilności ekosystemu jest ustabilizowany poziom techniki. Poziom techniki, liczba ludności, zasoby ekosystemu – znajdując się na stabilnym poziomie (w równowadze) – zatrzymują ruch sytemu ku wyższemu poziomowi żywności. Zatem nierównowaga między ludnością a ekosystemem była niezbędnym warunkiem, aby postęp techniczny mógł zaistnieć.

Po drugie, jeśli pojawiał się postęp techniczny, to generował on różnorodne ścieżki ewolucji lokalnych społeczności. Nie było jednolitego schematu wpływu postępu technicznego na ewolucję ludzkości. Generalnie te ścieżki można podzielić na dwie grupy.

Pierwsza to ścieżka prowadząca do długookresowej równowagi lokalnej społeczności (punkt na krzywej γ). Ta równowaga była równoznaczna ze stagnacją, tzn. liczba ludności i poziom postępu technicznego stabilizowały się na stałym poziomie. Odpowiada to stagnacyjnym społecznościom scharakteryzowanym w poprzednim rozdziale. Jedyna różnica to tylko to, że po dodaniu postępu technicznego w stagnacji znajduje się nie tylko poziom ludności, lecz także poziom techniki. Jeśli przyrodnicze uwarunkowania nie zmieniały się, stagnacyjne lokalne społeczności mogły w takiej równowadze funkcjonować przez dowolny odcinek czasu⁴⁸. Społeczności te charakteryzowały się względnie niskim (wysokim) dodatnim (ujemnym) przyrostem naturalnym. Ponieważ dynamika postępu technicznego zależy od przyrostu naturalnego, to przy niewielkiej zmianie liczby ludności postęp techniczny jest powolny i może nie wyczerpać potencjału żywieniowego w momencie osiągnięcia stanu równowagi. Lokalna społeczność znalazłaby się wówczas w równowadze, czyli poziom ludności byłby stały $u = \dot{u} = 0$, $\gamma = \delta \leq \delta_{\max}$ dopóty, dopóki nie zmieniłyby się warunki klimatyczne lub stopa przyrostu naturalnego. Ale równocześnie taka równowaga oznacza stały poziom stosowanej techniki. Bez wątplenia takie społeczności nie były źródłem postępu w dziejach ludzkości.

⁴⁸ Jeszcze obecnie społeczności stagnacyjne spotykamy w Ameryce Południowej, Afryce i na Nowej Gwinei.

Druga grupa to te społeczności, których funkcjonowanie powodowało utratę przez ekosystem zdolności do samoodnowy ($u \neq 0, \dot{u} \neq 0, \gamma > \delta_{\max}$). Społeczności te charakteryzowały się względnie wysokim i dodatnim lub niskim i ujemnym przyrostem naturalnym. Zatem postęp techniczny przebiegał według relatywnie wysokiej dynamiki. Przekroczenie progu zdolności ekosystemu do reprodukcji prowadziło do regresu technologicznego i ostatecznie do wymarcia lokalnej społeczności, jeśli nie podjęła ona kroków zaradczych. Nie mogło to być dalsze wzbogacanie diety, gdyż to nie było już możliwe. Takim środkiem rozwiązującym problem była migracja całej lokalnej społeczności na nowe tereny. Takie społeczności nazwiemy, tak jak w poprzednim rozdziale, ekspansywnymi. Migracja w warunkach postępu technicznego miała istotną cechę: była równocześnie źródłem jego rozprzestrzeniania. Nie ulega wątpliwości, że nabyte umiejętności i wiedza były wykorzystywane na nowo zasiedlanych terenach.

Migracje w warunkach postępu technicznego mają odmienną formę niż opisane w poprzednim rozdziale migracje bez zmiany technicznej. Przede wszystkim obok możliwych wymuszonych fal cząstkowych migracji pojawia się konieczność migracji całej populacji. Dzięki temu opis zasiedlania coraz rozleglejszego terytorium stał się bardziej realistyczny. Migracje nie były zjawiskiem jednorodnym, które zachodziło poprzez pulsacyjne równomierne odpływy we wszystkich kierunkach. Raczej występowały sporadycznie, gdy zaistniały wymuszone przez środowisko warunki nierównowagi między ekosystemem a ludnością.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku lokalnych społeczności wytrąconych z równowagi na pewien czas (nie musiały migrować) postęp techniczny nie powodował trwałego wzrostu ilości żywności przypadającej na mieszkańca, lecz prowadził tylko do zwiększenia gęstości zaludnienia. Jeśli założymy, że lokalna społeczność w punkcie wyjścia znajduje się w równowadze (stopa przyrostu naturalnego równa zero) z poziomem żywności y_0 , techniki A_0 i gęstością zaludnienia l_0 , to gdyby w tym momencie nastąpiło wprawienie w ruch postępu technicznego ($u \neq 0$), to lokalna społeczność zmierzałaby do gęstości zaludnienia l^* i poziomu technicznego A^* wyznaczonych w nowym punkcie równowagi dla stopy przyrostu naturalnego również równej zero. W tym nowym stanie ustalonym zachodzi $A^* \leq \delta_{\max} \bar{A}$ (dynamika lokalnych społeczności nie naruszyła bariery samoodnowy ekosystemu). Ponieważ zarówno gęstość zaludnienia, jak i postęp techniczny są ustalone, to również ilość żywności przypadającej na mieszkańca jest ustalona (oznaczymy ten poziom y^*). Jest to poziom, przy którym stopa zgonów zrównała się ze stopą urodzeń. Dopóki funkcja stopy zgonów pozostaje niezmienną, dopóty jej zrównanie ze stopą urodzeń ma miejsce zawsze przy tym samym poziomie ilości żywności przypadającej na mieszkańca, zatem $y^* = y_0$. Ostatecznie, postęp techniczny

umożliwia zmianę gęstości zaludnienia w danym regionie bez długookresowej poprawy poziomu życia. Inaczej mówiąc, postęp techniczny przekształca się w całości we wzrost gęstości zaludnienia według wskaźnika:

$$\frac{l^*}{l_0} = \left(\frac{A^*}{A_0} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}}. \quad (3.32)$$

Praktycznie podobny wniosek można wysnuć odnośnie społeczności migrujących, które w wyniku rozpraszania ostatecznie znajdowały środowisko, dzięki któremu mogły osiągnąć równowagę. Efektem migracji było ostatecznie znalezienie środowiska, w którym grupa mogła przetrwać na stabilnym poziomie ($u=0$). Poziom ilości żywności przypadającej na mieszkańca powracał do punktu wyjścia. Natomiast gęstość zaludnienia mogła wzrosnąć lub spaść. Wynik migracji był determinowany zasobnością ekosystemu, do którego trafiała migrująca grupa.

Zwróćmy również uwagę na fakt, że postęp techniczny nie jest zjawiskiem charakteryzującym się wyłącznie nieujemną dynamiką. Okresy dodatniego wzrostu mogą przeplatać się z regresem technologicznym, gdy kurczy się potencjał żywniowy w wyniku naruszenia równowagi ekosystemu i lokalne społeczności muszą zrezygnować z pewnych technik łowieckich, aby przetrwać.

Wreszcie ostatnią konkluzją może być obserwacja, że wprowadzenie postępu technicznego zmienia rozumienie roli ekspansywnych społeczności lokalnych w zaludnieniu naszej planety. Analiza dokonana w poprzednim rozdziale pokazała, że hipotetycznie, bez postępu technicznego, zasiedlić wszystkie terytoria mogła jedna lokalna społeczność poprzez ciągłe fale migracji, które zapobiegały utracie przez ekosystem zdolności do samoodnowy. Wprowadzenie postępu technicznego pokazuje, że migrująca ekspansywna społeczność ostatecznie zawsze dotrze do bariery samoodnowy ekosystemu na danym obszarze. W takiej sytuacji uruchamiane są mechanizmy regulujące i, wcześniej czy później, w społeczności zostaje przywrócony stan długookresowej równowagi ($u=0$). Wtedy migracje wygasają. Aby migracje ponownie się pojawiły, potrzebny jest jakiś czynnik, który zdynamizuje lokalne społeczności i wytrąci je ze stanów ustalonych. Do tego problemu powrócimy w rozdziale 5.

Rozdział 4

Okres przejściowy: od łowiectwa-zbieractwa do rolnictwa

Procesowi poszerzania palety spożywanych produktów towarzyszyło powstawanie załączków przyszłego rolnictwa, które całkowicie zmieniło metody pozyskiwania żywności. Pojawienie się rolnictwa, jak pokazują badania, było wynikiem relatywnie szybkich procesów, trwających raptem parę tysięcy lat (pomiędzy 11 000 a 3000 r. p.n.e.). Zmiana ta była tak znacząca w dziejach ludzkości, że przeszła do historii pod nazwą rewolucji neolitycznej. Nazwa ta nie oddaje jednak ewolucyjnego charakteru pojawienia się tego całkiem nowego sposobu pozyskiwania żywności, jakim było rolnictwo, czyli uprawianie zbóż oraz hodowla zwierząt. Produkty rolne wykorzystywano jako pokarm i surowiec do produkcji odzieży, schronienia, broni i innych dóbr codziennego użytku. Całkowite przejście na produkcję żywności było poprzedzone fazą przejściową⁴⁹, w której pozyskiwanie żywności odbywało się poprzez zbieractwo i myślistwo, zaczynano uprawiać rośliny (zboża, rośliny strączkowe), udomawiać dzikie zwierzęta (początkowo kozy i owce). Przyjrzenie się temu okresowi umożliwi uchwycenie roli postępu technicznego w przejściu od łowiectwa i zbieractwa do rolnictwa.

Przyjmujemy, że w okresie przejściowym ziemi, którą można rolniczo wykorzystać, jest pod dostatkiem, nie ma ograniczeń w poszerzaniu areału upraw. Kluczowym czynnikiem jest zatem praca, która przetwarza surowe jednostki ekosystemu w dobra pośrednie, nieistniejące do tej pory, które następnie są agregowane w finalne dobra żywnościowe. W rolnictwie zawierają się zatem działania modyfikujące środowisko zarówno poprzez bezpośrednie wykorzystanie ziemi pod uprawę roślin i hodowlę zwierząt, jak i mniej lub bardziej świadome manipulacje genetyczne prowadzące do tworzenia nowych odmian roślin i zwierząt⁵⁰. Nie jest to już zatem proste pozyskiwanie żywności wprost z ekosystemu, ale twórcza działalność doprowadzająca do powstania nowych odmian roślin i zwierząt. Nie sposób odpowiedzieć, jak doszło

⁴⁹ Szerzej na temat okresu przejściowego w: F.L. Pryor, *Economic Systems of Foraging, Agricultural, and Industrial Societies*, Cambridge University Press, New York 2005, s. 58–95; J. Weisdorf, *From Foraging To Farming. Explaining The Neolithic Revolution*, „Journal of Economic Surveys” 2005, vol. 19, no. 4.

⁵⁰ Szerszy opis zob. J. Diamond, *Strzelby...*, op.cit.

do odkrycia przez człowieka związku między roślinami a nasionami, z których wyrastają. Być może miało to miejsce kilka tysięcy lat przed neolitem⁵¹. Przyjmijmy, że jest to wynikiem obserwacji i nauki od przyrody, czyli według wzorca postępu technicznego opisanego w poprzednim rozdziale.

Niech \tilde{x}_i oznacza surowy składnik ekosystemu, wykorzystywany w technologii myśliwsko-zbierackiej, który ma potencjalne cechy przydatne do udomowienia (na przykład: zboże z zamkniętym kłosem, dzika owca i koza). Składniki te zostały mniej lub bardziej przypadkowo odkryte przy prowadzeniu działalności myśliwsko-zbierackiej. Wiedza o produkcji rolnej jest zatem zewnętrznym efektem działalności myśliwsko-zbierackiej. Następnie te surowe składniki ekosystemu, po dodaniu pracy, są agregowane w procesie produkcji rolnej w finalne dobro żywnościowe Y_A :

$$Y_A = \beta L \int_0^{\tilde{A}} \tilde{x}_i di. \quad (4.1)$$

β jest ułamkiem siły roboczej przydzielonej do zajęć rolniczych. Natomiast \tilde{A} to liczba możliwych do odkrycia nowych mutacji roślin i zwierząt. W okresie przejściowym liczba ta jest równa liczbie surowych składników ekosystemu, które nadawały się do udomowienia. Mimo że proces selekcji mógł trwać bardzo długo, przyjmijmy, że odkryty surowy składnik ekosystemu z potencjalnymi cechami udomowienia natychmiast przekształcał się z surowej w udomowioną jednostkę. Przyjmijmy zatem, że proso przekształcało się w „udomowione” proso, podobnie pszenica, kukurydza czy wreszcie zwierzęta, jak koza, owca, krowa.

Ponieważ \tilde{x}_i jest składnikiem ekosystemu, przyjmijmy, tak jak poprzednio, że jest stałe dla każdego zastosowania i równe \bar{x} . Wówczas fragment odkrytego ekosystemu jest równy:

$$\int_0^{\tilde{A}} \bar{x} di = \tilde{Z}. \quad (4.2)$$

Z tego otrzymujemy:

$$\bar{x} = \frac{\tilde{Z}}{\tilde{A}}. \quad (4.3)$$

Po podstawieniu (4.3) do (4.1) uzyskujemy funkcję produkcji w rolnictwie:

$$Y_A = \beta L \tilde{A} \bar{x}. \quad (4.4)$$

⁵¹ F.L. Pryor podaje szacunki mówiące nawet o 10 000 lat przed neolitem.

Zasadniczą cechą funkcji produkcji rolnej w okresie przejściowym jest brak malejących przychodów z pracy dzięki obfitości ziemi. Produkcja zależy proporcjonalnie od przydzielonej siły roboczej βL , od postępu wiedzy w odkrywaniu przydatnych do udomowienia składników ekosystemu (\tilde{A}) oraz od ogólnej produktywności rolnictwa. \tilde{A} jest zmienną egzogeniczną zdeterminowaną własnościami lokalnego ekosystemu. Trafienie na zmutowaną roślinę lub zwierzę było najprawdopodobniej przypadkowe. Jednak praktyczne wykorzystanie takiego odkrycia było już wynikiem nagromadzonej wiedzy o funkcjonowaniu otaczającej człowieka przyrody, zaobserwowanych zależnościach przyczynowo-skutkowych i przewidywań wyników eksperymentów czynionych na roślinach i zwierzętach. Prowadziło to ostatecznie do procesu nazwanego „udomowieniem”, czyli przystosowania surowych składników ekosystemu do kontrolowanego procesu zasiewu, rozrodczości, dojrzewania i wreszcie zbierania plonów i pożytków z hodowanych zwierząt (mięso, mleko, skóry, wełna itp.).

Jednak czy samo odkrycie składników ekosystemu, nadających się potencjalnie do udomowienia, uruchamiało ten proces? Jeśli przyjmiemy, że człowiek zachowywał się ekonomicznie racjonalnie, czyli wybierał te kierunki działania, które pozwalały maksymalizować ilość żywności przypadającej na mieszkańca, to rolnictwo mogło zaistnieć, jeśli przyczyniało się do realizacji tego celu.

Łączna ilość żywności, możliwa do pozyskania poprzez produkcję rolną i działalność zbieracko-myśliwską, równa się:

$$Y = Z_p^{1-\alpha} A^\alpha (1-\beta)^\alpha L^\alpha + \beta L \tilde{A} \bar{x}. \quad (4.5)$$

Równanie (4.6) przekształcamy w produkcję na mieszkańca:

$$y = A \bar{A}^{\alpha-1} (1-\beta)^\alpha l^{\alpha-1} + \beta \tilde{A} \bar{x}. \quad (4.6)$$

Pod kontrolą lokalnej społeczności jest tylko alokacja nakładów pracy pomiędzy rolnictwo i myślistwo-zbieractwo. Zatem zmienną decyzyjną staje się β . W każdym dowolnym momencie t muszą zatem rozwiązać problem:

$$\max_{\beta} \left\{ y = A \bar{A}^{\alpha-1} (1-\beta)^\alpha l^{\alpha-1} + \beta \tilde{A} \bar{x} \right\}. \quad (4.7)$$

Z warunku pierwszego rzędu $\frac{dy}{d\beta} = 0$ wynika, że:

$$\alpha A \bar{A}^{\alpha-1} (1-\beta)^{\alpha-1} l^{\alpha-1} = \tilde{A} \bar{x}. \quad (4.8)$$

Warunek drugiego rzędu $\frac{d^2 y}{d\beta^2} < 0$ jest spełniony, gdyż dla $\beta \in (0, 1)$ zawsze

zachodzi:

$$\alpha(\alpha - 1)A\bar{A}^{\alpha-1}(1 - \beta)^{\alpha-2}l^{\alpha-1} < 0. \quad (4.9)$$

W równaniu (4.8) lewa strona jest równa krańcowej produktywności pracy w myślistwie-zbieractwie (MPL_H). Natomiast prawa – to krańcowa produktywność pracy w rolnictwie (MPL_A)⁵². Zatem warunek (4.8) oznacza, że praca jest rozdzielana tak, aby wyrównać krańcowe produktywności pracy pomiędzy tymi dwoma zastosowaniami. Istotne jest to, że w warunkach obfitości ziemi przeznaczanej na cele rolnicze produktywność rolnictwa jest stała i zależy tylko od liczby odkrytych mutacji (odmian) nadających się do udomowienia. Jednak warunek pierwszego rzędu nie musi być spełniony dla $\beta \in (0, 1)$. Nie można wykluczyć przypadku

$\frac{dy}{d\beta} < 0$, czyli dla każdego $\beta \in (0, 1)$ krańcowa produktywność pracy w myślistwie-

-zbieractwie byłaby większa od krańcowej produktywności pracy w rolnictwie. Wówczas mielibyśmy brzegowe rozwiązanie $\beta = 0$, czyli lokalna społeczność nie angażowałaby się w produkcję rolną. Aby zatem pojawiło się rolnictwo w zorganizowanej formie pozyskiwania żywności, to w dowolnym okresie t dla $\beta = 0$, czyli gdy zasoby pracy są zaangażowane wyłącznie w działalność myśliwsko-zbieracką, krańcowa produktywność w tej działalności musi być niższa niż możliwa do uzyskania krańcowa produktywność w rolnictwie:

$$\alpha A\bar{A}^{\alpha-1}l^{\alpha-1} < \tilde{A}\bar{x}. \quad (4.10)$$

Wówczas rolnictwo jest realną alternatywą dla myślistwa-zbieractwa. Powstałaby gospodarka mieszana, częściowo składająca się z wytwórczości żywności i częściowo z pozyskania jej wprost z ekosystemu za pomocą technik łowieckich i zbierackich.

Z warunku (4.10) nie wynika wprost, który czynnik odgrywa kluczową rolę w zainicjowaniu przejścia od łowiectwa-zbieractwa do gospodarki mieszanej.

⁵² Bardzo łatwo wykazać, że są to krańcowe produktywności pracy w tych dwóch rodzajach działalności. Zapiszmy łączną produkcję: $Y = Z^{1-\alpha} A^\alpha L_H^\alpha + L_A \tilde{A}\bar{x}$, gdzie: $L_H = (1-\beta)L$, $L_A = \beta L$. Krańcowa produktywność pracy w działalności myśliwsko-zbierackiej jest równa:

$$\frac{\partial Y}{\partial L_H} = \alpha Z^{1-\alpha} A^\alpha L_H^{\alpha-1} = \alpha A\bar{A}^{\alpha-1}(1-\beta)^{\alpha-1}l^{\alpha-1}.$$

Natomiast krańcowa produktywność pracy w rolnictwie jest równa: $\frac{\partial Y}{\partial L_A} = \tilde{A}\bar{x}$.

Spełnienie nierówności (4.10) może być wynikiem relatywnego spadku krańcowej produktywności myślistwa-zbieractwa lub relatywnego wzrostu krańcowej produktywności rolnictwa. Może to być zarówno wynikiem wzrostu odkryć (postępu wiedzy) w udomowieniu roślin i zwierząt, czyli wzrostu \tilde{A} . Może również wynikać ze wzrostu gęstości zaludnienia danego ekosystemu, co prowadzi do spadku krańcowej produktywności pracy w myślistwie-zbieractwie. Prześledźmy bliżej te warunki dla społeczności stagnacyjnej i ekspansywnej.

Aby zaistniała interakcja pomiędzy dynamiką gęstości zaludnienia a dynamiką postępu technicznego, lokalne społeczności muszą być w nierównowadze, czyli $u \neq 0$. Wówczas pojawi się konieczność odkrywania kolejnych elementów ekosystemu. Załóżmy zatem, że w punkcie wyjścia w momencie t_0 gospodarka myśliwsko-zbieracka jest w stanie nierównowagi z gęstością zaludnienia l_0 i poziomem techniki A_0 . Taka lokalna społeczność zmierza do punktu, który oznaczmy l^* i A^* . Dla społeczności stagnacyjnej jest to punkt równowagi, gdy $u = 0$ oraz $\gamma = \delta$. Natomiast dla społeczności ekspansywnej przyjmujemy, iż jest to punkt dojścia do bariery samoodnowy ekosystemu ($\gamma = \delta_{\max}$) i lokalna społeczność, aby uchronić się przed zagładą, podejmuje decyzję o migracji części swoich członków, aby obniżyć gęstość zaludnienia w danym regionie. W punkcie startu krańcowe produktywności pracy w myślistwie-zbieractwie i rolnictwie wynosiły odpowiednio: MPL_{H_0} , MPL_{A_0} . Relacja pomiędzy nimi spełniała warunek istnienia tylko gospodarki myśliwsko-zbierackiej: $MPL_{H_0} > MPL_{A_0}$. Natomiast w punkcie końcowym krańcowe produktywności są równe: MPL_{H^*} , MPL_{A^*} . Aby przejście do gospodarki mieszanej pomiędzy punktami początkowym i końcowym było opłacalne, w punkcie końcowym musi zachodzić $MPL_{H^*} < MPL_{A^*}$. Wówczas w punkcie końcowym będzie istniała gospodarka mieszana. Aby sprawdzić, czy tak się stanie, należy prześledzić kierunek zmiany krańcowych produktywności w myślistwie-zbieractwie i rolnictwie dla różnych punktów startowych. Zbadajmy dwa indeksy opisujące

dynamikę tych produktywności $\frac{MPL_{H^*}}{MPL_{H_0}}$ oraz $\frac{MPL_{A^*}}{MPL_{A_0}}$.

Dynamikę krańcowej produktywności pracy w myślistwie-zbieractwie po przekształceniach można zapisać jako:

$$\frac{MPL_{H^*}}{MPL_{H_0}} = \frac{y^*}{y_0}, \quad (4.11)$$

gdzie y_0, y^* to ilość żywności przypadającej na mieszkańca odpowiednio w punktach startu i końcowym. O tym, jak się ona zmienia, można w sposób pośredni

wnioskować z ruchu gęstości zaludnienia i postępu technicznego⁵³. W tym celu ustalmy stopę wzrostu ilości żywności przypadającej na mieszkańca:

$$\frac{\dot{y}}{y} = \frac{\dot{A}}{A} - (1-\alpha) \frac{\dot{l}}{l}. \quad (4.12)$$

Zgodnie z analizą dokonaną w poprzednim rozdziale punkty startowe mogą znajdować się w różnych obszarach. Możemy wyróżnić trzy przypadki. Pierwszy, gdy punkty początkowe znajdują się w obszarze $u < 0$ i $\dot{u} > 0$, drugi, gdy punkty końcowe odnoszą się do społeczności stagnacyjnej lub ekspansywnej. Mamy zatem do czynienia z lokalną społecznością, która dzięki postępowi technicznemu wyha-

mowuje ujemny przyrost naturalny. Ponieważ⁵⁴ $\dot{u} > 0$, to $\frac{\dot{A}}{A} - (1-\alpha) \frac{\dot{l}}{l} > 0$. Krań-

cowa produktywność w myślistwie-zbieractwie rośnie nie tylko dzięki postępowi technicznemu, lecz także dzięki spadkowi gęstości zaludnienia. Czyli jesteśmy

w obszarze wzrostu żywności na mieszkańca $\frac{\dot{y}}{y} > 0$ i w konsekwencji prowadzi to

do $\frac{MPL_{H^*}}{MPL_{H_0}} > 1$. W drugim przypadku ruch rozpoczyna się, gdy $u > 0$ i $\dot{u} > 0$.

Punkty końcowe zawsze prowadzą do społeczności ekspansywnej⁵⁵. Z $\dot{u} > 0$ wynika

$\frac{\dot{y}}{y} > 0$ i ostatecznie $\frac{MPL_{H^*}}{MPL_{H_0}} > 1$. Jest to zatem społeczność lokalna o tak silnym

wzroście ludności, który prowadzi do bardzo wysokiej dynamiki postępu technicznego, która kompensuje z nadwyżką negatywny wpływ wzrostu gęstości zaludnienia na krańcową produktywność pracy. Dzięki temu krańcowa produktywność pracy rośnie. Ostatnia możliwość to sytuacja, kiedy punkty początkowe

znajdują się w obszarze $u > 0$ i $\dot{u} < 0$. Ponieważ $\dot{u} < 0$, to $\frac{\dot{A}}{A} - (1-\alpha) \frac{\dot{l}}{l} < 0$. Wynika

z tego, że znajdujemy się w obszarze spadku żywności na mieszkańca $\frac{\dot{y}}{y} < 0$

⁵³ Zob. rozdział 2.

⁵⁴ Wynika to z równania $\dot{u} = \varepsilon h(A, l) \left[\frac{\dot{A}}{A} - (1-\alpha) \frac{\dot{l}}{l} \right]$. Zob. rozdział 2.

⁵⁵ Wynika to z tego, iż w tym przypadku, jeśli $\delta_{\max} < 1$, to społeczność lokalna zawsze dojdzie do bariery samoodnowy ekosystemu, gdyż nadal $u > 0$.

i w konsekwencji $\frac{MPL_{H^*}}{MPL_{H_0}} < 1$. Jest to zatem lokalna społeczność o względnie umiar-

kowanej dodatniej i wygasającej dynamice przyrostu naturalnego, która wzbudza dynamikę postępu technicznego na takim poziomie, iż nie jest on w stanie skompensować negatywnego wpływu wzrostu gęstości zaludnienia na krańcową produktyjność. To ostatecznie prowadzi do jej spadku niezależnie od tego, czy w punkcie końcowym mamy ekspansywną czy stagnacyjną lokalną społeczność.

Aby ustalić, jak zmienia się krańcowa produktyjność pracy w rolnictwie, musimy znać jej czasową ścieżkę. Przede wszystkim należy podkreślić, że odkrycia dotyczące udomawiania są efektem zewnętrznym działalności myśliwsko-zbierackiej. Chodzi o to, iż w toku zdobywania tą drogą pożywienia zdobywana jest wiedza o ekosystemie przejawiająca się odkrywaniem potencjału żywieniowego \bar{A} . W tym potencjale znajdują się surowe składniki nadające się do udomowienia. Odkrycia w myślistwie-zbieractwie pociągają za sobą odkrycia elementów nadających się do udomowienia. Na elementy takie natrafiano jednak rzadko. Nie każde odkrycie składników przydatnych w myślistwie-zbieractwie wiązało się z odkryciem elementów nadających się do udomowienia. Można zatem przyjąć, że średnio tempo odkryć na potrzeby rolnictwa było wolniejsze niż na cele myśliwsko-zbierackie. Tempo pozyskiwania wiedzy o udomowieniu można zatem opisać wzorem:

$$\frac{\dot{\bar{A}}}{\bar{A}} = \vartheta \frac{\dot{A}}{A}, \text{ gdzie: } 0 \leq \vartheta < 1. \quad (4.13)$$

Parametr ϑ zależy od dwóch czynników. Po pierwsze, jest determinowany przez naturalną zdolność ludzi do uczenia się na bazie już pozyskanej wiedzy w działalności myśliwsko-zbierackiej. Uczymy się nie tylko wprost od przyrody, obserwując jej surowe jednostki, lecz na bazie uzyskanego doświadczenia w pozyskaniu tych surowych składników z ekosystemu staramy się zrozumieć sam proces kreowania żywności przez przyrodę i naśladowania tego procesu w sposób kontrolowany. Doświadczenie myśliwsko-zbierackie jest przetwarzane w kolejne praktyczne umiejętności polegające na kontrolowaniu wegetacji uprawianych roślin i etapów życia hodowanych zwierząt. Przyjmujemy, że ta skłonność ludzi do uczenia się od ekosystemu możliwości kontrolowania wegetacji roślin i zwierząt jest stała w czasie i taka sama we wszystkich lokalnych społecznościach. Skłonność tę oznaczymy $0 < \pi < 1$. Po drugie, proces pozyskiwania wiedzy o możliwościach udomowienia zależy od zawartości potencjału żywieniowego. Inaczej mówiąc, musi istnieć zbiór surowych składników ekosystemu, które mogą „nauczyć” czegoś przydatnego

z punktu widzenia procesu udomowienia. Ekosystem może zawierać elementy, które w ogóle nie stwarzają szansy na poznanie elementów nadających się do udomowienia, bo ich po prostu brakuje. Generowany byłby strumień wiedzy przydatnej do myślistwa-zbieractwa, lecz całkowicie nieprzydatny z perspektywy udomowienia (na przykład nawet najbardziej wyrafinowana technika polowania na duże ssaki, jak mamuty, nie tworzyła podstaw do udomowienia mamutów, brak traw z jadalnymi nasionami nie stwarzał podstaw do poznania związków między dojrzałymi roślinami i nasionami, itp.). Region, w którym zlokalizowana była dana społeczność, miał zatem określone cechy, biorąc pod uwagę jego przydatność dla rolnictwa. Niech tę potencjalną przydatność do rolnictwa wyraża indeks τ , który przyjmuje wartości z przedziału $(0, 1)$. Jeśli $\tau = 0$, oznacza to, że dany region w ogóle nie posiada składników do udomowienia. Natomiast im wyższa wartość indeksu, tym większa potencjalna liczba składników ekosystemu nadających się do udomowienia. Przy czym $\tau = 1$ oznaczałoby, że cały ekosystem nadaje się do udomowienia. Przyjmijmy jednak, że sytuacja taka nie jest możliwa. Te dwa parametry, τ i π , składają się multiplikatywnie na parametr \mathcal{G} :

$$\mathcal{G} = \tau\pi . \quad (4.14)$$

Aby znaleźć ścieżkę czasową krańcowej produktywności pracy w rolnictwie, należy rozwiązać równanie (4.13). W tym celu całkujemy je obustronnie:

$$\int \frac{\dot{\tilde{A}}}{\tilde{A}} dt = \int \mathcal{G} \frac{\dot{A}}{A} dt . \quad (4.15)$$

Rozwiązaniem jest:

$$\ln \tilde{A} + c_1 = \ln A^{\mathcal{G}} + \mathcal{G}c_2 , \text{ gdzie: } c_1, c_2 \text{ to dowolne stałe.} \quad (4.16)$$

Wykorzystujemy, że $e^{\ln x} = x$ i zapisujemy (4.16) w postaci:

$$e^{\ln \tilde{A}} = e^{\ln A^{\mathcal{G}} + c} , \text{ gdzie: } c = \mathcal{G}c_2 - c_1 . \quad (4.17)$$

Z (4.17) otrzymujemy ostatecznie szukaną ścieżkę czasową:

$$\tilde{A} = BA^{\mathcal{G}} , \quad (4.18)$$

gdzie: $B = e^c$ to dowolna stała określona przez warunki początkowe.

Dynamika krańcowej produktywności pracy w rolnictwie pomiędzy początkowym i końcowym punktem jest równa:

$$\frac{MPL_{A^*}}{MPL_{A_0}} = \left(\frac{A^*}{A_0} \right)^{\tau\pi} \geq 1. \quad (4.19)$$

Istotne jest to, że jeśli istnieje postęp techniczny w myślistwie-zbieractwie, czyli $\frac{A^*}{A_0} > 1$, to dynamika krańcowej produktywności w rolnictwie nigdy nie jest ujemna.

Możemy teraz porównać dynamikę krańcowych produktywności w myślistwie-zbieractwie i rolnictwie dla trzech wyżej wyszczególnionych przypadków. Wykorzystamy przekształcenie dynamiki krańcowej produktywności w myślistwie-zbieractwie do postaci:

$$\frac{MPL_{H^*}}{MPL_{H_0}} = \frac{A^*}{A_0} \left(\frac{l_0}{l^*} \right)^{1-\alpha}. \quad (4.20)$$

W pierwszym przypadku, gdy $\frac{MPL_{H^*}}{MPL_{H_0}} > 1$ oraz $u < 0$ i $\dot{u} > 0$, czyli społeczność

lokalna szuka rozwiązań technicznych, aby przeciwdziałać spadkowi ludności, zawsze będzie zachodzić dla $0 \leq \tau\pi < 1$ nierówność:

$$\frac{A^*}{A_0} \left(\frac{l_0}{l^*} \right)^{1-\alpha} > \left(\frac{A^*}{A_0} \right)^{\tau\pi}. \quad (4.21)$$

Oznacza to, że dynamika krańcowej produktywności w myślistwie-zbieractwie w całym okresie przejściowym jest wyższa od dynamiki produktywności w rolnictwie. Zatem społeczności z ujemnym przyrostem naturalnym, mimo wprowadzania zmian technicznych w myślistwie-zbieractwie, które wytwarzały efekty zewnętrzne w postaci postępu w technikach rolnych, nigdy nie były w stanie stworzyć gospodarki mieszanej. Bardziej opłacalne było pozostanie przy tradycyjnym pozyskiwaniu żywności poprzez łowiectwo i zbieractwo.

W drugim przypadku w społeczności o silnym dodatnim i rosnącym przyroście naturalnym ($u > 0$, $\dot{u} > 0$) powiększa się równocześnie krańcowa produktywność w myślistwie-zbieractwie i w rolnictwie. Nie można jednak jednoznacznie stwierdzić, która produktywność rośnie szybciej. W sytuacji, gdyby produktywność w myślistwie-zbieractwie rosła wolniej niż w rolnictwie, to po pewnym czasie produktywność

rolnictwa mogłaby przewyższyć produktywność myślistwa-zbieractwa. Jest to jednak tylko jedna z możliwości.

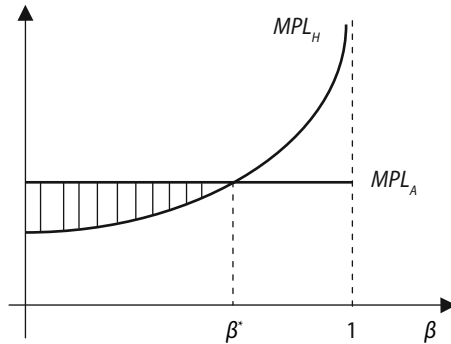
W ostatnim przypadku, gdy mamy $\frac{MPL_{H^*}}{MPL_{H0}} < 1$ oraz $u > 0$ i $\dot{u} < 0$, również nie

ma jednoznacznej odpowiedzi, czy nastąpi przejście do rolnictwa. Z jednej strony spada MPL_H , ale z drugiej – produktywność rolnictwa rośnie. Efekty tych dwóch tendencji są niejednoznaczne. Może być tak, że mimo spadku MPL_H i wzrostu MPL_A nadal $MPL_{H^*} > MPL_A$, i gospodarka mieszana nie powstanie.

Kluczowymi czynnikami, które mogły wywrzeć wpływ na powstanie rolnictwa w tych dwóch ostatnich przypadkach, są dynamika gęstości zaludnienia i współczynnik przydatności ekosystemu dla rolnictwa. Im wyższa dynamika gęstości zaludnienia, tym głębszy spadek MPL_H . A im wyższa przydatność ekosystemu dla rolnictwa, tym silniejsze efekty zewnętrzne postępu w myślistwie-zbieractwie i ostatecznie wyższa dynamika MPL_A . Gęstość zaludnienia jest determinowana przez stopę przyrostu naturalnego. Ponieważ społeczności ekspansywne mają ją wyższą w punktach startowych niż społeczności stagnacyjne, to równocześnie mają większe stopy przyrostu naturalnego. W konsekwencji mają relatywnie wyższy wzrost gęstości zaludnienia i tym samym wyższy spadek MPL_H . Jednak nawet najgłębszy spadek MPL_H nie spowoduje powstania gospodarki mieszanej, jeśli w ekosystemie nie ma składników, które można udomowić (parametr $\tau = 0$). Pomiędzy regionami istniały ogromne różnice w liczbie gatunków roślin i zwierząt nadających się do udomowienia. Spośród około kilku tysięcy jadalnych gatunków roślin na wszystkich kontynentach tylko 56 gatunków dzikich traw ze względu na swoje własności (duże, ciężkie ziarna w zamkniętym kłosie) nadawało się do udomowienia. Z tego 33 gatunki zlokalizowane były na Bliskim Wschodzie w basenie Morza Śródziemnego, po 6 we wschodniej i południowo-wschodniej Azji, po 2 w Ameryce Południowej i Australii, 4 w Północnej Ameryce, 5 w Środkowej Ameryce, 4 w Afryce Subsaharyjskiej. Dotyczy to również zwierząt nadających się do udomowienia – obserwujemy dosyć duże różnice między regionami. Spośród 148 gatunków ssaków, które mogły być potencjalnie udomowione (poruszały się po lądzie, były roślinożerne i ważyły co najmniej 45 kg), tylko 14 zostało ostatecznie udomowionych. Pozostałe okazały się albo zbyt agresywne, albo źle się chowały w niewoli, albo zbyt wolno osiągały wiek dojrzały. Z tych 14 aż 9 znajdowało się na Bliskim Wschodzie, 7 – we wschodniej Azji, 2 – w południowo-wschodniej Azji, 1 – w Południowej Ameryce. Reszta regionów była pozbawiona zwierząt poddających się udomowieniu⁵⁶.

⁵⁶ O. Olsson, D.A. Hibbs Jr, *Biogeography and long-run economic development*, „European Economic Review” 2005, vol. 49, no. 4, s. 915–917.

Powstanie rolnictwa wymagało zatem zbiegu dwóch okoliczności. Po pierwsze, ludzie musieli się znaleźć w regionie, gdzie znajdowały się składniki nadające się do udomowienia. Aby się tak stało, lokalne społeczności musiały się przemieszczać między regionami. Taką zdolność miały ekspansywne lokalne społeczności. Po drugie, musiałyby to być lokalne społeczności z na tyle dynamicznym przyrostem naturalnym, aby obniżyć do wystarczająco niskiego poziomu krańcową produktywność pracy, co zapewniało opłacalność rolnictwa. Tutaj również ekspansywne lokalne społeczności odgrywały większą rolę niż stagnacyjne. Inaczej mówiąc, kwintesencją rozwoju były stany nierównowagi pomiędzy możliwościami wzrostu liczebności lokalnej społeczności a zdolnością ekosystemu do wyżywienia rosnącej populacji ludzi. Taki stan nierównowagi mógł w efekcie wywołać przejście od łowiectwa i zbieractwa do rolnictwa.



Rysunek 4.1. Pojawienie się rolnictwa

Społeczności ekspansywne zyskiwały w ten sposób dodatkowe możliwości zabezpieczenia przed wyczerpywaniem się zasobów ekosystemu w danym regionie. Oprócz migracji mogły, jeśli było to celowe, wprowadzić techniki rolne. Załóżmy, że dana ekspansywna lokalna społeczność rozwija również rolnictwo. Zasoby pracy rozdziela między myślistwo-zbieractwo oraz rolnictwo tak, aby wyrównać krańcowe produktywności w tych zastosowaniach (rys. 4.1). Przed wprowadzeniem rolnictwa pozyskiwano ilość żywności przypadającej na mieszkańca $y_H = A\bar{A}^{\alpha-1}l^{\alpha-1}$. Po przydzieleniu do rolnictwa β^* pracy produkcja wynosi:

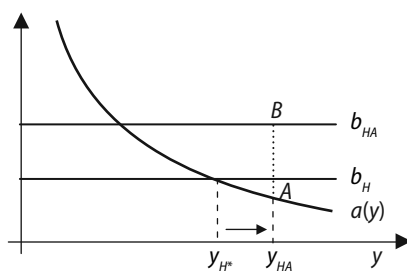
$$y_{HA} = A\bar{A}^{\alpha-1} (1 - \beta^*)^\alpha l^{\alpha-1} + \beta^* \tilde{A}\bar{x}.$$

Ponieważ $MPL_H \leq MPL_A$ dla $\beta \leq \beta^*$, to $y_{HA} > y_H$. Lokalna społeczność odnosi natychmiastową korzyść w postaci wzrostu ilości żywności przypadającej na

mieszkańca (zakreskowany obszar na rys. 4.1). Czy taka poprawa zamożności utrzyma się w długim okresie?

Jednym z pierwszych ekonomistów, którzy analizowali ten problem, był O. Olsson⁵⁷. Poniżej przedstawimy główną ideę jego rozumowania, modyfikując ją i interpretując tak, aby dostosować ją do narzędzi stosowanych w niniejszym rozdziale.

Przed wszystkim wzrost żywności, dzięki pojawieniu się rolnictwa, powoduje równocześnie wzrost stopy przyrostu naturalnego (rys. 4.2). Wynika to z dwóch zjawisk. Po pierwsze, rośnie stopa urodzeń w wyniku zmiany sposobu życia przez część członków lokalnych społeczności (na rys. 4.2 z poziomu b_H na b_{HA}). Jest to związane z pojawieniem się osiadłego trybu życia. Żywności w sektorze rolnym nie trzeba już szukać, wędrując po danym regionie, lecz należy kontrolować umiejscowione uprawy roślin i stada zwierząt hodowlanych. Wymaga to dłuższego pobytu w jednym miejscu oraz zwiększa zapotrzebowanie na pracę przeznaczoną na pozyskanie jednostki żywności. Wraz z osiadłym trybem życia znika konieczność transportu zależnych od matek małych dzieci, co było nieodłączną częścią trybu życia społeczności myśliwsko-zbierackich. Kolejne dziecko kobieta zazwyczaj rodziła dopiero wtedy, gdy poprzednie było na tyle dojrzałe, iż mogło uczestniczyć w wędrownych prawie samodzielnie. Dzięki osiadłemu trybowi życia następuje skrócenie okresu pomiędzy kolejnymi porodami. Rośnie dzietność kobiet i tym samym powiększa się stopa urodzeń. Po drugie, początkowy wzrost ilości żywności przypadającej na mieszkańca zmniejsza współczynnik zgonów. Ludzie są lepiej odżywieni i dzięki temu odporniejsi na choroby, zdrowsi i silniejsi fizycznie (na rys. 4.2 przesunięcie stopy zgonów do punktu odpowiadającego poziomowi żywności y_{HA}).

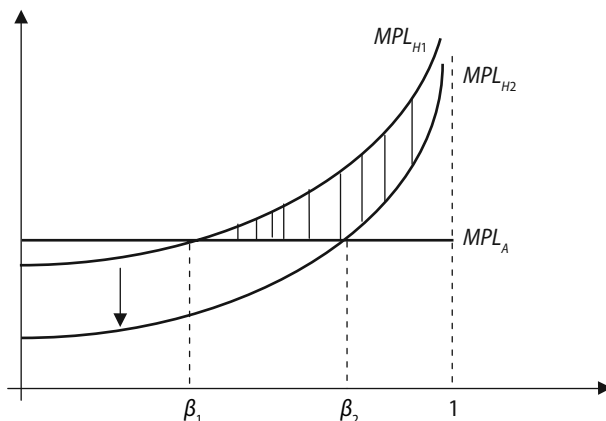


Rysunek 4.2. Wzrost stopy przyrostu naturalnego po wprowadzeniu produkcji rolnej

Opis: Stopa urodzeń rośnie z b_H na b_{HA} , stopa umieralności obniża się w wyniku wzrostu żywności do y_{HA} . Ostatecznie stopa przyrostu naturalnego równa się odcinkowi AB.

⁵⁷ O. Olsson, *The Rise of Neolithic Agriculture*, Department of Economics, Göteborg University, „Working Paper in Economics”, September 2001, no. 57.

Założmy, że w okresie t^* , gdy po raz pierwszy pojawia się rolnictwo, stopa urodzeń podnosi się jednorazowo i na trwałe do poziomu $b_{HA} > b_H$. Wobec tego dynamika gęstości zaludnienia podnosi się skokowo z $\dot{l} = [b_H - a(y_H) - z]l$ do poziomu $\dot{l} = [b_{HA} - a(y_{HA}) - z]l$. Przy danej dynamice ekosystemu (z) w okresie t^* musi skokowo wzrosnąć gęstość zaludnienia. Z kolei wzrost gęstości zaludnienia prowadzi w następnym okresie $t^* + dt$ do spadku krańcowej produktywności pracy w sektorze myśliwsko-zbierackim. To, przy danym poziomie β^* , prowadzi do $MPL_H < MPL_A$, czyli zostaje naruszony warunek równowagi rozdziału pracy pomiędzy obydwie sektory. Jego przywrócenie powoduje wzrost współczynnika β , czyli poszerza się udział sektora rolnego w pozyskaniu żywności. Istotne jest to, że to wtórne poszerzenie odbywa się w wyniku wzrostu liczby ludności. W ogóle nie był konieczny postęp techniczny. Tę reakcję gospodarki ilustruje rysunek 4.3.



Rysunek 4.3. Spadek krańcowej produktywności pracy w myślistwie-zbieractwie w wyniku wzrostu gęstości zaludnienia

Opis: Zakreskowane pole to straty w produkcji na mieszkańca.

W punkcie wyjścia udział sektora rolnego wynosił β_1 . Po wzroście gęstości zaludnienia linia krańcowej produktywności pracy w myślistwie-zbieractwie przesuwa się z pozycji MPL_{H1} na MPL_{H2} . Aby wyrównać krańcowe produktywności pracy między sektorami, parametr β rośnie do β_2 . Powierzchnie pod liniami krańcowych produktywności pracy w rolnictwie i myślistwie-zbieractwie są równe pozyskanej żywności na mieszkańca w każdej z tych dziedzin działalności. Jednak produkcja na mieszkańca spada o wolumen odpowiadający zakreślonej powierzchni między liniami MPL_{H1} i MPL_{H2} . Wzrost poziomu żywności jest zatem krótkookresowy. Z momentem przejścia do rolnictwa wzrasta ilość żywności przypadającej na mieszkańca. Jednak

w następnym okresie, bez postępu technicznego, procesy demograficzne prowadzą do zmniejszenia produkcji żywności w porównaniu z okresem pierwszego pojawienia się gospodarki mieszanej. Ponieważ powiększeniu udziału rolnictwa towarzyszy wzrost populacji prowadzącej osiadły tryb życia, to równocześnie powiększa się stopa urodzeń. Dzięki temu mimo zmniejszenia poziomu żywności nadal może utrzymywać się dodatnia stopa przyrostu naturalnego. To pociąga za sobą dalszy wzrost gęstości zaludnienia, a także ponownie powoduje obniżenie krańcowej produktywności w myślistwie-zbieractwie i wymusza powiększenie sektora rolnego (wzrost współczynnika β). W konsekwencji powiększenia sektora rolnego ponownie nastąpi spadek łącznej produkcji żywności i wzrost stopy urodzeń. Jeśli nadal stopa przyrostu naturalnego będzie dodatnia, to sekwencja zdarzeń się powtórzy. Lokalna społeczność ekspansywna ($u > 0$) po stworzeniu mieszanej struktury pozyskiwania żywności jest niejako przymuszana do dalszego rozwoju rolnictwa mimo zmniejszenia ilości pozyskiwanej żywności. Załóżmy, że ten proces trwa aż do momentu, gdy $\beta = 1$, czyli sektor rolny wypiera sektor myśliwsko-zbieracki⁵⁸. Czy kolejne sekwencje spadku produkcji żywności doprowadzą ostatecznie do poziomu poniżej uzyskiwanego w okresie myśliwsko-zbierackim, przed powstaniem gospodarki mieszanej? Gdy $\beta = 1$, to całkowita produkcja jest równa:

$$y = \tilde{A}\bar{x}. \quad (4.22)$$

Z warunku (4.22) wynika, że w momencie, gdy następuje uruchomienie produkcji rolnej, zachodzi $\alpha y_H < \tilde{A}\bar{x}$. W tej nierówności y_H jest najwyższym poziomem ilości żywności uzyskanym z myślistwa-zbieractwa przed pojawieniem się rolnictwa, natomiast $\tilde{A}\bar{x}$ jest najniższą produkcją rolną na mieszkańca z tego samego okresu. Z tego wynika, że w momencie pojawienia się rolnictwa musi zachodzić:

$$y_H > \tilde{A}\bar{x}. \quad (4.23)$$

Czyli poziom żywności w okresie tuż przed pojawieniem się rolnictwa byłby wyższy niż po całkowitym przejściu na pozyskanie żywności poprzez produkcję rolną, gdyby wyłącznie działały czynniki demograficzne związane ze wzrostem stopy urodzeń

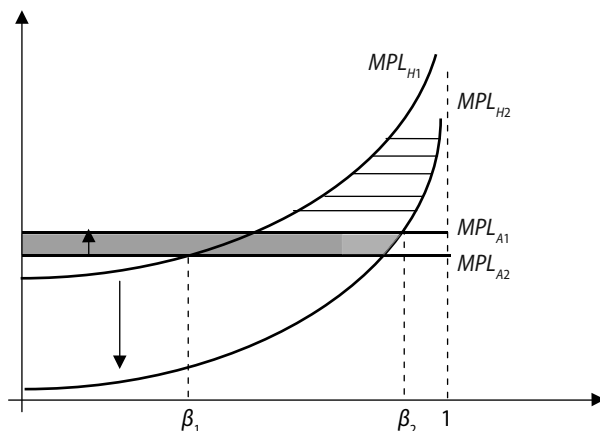
⁵⁸ Dokładnie mówiąc, sektor myśliwsko-zbieracki nie znika w całości. Zmniejsza się do marginalnego udziału. Wynika to z warunku optymalizacji udziału sektora rolnego: $\alpha A \bar{A}^{\alpha-1} (1-\beta)^{\alpha-1} l^{\alpha-1} = \tilde{A}\bar{x}$.

Z tego otrzymujemy optymalny udział sektora rolnego: $\beta^* = 1 - \frac{(\tilde{A}\bar{x})^{\frac{1}{\alpha-1}}}{\bar{A}l(\alpha A)^{\frac{1}{\alpha-1}}}$. Ponieważ gęstość zaludnienia może przybrać najwyższą wartość 1 i wszystkie pozostałe parametry są większe od zera, to $\beta^* < 1$.

i lokalna społeczność byłaby ekspansywna. W ostatecznej konkluzji O. Olsson zaznacza, że przejście do rolnictwa, chociaż wiązało się ze spadkiem dobrobytu, było jednak nieodwracalną koniecznością spowodowaną rosnącą liczbą ludności.

Jednak równoległe mogą zaistnieć dwa zjawiska przeciwdziałające takiemu obniżeniu poziomu życia. Po pierwsze, gdyby lokalna społeczność rozpoczęła wprowadzanie rolnictwa przed dojściem do bariery samoodnowy ekosystemu ($A < \delta_{\max} \bar{A}$), to spadek ilości żywności w wyniku procesów demograficznych może być powstrzymany przez postęp techniczny w myślistwie-zbieractwie, który w formie efektów zewnętrznych uruchamia postęp techniczny w rolnictwie. Niech przy MPL_{H1} ma miejsce przestawienie części β_1 pracy na wytwórczość rolną (rys. 4.4). Wzrost gęstości zaludnienia towarzyszący postępowi technicznemu spowoduje spadek krańcowej produktywności w myślistwie-zbieractwie z MPL_{H1} na MPL_{H2} . To prowadzi do spadku pozyskiwanej żywności w myślistwie-zbieractwie (zakreskowane pole). Równocześnie pobudzenie postępu w rolnictwie⁵⁹ owocuje wzrostem jego krańcowej produktywności z MPL_{A1} na MPL_{A2} dzięki nowym odkryciom składników ekosystemu nadających się do udomowienia. To z kolei wywołuje wzrost produkcji żywności (zacieniona powierzchnia na rys. 4.4). W rezultacie zmiany te w krańcowych produktywnościach powodują wzrost przydziału nakładów pracy do sektora rolnego do poziomu β_2 oraz zmiany w poziomie ilości żywności. Jeśli nadal nie są wyczerpane możliwości postępu technicznego ($A < \delta_{\max} \bar{A}$) i utrzymuje się dodatni przyrost naturalny, to sekwencja zdarzeń powtórzy się: spadnie krańcowa produktywność myślistwa-zbieractwa i wzrośnie w produkcji rolnej. To z kolei ponownie wymusi realokację nakładów pracy na rzecz sektora rolnego. Za każdym razem ten przydział pracy jest większy niż w przypadku braku postępu w produkcji rolnej. Zewnętrzne efekty postępu w myślistwie-zbieractwie przyspieszają zatem przechodzenie do rolnictwa poprzez podnoszenie jego produktywności. Natomiast zmiana poziomu żywności nie jest jednoznaczna. Bez znajomości parametrów funkcji krańcowych produktywności nie sposób z góry odpowiedzieć, czy przyrosty żywności w rolnictwie wyrównują ubytki w myślistwie zbieractwie, czy też nie. Pewne jest natomiast, że gdy nastąpi całkowite przejście do rolnictwa ($\beta = 1$, $y = \bar{A}x$), to produkcja rolna będzie wyższa niż przy braku postępu w sektorze rolnym. Trudno jednak wskazać, czy będzie ona wyższa, niższa, a może równa poziomowi żywności z okresu przed wprowadzeniem rolnictwa. Każdy z tych przypadków jest możliwy, gdy uwzględniamy tylko efekty zewnętrzne postępu w myślistwie-zbieractwie.

⁵⁹ Abstrahujemy w tym momencie od postępu technicznego, który byłby wynikiem udoskonalania samej techniki rolnej. Ten problem rozpatrujemy dopiero w rozdziale 5.



Rysunek 4.4. Spadek krańcowej produktywności pracy w myślistwie-zbieractwie w wyniku wzrostu gęstości zaludnienia

Opis: Zakreskowane pole to straty w produkcji, natomiast zaciemnione pole to przyrost produkcji.

Po drugie, poprzez działalność rolniczą można zmieniać środowisko naturalne. Po rozpoczęciu produkcji rolnej metodą prób i błędów człowiek uczył się sadzić i pielęgnować sztucznie wyselekcjonowane rośliny oraz uczył się skutecznego postępowania ze zwierzętami, które wyselekcjonował do udomowienia. Takie *learning by doing* prowadziło do wzrostu umiejętności, dzięki którym człowiek, poprzez zakładanie sadów, wysiewanie zbóż oraz wypasanie udomowionych zwierząt, powiększał gęstość wybranych składników ekosystemu ponad tę, którą stworzyłaby sama przyroda. Można powiedzieć, że w wyniku działalności człowieka rosła ogólna produktywność powierzchni danego ekosystemu. Inaczej mówiąc, pozyskana na cel rolniczy jednostka ekosystemu \bar{x} zostaje faktycznie powiększona dzięki *learning by doing*. Ten proces uczenia się owocuje tym większymi umiejętnościami w kontroli wegetacji roślin i zwierząt, im większa część nakładów pracy jest angażowana w rolnictwie. Gdy zatem $\beta = 1$, to lokalna społeczność osiąga maksymalny poziom praktycznej wiedzy o rolnictwie w okresie przejściowym. Oznaczmy przez T indeks wyrażający umiejętności rolnicze w okresie przejściowym, który jest rosnącą funkcją udziału pracy w rolnictwie (β):

$$T = T(\beta), T(0) = 1, \frac{dT}{d\beta} > 0, T(1) = T_{\max} > 1. \quad (4.24)$$

Iloczyn $T\bar{x}$ nazwiemy efektywnie dostępnymi jednostkami ekosystemu. Krańcowa produktywność rolnictwa jest wówczas równa:

$$MPL_A = \tilde{A}T\bar{x} . \quad (4.25)$$

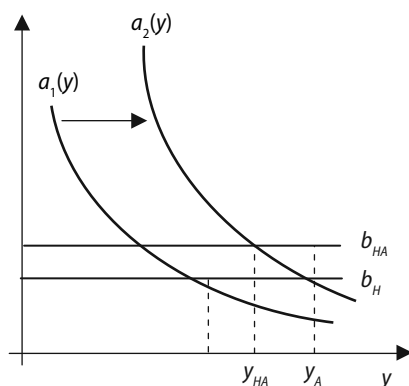
Tak więc, w okresie przejściowym od myślistwa-zbieractwa do rolnictwa, mogły wystąpić dwa podstawowe zjawiska przeciwdziałające spadkowi ilości żywności na mieszkańca. Mogły pojawiać się nowe odkrycia w zakresie składników do udomowienia, jeśli jeszcze nie wyczerpano efektów postępu technicznego w myślistwie-zbieractwie, oraz proces uczenia się technik rolnych w miarę rozwoju tego sektora. Obydwa zjawiska były źródłem podnoszenia krańcowej produktywności rolnictwa. Ten drugi czynnik, czyli nowy proces *learning by doing* wywołany pojawieniem się rolnictwa, wydaje się być kluczowy w uzyskaniu w długim okresie przewagi przez rolnictwo nad łowiectwem-zbieractwem. Najprawdopodobniej efekty z tego tytułu byłyby na tyle silne, iż kompensowałyby z nadwyżką spadki produkcji wywołane presją ludnościową. Gdyby było inaczej, to niezwykle trudno byłoby znaleźć wytłumaczenie fenomenowi szybkiego rozprzestrzenienia się rolnictwa.

Ponadto te dwa czynniki, a szczególnie ten drugi – *learning by doing* w rolnictwie, bez wątpienia musiały odegrać ogromną rolę, zwłaszcza że wraz z rolnictwem pojawiło się nowe zjawisko – wzrosła stopa umieralności przy danym poziomie ilości żywności przypadającej na mieszkańca (przesunięcie wykresu z $a_1(y)$ do $a_2(y)$ na rys. 4.5). Można podać dwa główne powody takiej zmiany w stopie umieralności⁶⁰. Po pierwsze, sektor myśliwsko-zbieracki zapewniał zdecydowanie bardziej zróżnicowaną dietę niż wytwórczość rolna. W tym pierwszym sektorze na żywność przekształcano A produktów pozyskiwanych z ekosystemu. Natomiast w sektorze rolnym przekształcano w żywność tylko A^g . W okresie przejściowym zmniejszała się ilość żywności pozyskiwanej ze zbieractwa i myślistwa na korzyść rolnictwa. Zatem postępujące wypieranie sektora myśliwsko-zbierackiego prowadziło ostatecznie do zubażania diety. Najprawdopodobniej odbijało się to negatywnie na stanie zdrowia ludności. Badania archeologiczne pokazały, że rzeczywiście przejście do rolnictwa wiązało się ze zmniejszeniem oczekiwanej długości życia, ludzie stali się mniejsi i bardziej podatni na choroby⁶¹.

⁶⁰ M. Livi-Bacci, op.cit., s. 31–38.

⁶¹ J. Diamond, *The Worst Mistake in the History of the Human Race*, „Discover Magazine”, May 1987, s. 64–66; R.A. Guzmán, J. Weisdorf, *The Neolithic Revolution from a Price-Theoretic Perspective*, Department of Economics, University of Copenhagen, „Discussion Papers” 2010, no. 10–13; A.J. Robson, *A Bioeconomic View of the Neolithic Transition to Agriculture*, „Canadian Journal of Economics” 2010, vol. 43, no. 1. Na podstawie badań szkieletów ludzkich sprzed 32 tys. lat szacowana oczekiwana długość życia wynosiła 33 lata dla mężczyzn i 28,7 dla kobiet. Ok. 11 tys. lat temu, gdy zaczęło się przechodzenie na rolnictwo, oczekiwana długość życia spadła odpowiednio do 32 i 24,9 lat. Również istotnie

Po drugie, rozpowszechnianie się osiadłego trybu życia stwarzało korzystne warunki do rozmnażania się przeróżnych insektów, pasożytów oraz chorobotwórczych bakterii i wirusów. Długotrwałe przebywanie dużych grup ludzi w jednym miejscu stwarzało szansę przeróżnym patogennym mikroorganizmom na przejście pełnego cyklu rozwojowego, kiedy jednym z żywicieli pośrednich jest organizm człowieka. Ponadto zanieczyszczenia pochodzące z osad ludzkich powodowały skażenie wód gruntowych i wierzchniej warstwy gleby. To z kolei również przyczyniało się do rozwoju patogenów. Dodatkowo, jeśli rozwój sektora rolnego obejmował również udomowienie zwierząt, to rosła groźba rozprzestrzeniania się zmutowanych zwierzęcych zarazków, które atakowały ludzki organizm⁶². Również rozwój rolnictwa mógł przyczynić się do rozprzestrzeniania się pewnych chorób. Na przykład systemy nawadniania i sztuczne zbiorniki wody tworzą korzystne warunki do rozwoju malarii. Ostatecznie wszystkie te czynniki, zubożona dieta i powstanie środowiska sprzyjającego rozwojowi chorób, wpłynęły na wzrost współczynnika umieralności dla każdego poziomu ilości żywności przypadającej na mieszkańca.



Rysunek 4.5. Dynamika stopy urodzeń i współczynnika umieralności

Gdyby nie zaistniały czynniki zwiększające produkcję rolną, to wzrost stopy umieralności mógłby wyhamować transformację gospodarki myśliwsko-zbierackiej w gospodarkę opartą na rolnictwie. Ilustruje to rysunek 4.5. Gdyby w momencie przejścia na rolnictwo poziom ilości żywności był równy y_H^* , to wzrost ilości żywności mógłby osiągnąć poziom y_{HA} . To pociągnęłoby wzrost stopy urodzeń do b_{HA} .

zmienił się przeciętny wzrost dorosłego mężczyzny i kobiety. Zmniejszył się odpowiednio ze 177,2 cm i 165 cm na 164,6 cm i 152,5 cm.

⁶² Szerzej na ten temat w: J. Diamond, *Strzelby...*, op.cit., s. 219–244.

Stopa przyrostu naturalnego wyniosłaby $b_{HA} - a_1(y_{HA})$. Powstała presja ludnościowa mogłaby być wyhamowana, gdyby nastąpił taki wzrost stopy umieralności (przesunięcie wykresu stopy umieralności do $a_2(y)$), iż zrównałaby się ona ze stopą urodzeń. Wówczas powstałaby stabilna gospodarka mieszana. Na rysunku 4.5 dzieje się to przy poziomie produkcji y_{HA} . Lokalna społeczność, nawet mimo sprzyjających warunków biologicznych, zastygłaby w gospodarkach mieszanych, przybierających na przykład formę ogrodnictwa lub pasterstwa połączonego z myślistwem-zbieractwem. Presja ze strony rosnącej ludności na spadek krańcowej produktywności myślistwa-zbieractwa i na *learning by doing* w rolnictwie wygasłaby. Liczebność ludności w tych lokalnych społecznościach ustabilizowałaby się. Ich ekspansywna cecha zanikłaby.

Jednak tak się nie stało. Zarówno wzrost produkcji rolnej (choć zmniejszyła się różnorodność produkowanych składników – były to głównie trawy – to plony były obfite), jak i wzrost stopy urodzeń zapewniał dodatnią stopę przyrostu naturalnego. To tworzyło ludnościową presję na powiększanie sektora rolnego. Produkcja żywności przesunęła się na tyle poza punkt zrównania stopy urodzeń ze stopą umieralności, iż utrzymywała się dodatnia stopa przyrostu naturalnego (na rys. 4.5 ilustruje to y_A). Presja na powiększanie sektora rolnego nie zanikłaby.

Przechodzeniu do rolnictwa rzeczywiście towarzyszył wzrost stopy przyrostu naturalnego. Świadczą o tym szacunki gęstości zaludnienia. Średnia liczebność lokalnej społeczności wzrosła z kilkunastu, kilkudziesięciu członków (do 30 osobników) do kilkuset (około 300). Również średnia gęstość wzrosła z mniej więcej 1 osobnika na milę kwadratową do około 20 i więcej⁶³. Sam szacunek stopy przyrostu naturalnego jest dosyć trudny i obarczony błędem, przyjmuje się jednak, że w paleolicie (okres myśliwsko-zbieracki) średnie tempo wzrostu liczby ludności było równe około 0,008%. Natomiast w neolicie (powstanie i rozprzestrzenianie rolnictwa) wynosiło 0,037%. W wyniku takiego tempa wzrostu liczba ludności 12 tys. lat temu wynosiła tylko około 6 mln. A 10 tys. lat później już około 250 mln⁶⁴.

Według archeologicznej wiedzy w siedmiu regionach w neolitycznym świecie powstały gospodarki z dominującym i rozrastającym się sektorem rolnym: w rejonie

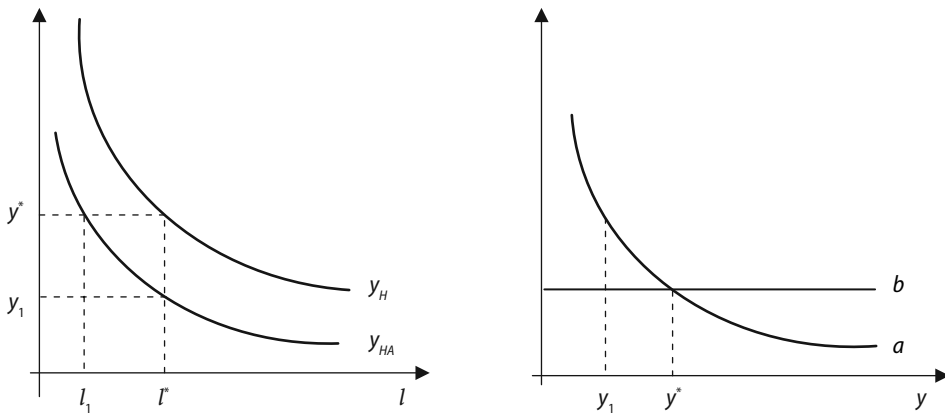
⁶³ A. Johnson, T. Earle, *The evolution of human societies. From foraging group to agrarian state*, Stanford University Press, Stanford (California) 2000, s. 43, 125, 246; R.A. Guzmán, *Life-Work Balance During The Neolithic Revolution*, „Revista Abante” 2007, vol. 10, no. 2, s. 93–125.

⁶⁴ M. Livi-Bacci, op.cit. Przyspieszenie wzrostu liczby ludności w okresie neolitu było na tyle znaczącym historycznym wydarzeniem, iż w literaturze przedmiotu nosi nazwę neolitycznego przejścia demograficznego. Szerzej o tym doniosłym zjawisku w: *The Neolithic Demographic Transition and its Consequences*, red. J.-P. Bocquet-Appel, O. Bar-Yosef, Springer, New York 2008.

Żyznego Półksiężycza (Bliski Wschód, około 11 tys. lat temu), południowy wschód Ameryki Północnej (około 4–3 tys. lat temu), Ameryka Środkowa (centralne regiony obecnego Meksyku, około 5–4 tys. lat temu), w dolinach rzek Jangcy i Żółtej Rzeki (obecne południowo-wschodnie Chiny, około 9 tys. lat temu), północny wschód Ameryki Południowej (dzisiejsze Peru, około 5–4 tys. lat temu), rejon Afryki Subsaharyjskiej (około 5–4 tys. lat temu), Nowa Gwinea (około 9–6 tys. lat temu). Z tych rejonów rozpoczęła się ekspansja ludności rolniczej na sąsiednie regiony, które charakteryzowały się wolnymi obszarami pod uprawy rolne. Oznacza to, że te pierwotne regiony rolnictwa charakteryzowały się brakiem równowagi między ścieżką ludnościową a produkcją. Zamieszkiwały je zatem ekspansywne lokalne społeczności. Efekty z *learning by doing* w rolnictwie były na tyle silne, że osiągnięta produkcja żywności podtrzymywała dodatnią stopę przyrostu naturalnego. Migracje ludności rozpowszechniły rolnictwo z tych pierwotnych regionów na pozostałe obszary⁶⁵. Mniej więcej 2–2,5 tys. lat temu produkowanie żywności stało się dominującą techniką pozyskiwania żywności na całym globie.

Załóżmy, że wszystkie lokalne społeczności myśliwsko-zbierackie są w równowadze ($u = z = 0$). Natomiast społeczności, które przeszły na rolnictwo ($\beta = 1$) mają cechy ekspansywne. Gdy przybywają na tereny zasiedlone przez myśliwych-zbieraczy, przejmują część ziemi pod uprawy i pastwiska. Wcześniej czy później powoduje to zmniejszenie ilości dostępnej żywności dla lokalnej społeczności myśliwsko-zbierackiej. Ilustruje to przesunięcie wykresu funkcji produkcji żywności z y_H na y_{HA} (rys. 4.6). Powoduje to dramatyczną sytuację ludnościową tej społeczności, gdyż przy danej gęstości zaludnienia l^* spada poziom ilości żywności przypadającej na mieszkańca do y_1 . To z kolei pociąga za sobą powstanie ujemnej stopy przyrostu naturalnego. Myśliwi-zbieracze zaczynają wymierać. Proces ten może ulec przyspieszeniu, gdyż napływowa ludność rolnicza charakteryzuje się dodatnim przyrostem naturalnym dzięki wyższej produktywności rolnictwa. Oczywiście rdzenna lokalna społeczność może podjąć kroki zaradcze. Może to być migracja na inne tereny, ale jest to mało skuteczny sposób, gdyż z powodu ekspansji rolników zmniejszają się tereny, na których można prowadzić gospodarkę myśliwsko-zbieracką. Ratunkiem może być nauczenie się produkcji żywności. To wzmacnia siłę ekspansji rolnictwa.

⁶⁵ Rozprzestrzenianie się rolnictwa odbywało się nie tylko w wyniku ekspansji ludności o umiejętnościach rolniczych. Mogło być też tak, że myśliwi-zbieracze nabywali żywy inwentarz i zboża od społeczności rolniczych i sami zaczęli produkować żywność. Zob. J. Diamond, *Evolution, consequences and future of plant and animal domestication*, „Nature” 8.08.2002, vol. 418, s. 700–707.



Rysunek 4.6. Napływ ludności rolniczej na tereny zamieszkałe przez społeczności myśliwsko-zbierackie

Z dotychczasowych rozważań wypływa jeden fundamentalny wniosek. Powstanie rolnictwa było wynikiem splotu kilku dosyć niezwykłych okoliczności mających głównie demograficzne podstawy. Lokalne społeczności o ekspansywnych cechach zasiedliły w paleolicie wszystkie dostępne kontynenty (oprócz Antarktydy). To stanowiło konieczny warunek wprawienia w ruch zmian, które zapoczątkowały zadziwiającą sekwencję zdarzeń w rozwoju ludzkości. Z jednej strony efektem utrzymującego się stan nierównowagi pomiędzy rozwojem ludności a zdolnością ekosystemów do samoodnowy był wzrost gęstości zaludnienia, co z kolei implikowało wzrost postępu technicznego. Z drugiej strony, dzięki tej samej presji ludnościowej, lokalne społeczności znalazły się w tych miejscach, które zawierały składniki możliwe do udomowienia. Splot tych dwóch okoliczności stworzył podwaliny pod powstanie rolnictwa. Po prostu rosnąca gęstość zaludnienia w regionach o składnikach możliwych do udomowienia powodowała spadek produktywności myślistwa-zbieractwa poniżej produktywności rolnictwa. To stworzyło ostatecznie warunki do rozwoju rolnictwa. Z kolei rozwój tego sektora wtórnie wpływał na procesy demograficzne poprzez powiązanie produkcji żywności ze stopą umieralności oraz związek stopy urodzeń ze stopniem mobilności lokalnej społeczności. Rosła stopa umieralności, ale dzięki postępowi technicznemu w samym sektorze rolnym w pierwszych regionach rolnych utrzymał się ekspansywny charakter lokalnych społeczności. To dało początek niezwykle ważnej zmianie w dziejach ludzkości: rozprzestrzenienie się technik rolnych niemal na całym globie.

Jednak szereg parametrów zjawisk demograficznych jest wyznaczanych poza systemem pozyskiwania pożywienia i pojawienia się osiadłego trybu życia. Do takich

parametrów należą: naturalne zdolności ludzkiego organizmu do obrony przed chorobami zakaźnymi, rodzaj zarazków i pasożytów zagrażających człowiekowi, dostęp do ujęć czystej wody pitnej, wzrost dzietności kobiet w wyniku skrócenia okresu laktacji, spadek płodności w wyniku chorób endemicznych, takich jak malaria i choroby weneryczne. Wszystko to powodowało, że przesunięcia punktów równowagi ludności i produkcji w okresie przechodzenia do rolnictwa mogły, ale nie musiały być ze sobą zgodne. Inaczej mówiąc, przywracanie równowagi w produkcji poprzez zmianę proporcji pomiędzy sektorami może, ale nie musi zbiec się ze zrównaniem stopy urodzeń ze stopą wymieralności. To powoduje, że nie ma uniwersalnego ekonomicznego schematu przejścia do rolnictwa. Może być tak, że niektóre lokalne społeczności nigdy nie wkroczą na drogę transformacji, gdyż krańcowa produktywność myślistwa-zbieractwa jest zawsze wyższa od potencjalnej krańcowej produktywności rolnictwa (zostały wyczerpane możliwości postępu technicznego w ramach myślistwa-zbieractwa i nie ma bodźców do dalszego rozwoju postępu technicznego). Może również wykształcić się gospodarka mieszana, tylko częściowo oparta na produkcji żywności, jak na przykład ogrodnictwo lub pasterstwo połączone z myślistwem-zbieractwem.

Rozdział 5

Zmienność klimatu a postęp techniczny

Pozostaje niewyjaśniony jeden istotny element dotyczący prapoczątków rolnictwa. Dlaczego pojawiło się ono tak późno? Jeśli, jak twierdzą archeolodzy, ludzki umysł, zdolny do takiej samej ekspresji jak współczesny, ukształtował się mniej więcej 70 tys. lat temu⁶⁶, to dlaczego trzeba było czekać prawie kolejne 60 tys. lat, aby dokonać przełomu w postaci nabycia umiejętności wytwarzania żywności i porzucenia myślistwa-zbieractwa. Intrygujące jest również to, że w stosunkowo niewielkim odstępie czasu, rolnictwo powstało na wszystkich zasiedlonych kontynentach. Tak jakby nastąpił globalny światowy wstrząs kierujący lokalne społeczności ku rolnictwu. Prostim wyjaśnieniem byłaby odpowiedź, że *homo sapiens* tak długo docierał do regionów zawierających składniki nadające się do udomowienia. Jednak na Bliskim Wschodzie, gdzie rolnictwo zaczęło się najwcześniej – około 12 tys. lat temu, ludzie byli już 50 tys. lat temu. Dlaczego tak długo „ociągali się” z wprowadzeniem rolnictwa?

Nie ulega wątpliwości, że pierwotnym czynnikiem wyzwalającym zmianę techniczną są wrodzone zdolności poznawcze *homo sapiens*, które warunkują jego racjonalne zachowania. Niepodważalnie podstawą tych procesów myślowych są różnego rodzaju chemiczne i elektryczne impulsy przekształcane przez komórki mózgowie w to, co nazywamy świadomością. Nie ulega również wątpliwości, że jedną z najistotniejszych pobudek myślenia symbolicznego była epokowa zmiana – kiedy człowiek zaczął posługiwać się mową. Konstruowanie zdań wymaga tworzenia i wyrafinowanego przekształcania symboli w umyśle. Jednak umiejętności tych używamy wybiórczo, oszczędnie, gdy są nam potrzebne do rozwiązania napotykanych problemów. Na przykład, gdy wzrosła gęstość zaludnienia na danym terytorium, aby wyróżnić członków swojej społeczności, ciało malowano w określony sposób różnymi kolorami. Jednak gdy spadła gęstość zaludnienia, zrezygnowano z nakładania barw⁶⁷. Potrzebne są bodźce środowiskowe wprawiające w ruch procesy poznawcze, sprawiające, że ludzkie myślenie zmierza do pokonania napotkanych

⁶⁶ Zob. K. Wong, op.cit.; S. McBrearty, A.S. Brooks, op.cit., s. 453–563; A. Bouzougar et al., op.cit.

⁶⁷ K. Wong, op.cit.

trudności. W naszych dotychczasowych rozważaniach pojawienie się postępu technicznego zależało od czynnika demograficznego, a mianowicie od stopy przyrostu naturalnego różnej od zera. Skłaniało to ludzi do rozszerzania swojej diety, a to z kolei pociągało za sobą zmiany w narzędziach i instrumentach służących do pozyskania i przechowywania żywności. Powstaje jednak fundamentalne pytanie, co mogło powodować zmiany w stopie przyrostu naturalnego? Takim kluczowym czynnikiem mogła być duża zmienność klimatu.

Podczas epoki zwanej plejstoceniem⁶⁸, na który przypada ewolucja hominidów, klimat na Ziemi był, ogólnie rzecz biorąc, w fazie oziębienia. Temperatury były na tyle niskie i opady śniegu na tyle obfite, że znaczne obszary północnej półkuli pokrywał lodowiec. Północne rejony dzisiejszej Europy, Ameryki i Zachodniej Syberii były obszarem skutym grubą warstwą lodu. Przy czym lodowiec na przemian rozszerzał się ku południu przez kilkadziesiąt tysięcy lat, po czym cofał się w wyniku ocieplenia trwającego kilkanaście tysięcy lat. Zatem klimat w okresie plejstocenu charakteryzował się dużą zmiennością.

Pojawienie się *homo sapiens* przypada na dwa okresy zlodowacenia Ziemi. Były one przedzielone krótkotrwałym interwałem ocieplenia zwanym interglacjałem eemskim. Rozpoczął się on około 127 tys. lat temu i zakończył się mniej więcej 118 tys. lat temu (w Europie 106 tys. lat temu)⁶⁹. Wówczas średnia temperatura powietrza była około 1–2°C wyższa niż obecnie. Ocieplenie było na tyle duże, że na terenie obecnej Anglii żyły hipopotamy i inne tropikalne zwierzęta, o czym świadczą znajdowane dzisiaj skamieniałości⁷⁰. Po ociepleniu eemskim nastąpił ostatni okres lodowcowy, który zakończył się około 11,5 tys. lat temu i nastąpiła epoka stabilnego ocieplenia zwana holocenem, która trwa do dziś.

Generalnie klimat ostatniej epoki lodowcowej był zimniejszy niż w interglacjałe eemskim i obecnej epoce holocenu. Charakteryzował się jednak ogromną zmiennością⁷¹. Miały miejsce gwałtowne przejścia od zimnych faz do ciepłych, trwających od kilkuset do paru tysięcy lat. Amplituda temperatur wynosiła około 20°C. Fazy oziębienia były równocześnie suche i wietrzne. Zmniejszały się obszary leśne, powiększały sawanny, tundry i pustynie, obniżał się poziom oceanów. W okresach ocieplenia klimatu zwiększały się opady, sawanny, tundry i pustynie kurczyły się

⁶⁸ Czwartorzęd rozpoczął się około 2,5 mln lat temu i trwa do dziś. Dzieli się na dwie epoki: plejstocen (od 2,5 mln do 11,5 tys. lat temu) oraz holocen (od 11,5 tys. do dziś).

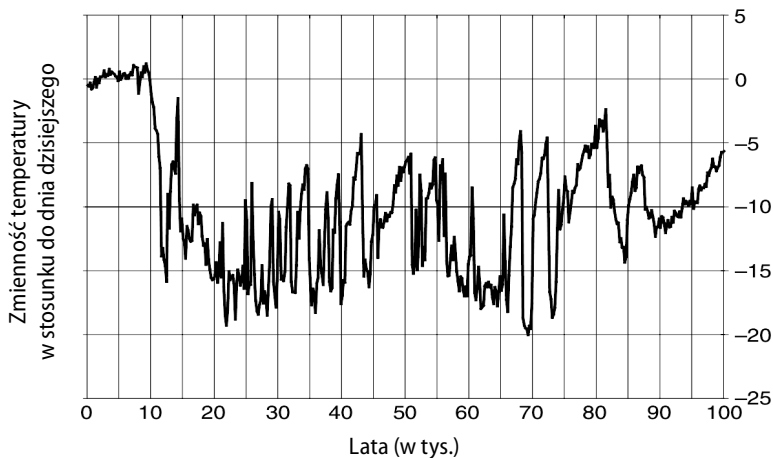
⁶⁹ A. Uriarte, *Earth's Climate History*, Kindle Edition, 2011.

⁷⁰ Ibidem.

⁷¹ Literatura o historii klimatu jest niezwykle obszerna. Zob. między innymi: W.J. Burroughs, *Climate Change in Prehistory. The End of the Reign of Chaos*, Cambridge University Press, Cambridge–New York 2005; R. Hetherington, R.G.B. Reid, *The Climate Connection. Climate Change and Modern Human Evolution*, Cambridge University Press, New York 2010; A. Uriarte, op.cit.

na korzyść rozrastających się lasów, podnosił się poziom oceanów. Znaczne obszary wybrzeży lądów były odkrywane i ponownie zalewane.

Około 19 tys. lat temu rozpoczyna się ocieplenie klimatu, które prowadzi do powolnego stopienia lodowców pokrywających lądy. Proces ten kończy się mniej więcej 8 tys. lat temu i obszar lodowców zajmował wówczas powierzchnię zbliżoną do współczesnych rozmiarów. Ocieplenie klimatu zostaje gwałtownie przerwane około 12,9 tys. lat temu przez raptowne oziębienie klimatu, które również niezwykle szybko – po 1300 latach – kończy się równie gwałtownym wzrostem temperatur. Ten okres powrotu oziębienia został nazwany młodszym dryasem. Jego zakończenie (około 11,6 tys. lat temu) uznaje się za datę rozpoczęcia nowej epoki w ramach czwartorzędu, a mianowicie holocenu. Charakteryzuje się on nie tylko wyższą średnią temperaturą i wyższymi opadami niż w plejstocenie, lecz także niezwykle wprost stabilnością klimatu w porównaniu z epoką ostatniego zlodowacenia. Oczywiście pojawiają się fluktuacje klimatu. Są one jednak relatywnie niewielkie (zob. rys. 5.1).



Rysunek 5.1. Zmienność temperatury w ciągu ostatnich 100 tys. lat

Źródło: W.J. Burroughs, *Climate Change in Prehistory. The End of the Reign of Chaos*, Cambridge University Press, New York 2005, s. 6.

Zmienność klimatu powodowała niestabilność zasobów lokalnych ekosystemów, które na przemian zmieniały skład i pojemność swojej biomasy. Interesujące jest pytanie, jak taka niestabilność ekosystemów wpływała na dynamikę przyrostu naturalnego i ostatecznie na dynamikę produkcji na mieszkańca w lokalnych ekosystemach.

Na potrzeby niniejszej analizy zdefiniujmy pojęcie „wstrząs klimatyczny”. Zakładamy, że wstrząs klimatyczny to gwałtowna zmiana klimatu, która trwa przez pewien odcinek czasu, i równie gwałtownie się kończy z powodu wystąpienia kolejnego wstrząsu o przeciwnym charakterze. Nie ma okresów jego stopniowego narastania, jak i okresów stopniowego wygasania. Przyjmujemy również, że wstrząs klimatyczny ma charakter globalnej (we wszystkich regionach geograficznych równocześnie) zmiany warunków pogodowych, które wpływają na zasoby ekosystemu w każdym lokalnym regionie. Przy czym zakładamy, że potencjał żywieniowy ekosystemu (\bar{A}) nie zmienia się, czyli liczba możliwych do odkrycia składników pozostaje stała. Przy tych założeniach wstrząs klimatyczny wpływa na zasoby ekosystemu poprzez zmianę rozmiaru dobra pośredniego x_i . Jaki wywrze to wpływ na ilość żywności przypadającej na mieszkańca?

Założmy, tak jak poprzednio, że x_i jest stałe dla każdego zastosowania i równe \bar{x} przed wstrząsem klimatycznym, natomiast po wstrząsie \tilde{x} . Gwałtowne zmiany klimatyczne prowadzące do ocieplenia będziemy nazywali krótko wstrząsami pozytywnymi, natomiast wywołujące oziębienie – wstrząsami negatywnymi. Dla tego pierwszego będzie zachodzić $\bar{x} < \tilde{x}$, a dla drugiego $\bar{x} > \tilde{x}$. Ilość żywności przypadającej na mieszkańca przed danym wstrząsem klimatycznym można zapisać jako:

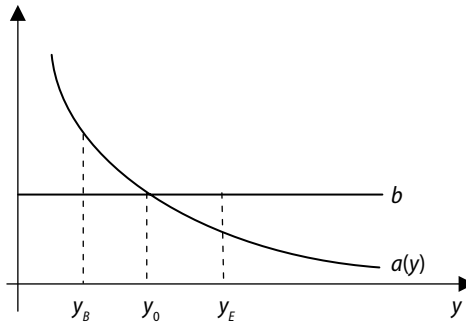
$$\bar{y} = A\bar{A}^{\alpha-1} \left(\frac{L}{A\bar{x}} \right)^{\alpha-1} = A \left(\frac{L}{\bar{x}} \right)^{\alpha-1}. \quad (5.1)$$

Po wstrząsie klimatycznym jest ona równa:

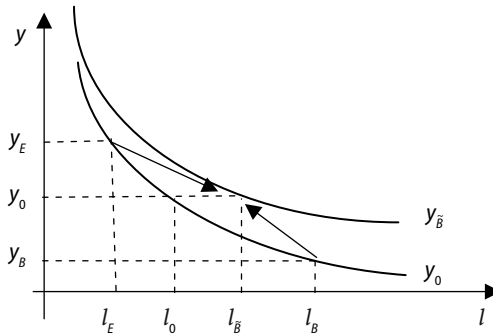
$$\tilde{y} = A \left(\frac{L}{\tilde{x}} \right)^{\alpha-1}. \quad (5.2)$$

Z porównania tych dwóch poziomów żywności wynika, że wstrząs negatywny obniża gwałtownie poziom żywności: $\bar{y} > \tilde{y}$. Natomiast pozytywny przynosi poprawę warunków życia: $\bar{y} < \tilde{y}$.

Założmy, że mamy do czynienia z negatywnym wstrząsem klimatycznym i lokalna społeczność znajduje się w stanie długookresowej równowagi ($u = 0$). Spadek ilości żywności przypadającej na mieszkańca, w wyniku wstrząsu klimatycznego, wywiera wpływ na stopę przyrostu naturalnego. Staje się ona ujemna. Na rysunku 5.2 tę sytuację ilustruje stopa przyrostu naturalnego dla obniżonego poziomu żywności na mieszkańca do y_B . Równocześnie zmniejszenie zasobów ekosystemu, przy jeszcze niezmienionej liczbie ludności, prowadzi do wzrostu gęstości zaludnienia w danej lokalnej społeczności do poziomu l_B (rys. 5.3).



Rysunek 5.2. Stopa przyrostu naturalnego po wstrząsie



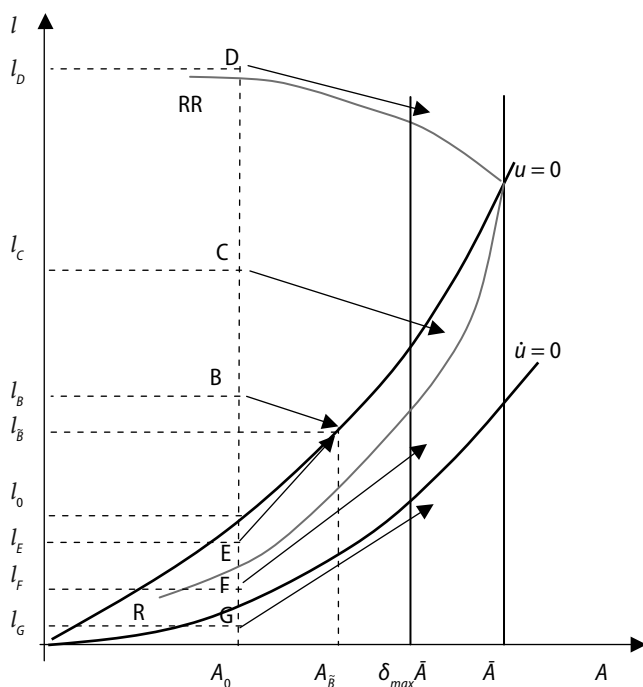
Rysunek 5.3. Poziom żywności i gęstość zaludnienia po wstrząsie klimatycznym

Opis: Krzywa y_0 jest dla wyjściowego poziomu techniki A_0 , natomiast y_B dla stanu ustalonego (A_B, l_B) .

Dalsza dynamika lokalnej społeczności kształtuje się według opisu prezentowanego w rozdziale 3 o postępie technicznym. Przypomnijmy, że możliwe ścieżki ewolucji zależą od głębokości spadku stopy przyrostu naturalnego. Możemy wyróżnić dwa przypadki. Pierwszy, gdy trajektoria ruchu lokalnej społeczności nie napotyka na swej drodze bariery samoodnowy ekosystemu. W drugim, kiedy na taką barierę trafia.

W pierwszym przypadku wystąpi nieznaczny spadek stopy przyrostu naturalnego. Gęstości zaludnienia wzrosną nieznacznie, na przykład do poziomu l_B (rys. 5.4). Lokalna społeczność zostaje wytrącona ze stanu długookresowej równowagi. Znajduje się teraz w punkcie B , który leży nieznacznie powyżej linii równowagi $u = 0$, czyli w zbiorze punktów startowych uruchamiających ścieżkę ruchu postępu technicznego i gęstości zaludnienia biegnącą ku stanowi ustalonemu leżącemu na linii

równowagi $u = 0$. Aby ostatecznie tak się stało, bariera samoodnowy ekosystemu musi znajdować się dostatecznie daleko. Na rysunku 5.4 ilustruje to pionowa linia $\delta_{\max} \bar{A}$, która jest liczbą odkrytych i zużytych elementów ekosystemu, które przyroda jest w stanie samodzielnie odtworzyć. Wówczas w lokalnej społeczności nastąpi wzrost poziomu techniki z A_0 do $A_{\bar{B}}$ i wzrost gęstości zaludnienia z l_0 do $l_{\bar{B}}$. Poziom ilości żywności przypadającej na mieszkańca powróci do wyjściowego poziomu y_0 sprzed wstrząsu klimatycznego. Inaczej mówiąc, cały efekt negatywnego wstrząsu, który uruchomił postęp techniczny, znajdzie odzwierciedlenie we wzroście gęstości zaludnienia, a nie w poziomie życia.



Rysunek 5.4. Dynamika lokalnej społeczności po wstrząsie klimatycznym

Wzrost gęstości zaludnienia, w porównaniu punktem wyjściowym sprzed wstrząsu klimatycznego, mimo spadku liczby ludności w danym obszarze, jest prosty do wyjaśnienia. Istnieją dwa źródła ponownego wzrostu ilości żywności przypadającej na mieszkańca: postęp techniczny i spadek gęstości zaludnienia z poziomu po wstrząsie klimatycznym. Gdyby nie było postępu technicznego, to w wyniku wymarcia części populacji gęstość zaludnienia spadłaby z $l_{\bar{B}}$ do wyjściowego poziomu l_0 . To zapewniłoby powrót do początkowego poziomu ilości

żywności y_0 . Jednak postęp techniczny również zapewnia zwiększenie ilości żywności, co przyspiesza poprawę wyżywienia przy danej liczbie ludności. Dzięki temu odbudowa poziomu wyżywienia nie wymaga spadku gęstości zaludnienia aż do l_0 .

W drugim przypadku spadek stopy przyrostu naturalnego jest na tyle głęboki, że ścieżka dojścia do stanu ustalonego, leżącego na linii równowagi $u = 0$, wydłuża się w takim stopniu, iż na jej drodze pojawia się bariera samoodnowy ekosystemu. Są to punkty startowe leżące ponad linią RR lub poniżej niej, ale w jej pobliżu. Na rysunku 5.4 ilustrują to punkty C i D, którym odpowiada wzrost gęstości zaludnienia do l_C i l_D . Startując z jednego bądź drugiego punktu lokalna społeczność, zwiększając postęp techniczny, wcześniej czy później musi napotkać barierę samoodnowy ekosystemu. Pojawienie się tej bariery ma miejsce, gdy stopa przyrostu naturalnego nadal jest ujemna. Lokalna społeczność zmierza zatem nieuchronnie do stanu równowagi charakteryzującej się $u = 0$ i $l = 0$, czyli po prostu do wymarcia. Aby się przed tym uchronić, część lokalnej społeczności może wyemigrować na sąsiednie tereny. Wówczas spadek gęstości zaludnienia zwiększyłby produktywność pracy. Dzięki temu zwiększyłyby się ilości żywności przypadającej na mieszkańca, co doprowadziłoby do spadku współczynnika umieralności do poziomu umożliwiającego stabilizację stopy przyrostu naturalnego na zerowym poziomie. Lokalna społeczność powróciłaby do długookresowej równowagi. Jeśli jednak wstrząs klimatyczny byłby tak głęboki, iż migracja nie stabilizowałaby stopy przyrostu naturalnego, to w poszukiwaniu nowych terenów łowieckich musiałyby się udać cała lokalna społeczność. Gdyby w innych regionach również nastąpił duży spadek zasobów ekosystemów, to na znacznych obszarach populacji ludzkiej groziłoby wymarcie, zanim schroniłaby się w regionach, gdzie ustabilizowałaby się stopa przyrostu naturalnego. Istotne jest jednak to, że ta garstka ocalałych, zmagając się z przyrodą, aby pozyskać nowe składniki diety, zakumulowałaby nową wiedzę o ekosystemie. Ta nowa wiedza mogłaby stanowić korzystny punkt startu w okresie kolejnej fazy łagodniejszego klimatu.

Założmy teraz, że mamy do czynienia z pozytywnym wstrząsem klimatycznym, a lokalna społeczność znajduje się w stanie długookresowej równowagi ($u = 0$). Wzrost ilości żywności przypadającej na mieszkańca sprawia, że pojawia się dodatnia stopa przyrostu naturalnego. Na rysunku 5.2 ilustruje to stopa przyrostu naturalnego dla podwyższonego poziomu ilości żywności przypadającej na mieszkańca do y_E . Równocześnie powiększenie zasobów ekosystemu prowadzi do spadku gęstości zaludnienia w danej lokalnej społeczności do poziomu l_E (rys. 5.3).

Podobnie jak w przypadku negatywnego wstrząsu klimatycznego możemy wyróżnić dwa przypadki dalszej trajektorii ruchu lokalnej społeczności w zależności od pojawienia się na jej drodze bariery samoodnowy ekosystemu.

W pierwszym przypadku mamy do czynienia z niewielkim wzrostem stopy przyrostu naturalnego. Gęstość zaludnienia spadnie w niewielkim stopniu (do poziomu l_E na rys. 5.4). Lokalna społeczność znajduje się teraz w punkcie E, który leży powyżej linii R, czyli w zbiorze punktów startowych uruchamiających trajektorię ruchu postępu technicznego (A) i gęstości zaludnienia (l). Trajektorja ta ostatecznie ponownie prowadzi do stanu ustalonego na linii równowagi⁷² $u = 0$. Dla uproszczenia na rysunku 5.4 stan ustalony wystąpi dla poziomu techniki A_B i gęstości zaludnienia l_B . Ponieważ stopa przyrostu naturalnego jest równa zero dla y_0 , to nowy stan ustalony oznacza powrót do wyjściowego poziomu życia. Również w tym przypadku postęp techniczny ostatecznie wpływa tylko na wzrost gęstości zaludnienia.

W drugim przypadku wzrost stopy przyrostu naturalnego jest zdecydowanie wyższy niż w pierwszej sytuacji. Lokalna społeczność znajduje się poniżej linii R (na przykład w punkcie F lub G). Każdy punkt startowy poniżej linii R charakteryzuje się tym, iż społeczność na swojej drodze musi napotkać barierę samoodnowy środowiska. Ponadto punkty poniżej linii $u = 0$ charakteryzują się dodatnią i rosnącą stopą przyrostu naturalnego. Zatem w momencie, kiedy społeczność lokalna dociera do bariery samoodnowy ekosystemu, ma ona dodatni przyrost naturalny. Tworzy to presję na zużycie ekosystemu, który traci zdolność do samoodnowy ($\gamma > \delta_{\max}$). Zacznie spadać potencjał żywieniowy. To pociągnie za sobą spadek ilości żywności przypadającej na mieszkańca. Efekt spadku ilości żywności przypadającej na mieszkańca będzie wzmocniony przez równoczesny wzrost gęstości zaludnienia. Jest on wynikiem dodatniego przyrostu naturalnego oraz spadku zasobów ekosystemu⁷³. Lokalna populacja zmierzałaby do wymarcia w wyniku wyeksploatowania zasobów. Rozwiązaniem w tej sytuacji była migracja lokalnej społeczności do innych regionów.

Obok migracji również same wstrząsy klimatyczne były dodatkowym kluczowym czynnikiem „wspomagającym” rozwiązywanie problemu ograniczeń zasobowych. Gdy po pozytywnym wstrząsie klimatycznym lokalna społeczność znalazła się na ścieżce prowadzącej ku barierze samoodnowy ekosystemu, ścieżka ta mogła być przerwana przez pojawienie się negatywnego wstrząsu. Wówczas

⁷² Punkt startowy może znajdować się powyżej linii R i mimo to lokalna społeczność może dojść do bariery samoodnowy ekosystemu. Mogłoby tak być, gdyby punkt startowy znajdował się blisko bariery $\delta_{\max} A$. Wówczas trajektorja ruchu punktów (A, l) mogłaby być przecięta przez barierę samoodnowy ekosystemu (podobnie jak z ruchem z punktu C). Wówczas lokalna społeczność nie osiągnęłaby stanu ustalonego na linii $u = 0$.

⁷³ Gęstość zaludnienia mierzymy stosunkiem liczby ludności do zasobów ekosystemu: $l = \frac{L}{A\bar{x}}$. Z tej definicji wynika, że spadek zasobów ekosystemu i wzrost ludności powiększa gęstość zaludnienia.

lokalna społeczność gwałtownie przechodzi z dodatniego przyrostu naturalnego do ujemnego. Z kolei w warunkach negatywnego wstrząsu lokalna społeczność podejmowała decyzje o częściowej lub całkowitej migracji. Ten ostatni przypadek miał zapewne miejsce, gdy wstrząs był tak silny, że lokalny ekosystem nie nadawał się do dalszego zamieszkiwania i pozostanie w jego obszarze groziło wymarciem. Negatywny wstrząs zmuszał zatem do fragmentacji lokalnej społeczności i do wędrówek część lokalnej społeczności lub nawet całą lokalną społeczność w poszukiwaniu nowych, lepszych terenów do pozyskiwania żywności. Można wobec tego przyjąć, że negatywny wstrząs był raczej związany z migracjami niż pobudzaniem postępu technicznego⁷⁴. Lokalne społeczności rozprasały się po nowych obszarach, najprawdopodobniej wiele z nich wymierało⁷⁵. Te natomiast, które przetrwały, musiały zapewne dzielić terytoria z innymi grupami. Takie trudne warunki klimatyczne były najprawdopodobniej okresem wzajemnej wymiany idei i narzędzi oraz współpracy przy rozwiązywaniu problemów z pozyskaniem żywności⁷⁶. Natomiast pozytywny wstrząs, poprzez wywołanie dodatniego przyrostu naturalnego, prowadził ostatecznie do wzbudzenia postępu technicznego, koniecznego, aby wyżywić rosnącą populację w danym lokalnym ekosystemie. Będąc na ścieżce postępu technicznego (ścieżki poniżej linii równowagi $u = 0$) lokalna społeczność mogła dotrzeć do bariery samoodnowy ekosystemu (linia $A = \delta_{\max} \bar{A}$) albo ścieżka ta mogła być przerwana przez pojawienie się wstrząsu klimatycznego o przeciwnym charakterze. W jednym i drugim przypadku ponownie dochodziło do migracji. Istotne jest również to, iż kolejna ekspansja ludności miała miejsce po okresie współdziałania lokalnych grup w trudnych warunkach środowiskowych. Lokalne grupy miały zatem prawdopodobnie podobną wiedzę techniczną i dzięki wymianie – podobne wyposażenie w narzędzia. Można powiedzieć, że w okresie oziębienia klimatu rosła globalna akumulacja postępu technicznego, tworząc wyrównany kolejny punkt startu dla wszystkich lokalnych grup. Najprawdopodobniej taka wymiana doświadczeń sprzyjała powstawaniu nowych idei, które mogły się urzeczywistnić w sprzyjających warunkach środowiskowych w okresie względnego ocieplenia klimatu.

⁷⁴ Na niejednoznaczność migracji jako przejaw postępu technicznego zwracają również uwagę: Gregory K. Dow, Clyde G. Reed. Zob. G.K. Dow, C.G. Reed, *Stagnation and innovation...*, op.cit.

⁷⁵ Jeden z najbardziej dotkliwych negatywnych wstrząsów klimatycznych miał miejsce po wybuchu wulkanu Toba około 71 tys. lat temu. Spowodowane tym wybuchem oziębienie klimatu, zwane zimą wulkaniczną, pociągnęło za sobą dramatyczny spadek populacji *homo sapiens*. Zob. S.H. Ambrose, *Did the super-eruption of Toba cause a human population bottleneck? Reply to Gathorne-Hardy and Harcourt-Smith*, „Journal of Human Evolution” 2003, vol. 45, s. 231–237.

⁷⁶ Na możliwe współdziałanie lokalnych społeczności w okresach niekorzystnych warunków klimatycznych zwraca uwagę Stanley H. Ambrose. Zob.: ibidem; S.H. Ambrose, *Chronology of the Later Stone Age and Food Production in East Africa*, „Journal of Archaeological Science” 1998, vol. 25.

Właśnie z takimi naprzemiennymi zmianami klimatu, prowadzącymi do okresowych migracji i ekspansji postępu technicznego, wiąże się fenomen zasiedlenia wszystkich kontynentów w okresie ostatniego zlodowacenia przez niewielką liczebnie populację *homo sapiens*. Byliśmy nieliczni, ale bardzo ruchliwi i w miarę upływu czasu coraz bardziej zdolni do elastycznego dostosowywania się do zmiennych warunków środowiskowych. Przemieszczanie się było ułatwione dzięki obniżonemu poziomowi oceanów w okresach oziębienia, co otwierało liczne przejścia między lądami.

Nieprzypadkowo zatem okres niezwykle wzmożonej ekspansji terytorialnej oraz znaczącego przyspieszenia technologicznego w historii *homo sapiens* przypada na fazę wysoce niestabilnego klimatu w okresie 60–12 tys. lat temu (zob. rys. 5.1). Ta dość długa faza (choć jest to tylko część ostatniego okresu zlodowacenia) charakteryzowała się relatywnie wysoką częstotliwością zmienności temperatury, opadów i wiatrów. Szczególnie przedział 60–30 tys. lat temu cechował się dużą zmiennością klimatu w tysiącletnich przedziałach czasu. Lata 30–12 tys. charakteryzowały się mniejszą zmiennością warunków pogodowych. Był to natomiast czas najwyższych spadków temperatury podczas ostatniego zlodowacenia⁷⁷ i tym samym największego zasięgu lądolodu. Suchy klimat tego okresu spowodował, że poziom wód w oceanach był wtedy najniższy (około 120 metrów poniżej obecnego poziomu), co otworzyło liczne przejścia lądowe (między innymi połączenie Azji z Ameryką Północną). Równocześnie był to okres schyłku ostatniej epoki lodowcowej z fazą silnego ocieplenia prowadzącą do stabilnego klimatu w holocenie.

Takie gwałtowne i intensywne oscylacje klimatu, generując zmiany środowiskowe, permanentnie wytrącały lokalne społeczności ze stanów równowagi. Okresy oziębienia zmuszały do migracji do regionów o korzystniejszych warunkach środowiskowych i były fazą wyrównywania poziomu wiedzy między lokalnymi grupami. Natomiast okresy ocieplenia tworzyły presję na postęp techniczny poprzez wzrost gęstości zaludnienia. Pierwszym efektem dodatniego wstrząsu klimatycznego była zmiana stopy przyrostu naturalnego, która następnie wprawiała w ruch postęp techniczny jako niezbędne narzędzie dostosowania się do zmienionych warunków⁷⁸. Postęp techniczny wzmacniał tendencję wzrostu gęstości zaludnienia. Tendencja ta mogła być przerwana przez negatywny wstrząs klimatyczny lub mogła być źródłem następnych fal migracyjnych, gdy dynamika gęstości zaludnienia powodowała wyczerpanie lokalnych zasobów żywnościowych.

⁷⁷ W okresie ostatniego zlodowacenia najniższa temperatura wystąpiła około 22 tys. lat temu.

⁷⁸ Wzrost ludności poprzedzający postęp techniczny potwierdzają badania archeologiczne. Zob. M.C. Stiner et al., *Paleolithic Population Growth Pulses Evidenced by Small Animal Exploitation*, „Science” 1999, vol. 283, no. 5399, s. 190–194.

Takie częste oscylacje klimatu, wymuszając adaptacyjne zachowania u *homo sapiens* do zmiennych warunków środowiskowych, przesunęły granice możliwości technicznych i dzięki temu tworzyły podstawę do dalszej ekspansji ludności i przyspieszenia postępu technicznego w tych trudnych warunkach klimatycznych w okresie 60–12 tys. lat temu. Tak więc to nie postęp techniczny, co sugerował wynik dociekań z rozdziału 3, był pierwotną siłą sprawczą rozproszenia się *homo sapiens* po wszystkich kontynentach w poszukiwaniu nowych rejonów do zamieszkania, ale najprawdopodobniej gwałtowne zmiany klimatu w okresie ostatniego zlodowacenia. Postęp techniczny był tylko przejawem naszych zdolności adaptacyjnych uruchamianych w kolejnych wstrząsach klimatycznych. Zdolności te tak się rozwinęły w okresie 60–30 tys. lat temu, że gdy nadszedł najzimniejszy okres ostatniego zlodowacenia 30–18 tys. lat temu, przetrwaliśmy go jako gatunek bez tak silnego spadku liczebności populacji, jaki miał miejsce w okresie wybuchu wulkanu Toba (około 71 tys. lat temu). Zmiany klimatyczne (w tym silny spadek temperatury) spowodowane tym wybuchem zdziesiątkowały populację *homo sapiens*⁷⁹.

W okresie silnych oscylacji klimatu na niespotykaną wcześniej skalę zwiększyła się różnorodność powszechnie stosowanych narzędzi kamiennych, z kości i rogów zwierząt, o najróżniejszym przeznaczeniu (na przykład: noże, dłuta, szydła, skrobaczki, łuki i strzały, dzidy miotane, bumerangi, przyrządy do mielenia i ubijania, naczynia do przechowywania żywności). Wzrosły umiejętności w zakresie ochrony przed zimmem – wytwarzano odzienie i budowano proste siedziby. Również w tym czasie nasz gatunek wyruszył do wschodniej Azji, na Nową Gwineę, Filipiny, do Australii, Europy, Ameryki Północnej i Południowej⁸⁰. Zasiadliliśmy wszystkie kontynenty i spośród hominidów tylko my przetrwaliśmy do obecnych czasów.

Na przełomie plejstocenu i holocenu (około 12 tys. lat temu), gdy nastąpiło ocieplenie klimatu oraz jego daleko idąca stabilizacja, dokonała się jedna z najważniejszych zmian technologicznych w dziejach ludzkości, a mianowicie pojawiło się rolnictwo. Zasadniczym pytaniem jest, jaki wpływ wstrząs klimatyczny wywarł na powstanie rolnictwa? Jak to się stało, że utorował drogę ku rolnictwu?

Przy danych A , \bar{x} i \bar{A} z warunku na powstanie rolnictwa możemy ustalić graniczne \bar{l}^* , przy którym krańcowa produktywność myślistwa-zbieractwa zrówna się z krańcową produktywnością rolnictwa:

$$\alpha A \bar{A}^{\alpha-1} (\bar{l}^*)^{\alpha-1} = B A^{\mu} \bar{x}. \quad (5.3)$$

⁷⁹ S.H. Ambrose, *Late Pleistocene...*, op.cit., s. 623–651.

⁸⁰ Interesujący syntetyczny opis powiązań między zmianami klimatu a migracjami *homo sapiens* – zob. R. Hetherington, R.G.B. Reid, op.cit., s. 211–234.

Gdy $l < l^*$, to $MPL_A < MPL_H$. Natomiast gdy $l > l^*$, to $MPL_A > MPL_H$. Z (5.3) możemy wyznaczyć graniczną wartość gęstości zaludnienia:

$$l^* = \left(\frac{\alpha}{B\bar{x}A^{1-\alpha}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} A^{\frac{1-\tau\mu}{1-\alpha}}. \quad (5.4)$$

Graniczna wartość gęstości zaludnienia zależy od dwóch kluczowych zmiennych związanych ze wstrząsem klimatycznym: dodatnio wiąże się z postępowaniem technicznym A i ujemnie z rozmiarem dobra pośredniego \bar{x} .

Rozpatrzmy pozytywny wstrząs klimatyczny, który prowadzi do powiększenia dobra pośredniego $\tilde{x} > \bar{x}$. Załóżmy, że wszystkie lokalne społeczności przed wstrząsem znajdowały się w punkcie długookresowej równowagi ($u = 0$). Oznacza to, że wszystkie miały $l' > l$. Przyjrzyjmy się dynamice najlepszego regionu, rozumianego jako ten o najwyższym współczynniku τ , czyli posiadający największą liczbę składników nadających się do udomowienia. W takim regionie graniczna wartość gęstości zaludnienia jest relatywnie najniższa w stosunku do faktycznej gęstości. Jeśli w takim regionie wstrząs nie będzie sprzyjał powstaniu rolnictwa, to będzie tak również w pozostałych gorszych regionach.

Zbadajmy dynamikę faktycznej i granicznej gęstości zaludnienia w momencie pozytywnego wstrząsu szoku. Oznaczmy przez l' i l gęstości graniczną i rzeczywistą po wstrząsie klimatycznym. Wówczas dynamika faktycznej gęstości jest równa:

$$\frac{l'}{l} = \frac{\bar{x}}{\tilde{x}} < 1. \quad (5.5)$$

Natomiast granicznej wynosi:

$$\frac{l'}{l^*} = \left(\frac{\bar{x}}{\tilde{x}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} < 1. \quad (5.6)$$

Jedna i druga gęstość zaludnienia spada. Spadek l^* wynika ze wzrostu krańcowej produktywności rolnictwa. Aby zrównała się z nią krańcowa produktywność myślistwa-zbieractwa, zgodnie ze wzorem (5.3) wymagany jest spadek granicznej wartości zaludnienia. Przy czym z porównania (5.5) i (5.6) wynika, że wartość granicznej gęstości zaludnienia spada szybciej niż faktycznej. Obie gęstości na pewno zbliżają się do siebie. Nie można jednak jednoznacznie stwierdzić, czy rzeczywiste zaludnienie przekroczy graniczną wartość i rozpocznie się proces udomawiania roślin i zwierząt. Może tak być, ale nie musi.

Gdyby moment pozytywnego wstrząsu nie doprowadził do stworzenia warunków do rozwoju rolnictwa, to powstaje pytanie, czy w okresie po wstrząsie takie warunki mogą zostać wykreowane. W wyniku wstrząsu klimatycznego lokalne społeczności znajdują się w obszarze dodatniego przyrostu naturalnego. Zatem pobudzony zostaje postęp techniczny. Pod jego wpływem, zgodnie ze wzorem (5.4), rośnie graniczna wartość gęstości zaludnienia. Oddala się zatem punkt, w którym wprowadzenie rolnictwa byłoby opłacalne. Równocześnie dzięki dodatniemu przyrostowi naturalnemu rośnie rzeczywista gęstość zaludnienia. Zatem obydwie gęstości zaludnienia rosną. Porównajmy więc dynamikę zmiany granicznej i rzeczywistej gęstości zaludnienia. Interesuje nas, czy w wyniku postępu technicznego rzeczywista gęstość zaludnienia przekroczy graniczną i zostanie otwarta ścieżka do zmian prowadzących do zapoczątkowania rolnictwa.

Dynamika granicznej gęstości zaludnienia jest równa:

$$\frac{\dot{l}^*}{l^*} = \frac{1 - \tau\mu}{1 - \alpha} \frac{\dot{A}}{A}. \quad (5.7)$$

Nie można dokładnie ustalić dynamiki rzeczywistej gęstości zaludnienia. Jednak wykorzystując to, że po pozytywnym wstrząsie klimatycznym lokalne społeczności mogą znaleźć się ponad linią $\dot{u} = 0$ lub poniżej niej (por. rys. 3.3), można wyznaczyć wartości, względem których gęstość zaludnienia będzie większa lub mniejsza. Jeśli wstrząs klimatyczny będzie na tyle silny, że spowoduje taki spadek gęstości zaludnienia, iż lokalna społeczność znajdzie się w obszarze $\dot{u} > 0$, to wów-

czas zajdzie relacja $\frac{\dot{A}}{A} - (1 - \alpha) \frac{\dot{l}}{l} > 0$. Wynika z tego, że dynamika gęstości zalud-

nienia spełnia nierówność:

$$\frac{\dot{l}}{l} < \frac{1}{1 - \alpha} \frac{\dot{A}}{A}. \quad (5.8)$$

Porównując (5.7) i (5.8), otrzymujemy:

$$\frac{1 - \tau\mu}{1 - \alpha} < \frac{1}{1 - \alpha}. \quad (5.9)$$

Ponieważ spełniony jest warunek (5.8), to nie można tylko na podstawie (5.9) jednoznacznie orzec, jaka jest relacja między dynamiką granicznej i rzeczywistej gęstości zaludnienia. Nie można więc stwierdzić, czy silny pozytywny wstrząs klimatyczny otwiera drogę ku rolnictwu czy też ją zamyka. Oba warianty są możliwe.

Gdyby lokalna społeczność znalazła się w obszarze $\dot{u} < 0$, to:

$$\frac{\dot{l}}{l} > \frac{1}{1-\alpha} \frac{\dot{A}}{A}. \quad (5.10)$$

Wówczas na podstawie warunków (5.9) i (5.10) można jednoznacznie stwierdzić, że:

$$\frac{\dot{l}}{l} > \frac{\dot{l}^*}{l^*}. \quad (5.11)$$

Rzeczywista gęstość zaludnienia zbliża się do krytycznej wartości. Może zatem zdarzyć się tak, że zanim lokalna społeczność osiągnie długookresową równowagę dla $u = 0$, to gęstość zaludnienia przekroczy krytyczną wartość i powstaną warunki do rozwoju rolnictwa.

Z powyższych ustaleń wynika istotny wniosek. Gdyby moment pozytywnego szoku klimatycznego nie stworzył korzystnych warunków do rozwoju rolnictwa, to okres poprawy klimatu szans na ich powstanie nie przekreśla. Szczególnie korzystny jest przypadek, gdy w wyniku zmiany klimatu mamy umiarkowaną zamianę stopy przyrostu naturalnego (obszar $u > 0$, $\dot{u} < 0$). Wówczas wzbudzona dynamika postępu technicznego jednoznacznie relatywnie wolniej przesuwana wyższy poziom graniczną wartość gęstości zaludnienia niż rzeczywistą. Rosnąca rzeczywista gęstość zaludnienia wpływa na spadek krańcowej produktywności myślistwa-zbieractwa, czemu nie jest w stanie przeciwdziałać relatywnie wolna dynamika postępu technicznego. Równocześnie wzrost postępu technicznego podnosi krańcową produktywność rolnictwa. Może zatem zdarzyć się, że rosnąca produktywność rolnictwa przekroczy równocześnie malejącą produktywność myślistwa-zbieractwa i powstaną warunki do rozwoju rolnictwa.

Gdyby lokalna społeczność znalazła się w obszarze silnych zmian demograficznych (obszar $u > 0$, $\dot{u} > 0$), wzajemna dynamika krańcowych produktywności tych dwóch sektorów pozyskiwania żywności nie jest jednoznacznie określona. Obydwie rosną, jednak nie można jednoznacznie ustalić, która szybciej.

Zbadajmy wpływ negatywnego wstrząsu klimatycznego ($\tilde{x} > \bar{x}$) na stworzenie warunków do powstania rolnictwa. W momencie wstrząsu dynamika rzeczywistej gęstości zmienia się według wzoru (5.5), przy czym dla negatywnego wstrząsu klimatycznego zachodzi teraz nierówność:

$$\frac{\dot{l}}{l} = \frac{\bar{x}}{\tilde{x}} > 1. \quad (5.12)$$

Natomiast graniczna gęstość zaludnienia spełnia warunek:

$$\frac{l^{**}}{l^*} = \left(\frac{\bar{x}}{\tilde{x}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} > 1. \quad (5.13)$$

Jedna i druga gęstość zaludnienia rośnie. Wzrost l^* jest spowodowany spadkiem krańcowej produktywności rolnictwa w wyniku spadku rozmiarów dobra pośredniego. Aby zrównała się z nią krańcową produktywność myślistwa-zbieractwa, zgodnie ze wzorem (5.4) wymagany jest wzrost granicznej wartości zaludnienia. Z porównania (5.12) z (5.13) wynika, że wartość granicznej gęstości zaludnienia rośnie szybciej niż rzeczywistej. Zatem w momencie negatywnego wstrząsu klimatycznego obie gęstości na pewno oddalają się od siebie. Można więc jednoznacznie stwierdzić, że ten typ wstrząsu nie sprzyja powstaniu warunków sprzyjających rozwojowi rolnictwa.

W okresie oziębienia klimatu lokalna społeczność znajduje się w obszarze $u < 0$ i $\dot{u} > 0$, czyli dynamika rzeczywistej gęstości zaludnienia jest ujemna. Natomiast dynamika krytycznej wartości gęstości zaludnienia jest dodatnia z powodu wzrostu postępu technicznego:

$$\frac{\dot{l}^*}{l^*} = \frac{1-\tau\mu}{1-\alpha} \frac{\dot{A}}{A} > 0. \quad (5.14)$$

A więc również w okresie oziębienia klimatu obie wartości gęstości zaludnienia oddalają się od siebie:

$$\frac{\dot{l}}{l} < \frac{\dot{l}^*}{l^*}. \quad (5.15)$$

Zatem wydaje się, że negatywny wstrząs nie stwarza żadnych szans na powstanie rolnictwa. Jest jednak pewne dodatkowe zjawisko, które należy wziąć pod uwagę w przypadku negatywnego wstrząsu klimatycznego, a mianowicie migracje ludności.

Po negatywnym wstrząsie lokalne społeczności charakteryzują się ujemnym przyrostem naturalnym. Uruchomiony postęp techniczny przeciwdziała spadkowi liczby ludności, jednak nie wyhamowuje go. Trwa on tak długo, aż lokalna społeczność odbuduje poziom ilości żywności sprzed wstrząsu klimatycznego, czyli poziom, przy którym stopa przyrostu naturalnego jest równa zero. Wcześniej zwracaliśmy uwagę, że pierwszą odpowiedzią lokalnych społeczności na oziębienie klimatu wywołujące ujemny przyrost naturalny była migracja w celu znalezienia terenów o lepszych zasobach żywnościowych. Migrować mogła część lokalnej społeczności lub cała

lokalna społeczność. Bez wątplenia lokalne ekosystemy różniły się pod względem wpływu, jaki wywierał na nie negatywny wstrząs klimatyczny. Inny był na przykład na obszarach nizinnych czy wyżynnych, na wybrzeżach i w głębi lądu, w pobliżu rzek i jezior oraz w dużych odległościach od nich. Szczególnie istotne są te ostatnie warunki. Regiony oddalone od rzek i jezior są zasilane wodą pochodzącą z opadów atmosferycznych. Negatywny wstrząs klimatyczny powodował osłabienie oraz zmniejszenie opadów atmosferycznych⁸¹. Warunki wegetacji roślin poza dolinami rzecznyymi i okolicami zbiorników wodnych drastycznie się pogarszały z powodu zmniejszenia opadów. Rzutowało to na rozmiary dostępnych dóbr pośrednich. Poza regionami z dostępną wodą powierzchniową następowało zmniejszenie rozmiarów dóbr pośrednich i tym samym zmniejszenie ilości dostępnej żywności. Jeśli spadek ilości żywności był na tyle silny, że migrowały całe lokalne społeczności w poszukiwaniu lepszych terenów do życia, mogło to powodować silny napływ ludności do regionów o najlepszych warunkach (wokół wodnych zbiorników powierzchniowych i w dolinach rzek). Wówczas w tych regionach, w momencie negatywnego wstrząsu klimatycznego, następował wzrost gęstości zaludnienia nie tylko w wyniku spadku rozmiarów dobra pośredniego ($\tilde{x} < \bar{x}$), lecz także napływu ludności z regionów o gorszych warunkach. Ponieważ graniczna wartość zaludnienia nie zmienia się pod wpływem migracji, to rosnąca rzeczywista gęstość w najlepszych regionach zbliża się do granicznej i może ją przekroczyć. Inaczej mówiąc, negatywny wstrząs klimatyczny wzmocniony migracją ludności może stanowić przełomowy moment w przejściu od myślistwa-zbieractwa do rolnictwa.

Możemy to również przedstawić z perspektywy zmian w krańcowych produktywnościach. Oznaczmy przez L_0 liczbę ludności w danym regionie przed wstrząsem klimatycznym i przez L_1 tuż po nim jako wynik migracji. Wówczas gęstość zaludnienia powiększa się po negatywnym wstrząsie z dwóch powodów: spadku rozmiarów dobra pośredniego i napływu ludności:

$$l_0 = \frac{L_0}{A\bar{x}} < \frac{L_1}{A\tilde{x}} = l_1. \quad (5.16)$$

Dynamikę produktywności myślistwa-zbieractwa w momencie wstrząsu klimatycznego, gdy jeszcze nie rozwija się postęp techniczny, można przedstawić jako:

$$\frac{MPL_{H1}}{MPL_{H0}} = \left(\frac{L_0}{L_1} \frac{\tilde{x}}{\bar{x}} \right)^{1-\alpha}. \quad (5.17)$$

⁸¹ G.K. Dow, C.G. Reed, N. Olewiler, *Climate reversals and the transition to agriculture*, „Journal of Economic Growth” 2009, vol. 14, no. 1.

Natomiast dynamika krańcowej produktywności w rolnictwie jest równa:

$$\frac{MPL_{A1}}{MPL_{A0}} = \frac{BA^{\theta} \tilde{x}}{BA^{\theta} \bar{x}} = \frac{\tilde{x}}{\bar{x}}. \quad (5.18)$$

Z porównania (5.17) i (5.18) wynika, że gdyby ludność nie migrowała ($L_0 = L_1$), to produktywność rolnictwa spadłaby szybciej niż myślistwa-zbieractwa

$\left(\frac{\tilde{x}}{\bar{x}} < \left(\frac{\tilde{x}}{\bar{x}} \right)^{1-\alpha} \right)$. Gdy pojawia się migracja ($L_0 < L_1$), to powiększa ona spadek pro-

dukcyjności myślistwa-zbieractwa, przy niezmienionym spadku produktywności rolnictwa. Ten wpływ migracji na spadek produktywności myślistwa-zbieractwa jest tym silniejszy, im łatwiej w regionie zdobywa się żywność, czyli mniejszy jest wymagany udział pracy (parametr) w pozyskanie i przetworzenie dóbr pośrednich w dobra żywnościowe. Inaczej mówiąc, regiony, w których warunki mogły sprzyjać powstaniu rolnictwa w momencie negatywnego wstrząsu klimatycznego to te, które, będąc zasobne w łatwe do pozyskania dobra pośrednie, równocześnie mają wysoki współczynnik dóbr nadających się do udomowienia.

Nie było zatem jednego klimatycznego wzorca przejścia od myślistwa-zbieractwa do produkcji żywności. Hipotetycznie istniała różnorodność ścieżek zarówno po pozytywnym, jak i negatywnym wstrząsie klimatycznym. Na przykład, bardzo dobrze udokumentowana jest historia początków rolnictwa, które rozwinęło się na obszarze Żyznego Półksiężycza (pas ziemi od doliny Nilu, poprzez współczesną Syrię, aż do dorzecza Eufratu i Tygrysu). Jak wynika z badań rolnictwo powstało w tym regionie w następstwie negatywnego wstrząsu klimatycznego. Obszar ten przede wszystkim charakteryzował się obfitością łatwo dostępnych dzikich zbóż. Już około 23 tys. lat temu ziarna tych zbóż wchodziły w skład diety ludzi zamieszkujących te tereny⁸². Dzięki ociepleniu klimatu, które rozpoczęło się 20 tys. lat temu, zasoby żywności Żyznego Półksiężycza wzrosły, co sprzyjało zwiększeniu się gęstości zaludnienia. Żywność była na tyle obfita, że około 13,5 tys. lat temu ludność mogła prowadzić tam osiadły tryb życia, będąc równocześnie myśliwymi-zbieraczami. Około 12,9 tys. lat temu trend ocieplenia klimatu został gwałtownie przerwany przez silne globalne oziębienie zwane młodszym dryasem, które skończyło się mniej więcej 11,6 tys. lat temu. W okresie oziębienia ludność musiała porzucić osiadły tryb

⁸² O. Bar-Yosef, *Climatic Fluctuations and Early Farming in West and East Asia*, „Current Anthropology”, October 2011, vol. 52, supp. 4, s. 181.

życia i poszukiwać miejsc zasobnych w żywność. Nastąpiło zagęszczenie lokalnych społeczności w niewielkiej liczbie ekosystemów zapewniających przeżycie⁸³. Gdy po mniej więcej 1300 latach oziębienie ustąpiło i nastąpiło ponowne ocieplenie, okazało się, że na obszarze Żyznego Półksiężycza rozwinęło się rolnictwo. Przypuszcza się, że również w Chinach powstanie rolnictwa wiąże się zimną fazą młodszego dryasu⁸⁴. Najstarsze ślady technik rolnych zostały znalezione w miejscach datowanych na 8,5 tys. lat temu. Ponieważ są to techniki świadczące o zaawansowanym poziomie rozwoju rolnictwa, sam proces musiał rozpocząć się wcześniej. Sądzi się zatem, że zmiana technologiczna mogła pojawić się około 11,6 tys. lat temu⁸⁵.

W innych regionach – na Nowej Gwinei, w Ameryce Środkowej, Afryce Subsaharyjskiej, wschodniej części Ameryki Północnej, północnych obszarach Ameryki Południowej – rolnictwo rozwinęło się w okresie holocenu, a więc w ciepłej i stabilnej fazie interglacjalnej. Są to więc ścieżki związane z dodatnim szokiem klimatycznym⁸⁶. Ponieważ nie ma archeologicznych dowodów wskazujących, że pojawienie się rolnictwa było poprzedzone zwiększonym wymieraniem ludności na tych terenach, to przejście do produkcji żywności nie było skutkiem dojścia do bariery samoodnowy środowiska naturalnego w wyniku ekspansji ludności. W trakcie wzrostu gęstości zaludnienia i postępu technicznego musiała ujawnić się opłacalność technik rolnych, czyli ich krańcowa produktywność przewyższała krańcową produktywność myślistwa-zbieractwa. Ustalenie konkretnych faktów, które były związane z przejściem od myślistwa-zbieractwa do produkcji rolnej, pozostawiamy archeologom, którzy od wielu lat prowadzą intensywne prace poszukiwawcze. Nas interesuje odpowiedź na fundamentalne pytanie: czy ostatecznie wstrząsy klimatyczne nieuchronnie prowadziły do rozwoju rolnictwa, czy też jego powstanie było wynikiem całkowicie przypadkowego splotu okoliczności?

Odpowiedź na to pytanie nie jest taka prosta. Procesy, które doprowadziły do powstania rolnictwa wydają się niezwykle złożone ze względu na różnorodność możliwych ścieżek, po których mogły się poruszać lokalne społeczności. Wstrząsy klimatyczne determinowały różne punkty startowe dla społeczności lokalnych, co z kolei mogło prowadzić do różnych stanów końcowych przed nadejściem kolejnego wstrząsu o przeciwnym charakterze. Nie można jednoznacznie stwierdzić, że ze wszystkich tych punktów startowych ścieżki prowadziły do rozwoju rolnictwa.

⁸³ Zob. B.D. Smith, *The emergence of agriculture*, Scientific American Library, New York 1998; P. Bellwood, *First farmers. The origins of agricultural societies*, Blackwell, Oxford 2005, s. 57.

⁸⁴ Zob. O. Bar-Yosef, *Climatic Fluctuations...*, op.cit.

⁸⁵ P.J. Richerson, R. Boyd, R.L. Bettinger, *Was Agriculture Impossible during the Pleistocene but Mandatory during the Holocene? A Climate Change Hypothesis*, „American Antiquity” 2001, vol. 66, no. 3.

⁸⁶ Holocen jako całość traktujemy jako pozytywny wstrząs klimatyczny.

Negatywny wstrząs klimatyczny pociągał za sobą wyższą dynamikę produktywności w myślistwie-zbieractwie niż w rolnictwie. Można zatem jednoznacznie stwierdzić, że punkty startowe powstałe w wyniku oziębienia się klimatu nie stanowiły początku ścieżek prowadzących do rozwoju rolnictwa. Sytuację tę mogły zmienić migracje ludności z regionów o gorszych warunkach klimatycznych do tych, w których te warunki były korzystniejsze, tak jak to się stało na obszarze Żyznego Półksiężycza w okresie młodszego dryasu. W wyniku pozytywnego wstrząsu klimatycznego mogły powstać dwa typy nowych punktów startowych. Obydwa charakteryzowały się dodatnim przyrostem naturalnym, a różniły się tylko stopą jego przyrostu. Poprawa warunków mogła być na tyle silna, że stopa przyrostu naturalnego rosła ($\dot{u} > 0$). W tym przypadku nie można było z góry stwierdzić, czy lokalne społeczności znajdując się na ścieżce prowadzącej do rozwoju rolnictwa, gdyż nie sposób było jednoznacznie ustalić, czy w wyniku postępu technicznego produktywność rolnictwa rosła szybciej czy też wolniej niż produktywność myślistwa-zbieractwa. W drugim przypadku stopa zmiany przyrostu naturalnego była ujemna ($\dot{u} < 0$). Towarzyszył temu spadek produktywności myślistwa-zbieractwa i wzrost produktywności rolnictwa. Gdyby proces ten trwał nieskończenie długo, to musiałoby dojść do takiego wzrostu rzeczywistej gęstości zaludnienia, iż przekroczyłaby ona graniczną wartość l^* . Inaczej mówiąc, byłaby to ścieżka jednoznacznie prowadząca lokalne społeczności do rozwoju rolnictwa. Aby się tak stało, konieczne jednak było spełnienie szeregu dodatkowych warunków.

Po pierwsze, lokalna społeczność musiała znaleźć się w regionie z ekosystemem zawierającym elementy nadające się do udomowienia. Po drugie, istotnym elementem procesu dostosowawczego było rozszerzanie diety o nowe składniki, w tym przede wszystkim o rośliny, które potencjalnie można było udomowić i oprzeć na nich produkcję żywności. To były dwa kluczowe momenty w ewolucji ku produkcji żywności. W ten sposób została stworzona strona „podażowa” jako baza do rozwoju rolnictwa. Jednak nawet gdyby te warunki były spełnione, nie oznaczałoby to, że automatycznie nastąpiłby rozwój rolnictwa. Po prostu zanim ujawniłyby się przewaga rolnictwa nad myślistwem-zbieractwem, lokalne społeczności mogłyby osiągnąć długookresową równowagę ($u = 0, \dot{A} = 0$). A zatem żaden punkt startowy nie determinowałby rozwoju rolnictwa. Hipotetycznie można nawet wyobrazić sobie taką sytuację, że we wszystkich lokalnych społecznościach, których przecież nie było zbyt wiele w paleolicie (kilkaset tysięcy osobników w górnym paleolicie, a pod koniec ostatniego zlodowacenia około 5–6 mln), utrwała się stan równowagi, a wtedy nie ujawni się „popyt” na rolnictwo.

Musiał wobec tego istnieć jakiś zewnętrzny czynnik, który wytrącał lokalne społeczności ze stanu równowagi, zmuszając je do podejmowania działań

przystosowawczych w formie postępu technicznego i migracji. Tym czynnikiem był bez wątpienia zmienny klimat. Pojawiające się na przemian okresy oziębienia i ocieplenia w plejstocenie wywoływały ciągle wahania w stopie przyrostu naturalnego, który uruchamiał postęp techniczny oddziałujący na relacje produktywności pomiędzy dwoma sektorami pozyskania żywności: myślistwa-zbieractwa i rolnictwa. Nie ulega również wątpliwości, że efekty wstrząsów klimatycznych były zróżnicowane w poszczególnych regionach – inne w rejonach położonych w strefie równikowej, inne na obszarach leżących dalej od równika, odmienne w dolinach i na terenach górzystych. Ta zmienność klimatu okazała się kluczowym czynnikiem w ewolucji ku rolnictwu. Wywoływała ciągły ruch w lokalnych społecznościach, szczególnie w rejonach, w których skutki wstrząsów klimatycznych były bardziej odczuwalne niż w innych. Niestabilny klimat w plejstocenie „wytrzącał” lokalne społeczności z równowagi i zmuszał je do adaptacji do nowych warunków. W ten sposób „popychał” postęp techniczny, podnosząc produktywność rolnictwa. To „popychanie” po każdym wstrząsie miało zapewne swój własny swoisty punkt startowy, powstawały różnorodne ścieżki dążenia do coraz większego zróżnicowania diety, co tworzyło podwaliny pod przyszłe udomowienie roślin i zwierząt. Zapewne część lokalnych społeczności nie była objęta dynamiką zmian wywołanych zmiennością klimatu. W konsekwencji społeczności te osiągały one stan równowagi, który trwa do dziś (np. lokalne społeczności w Amazonii czy też Aborygeni w Australii bądź plemiona w lasach deszczowych Nowej Gwinei). Ale znakomita większość była w ciągłym ruchu adaptacyjnym prowokowanym wstrząsami klimatycznymi.

Z jednej strony wstrząsy klimatyczne implikowały postęp techniczny, ale z drugiej strony wydłużały w czasie ścieżkę dojścia do punktu $MPL_H < MPL_A$. Był to nieuchronny rezultat pojawiania się okresów oziębienia, które powodowały ujemny przyrosty naturalny i zupełnie nie sprzyjały powstawaniu punktów startowych ku rolnictwu. Uruchamiały natomiast mechanizmy przeciwdziałające spadkowi populacji, przede wszystkim poprzez migracje do regionów zasobniejszych w żywność. Koncentracja ludności w rejonach o lepszych warunkach sprzyjała – poprzez nawiązywanie współpracy – dyfuzji wiedzy technicznej. Powstawał swoisty mechanizm wyrównywania poziomu wiedzy pomiędzy ocalałymi lokalnymi społecznościami. Dzięki temu, gdy nastawał okres ocieplenia, to lokalne społeczności nie musiały wyrównywać ubytków w wiedzy technicznej, lecz mogły ją od razu pogłębiać w nowych punktach startowych. Funkcjonował swoisty oscylacyjny (przemienne fazy klimatu), „podażowy” (rozszerzanie diety pociągające za sobą postęp techniczny) mechanizm poszerzania podstaw do powstania rolnictwa. Istotne jest to, iż w mechanizmie tym zasadniczą rolę odgrywała nie tyle presja ludnościowa, która mogła w ogóle się nie pojawić z powodu osiągnięcia równowagi

przez lokalną społeczność, ile zmienność klimatu oddziałująca na stopę przyrostu naturalnego, która pośrednio tworzyła presję na rozszerzanie diety oraz spychała lokalne społeczności ze ścieżek prowadzących ku równowadze i tym samym ostatecznie wpływała na rozwój techniki.

Czy taki mechanizm ewolucji musiał doprowadzić do powstania rolnictwa? W pewnym sensie początki rolnictwa są związane ze splotem niezwykle sprzyjających okoliczności. Intensywność zmian klimatycznych doprowadziła ostatecznie do poszerzenia diety i intensyfikacji eksploatowania ekosystemu przez techniki myśliwsko-zbierackie we wszystkich regionach. Dotyczy to w szczególności okresu końca ostatniej epoki lodowcowej i początków holocenu⁸⁷. Zatem była to prawidłowość ewolucji zgodna z naszą koncepcją pobudzania postępu technicznego, gdy $u \neq 0$, a zmienność klimatu uniemożliwiała lokalnym społecznościom osiągnięcie stanu równowagi ($u = 0$). W ten sposób na terenach zawierających elementy nadające się do udomowienia nieuchronnie dochodziło do rozszerzenia diety lokalnych społeczności o te właśnie elementy. Strona „podażowa” do wykreowania rolnictwa była więc wynikiem zmian ewolucyjnych.

Stronę „popytową” utworowały dwa kluczowe zjawiska, które doprowadziły do spadku produktywności myślistwa-zbieractwa poniżej produktywności rolnictwa. Można powiedzieć, że pełniły one funkcję swoistego „wyzwalacza” zmian w sposobie pozyskiwania żywności. Pierwsze to oziębienie klimatu w młodszym dryasie, które, powodując w Żywnym Półksiężycu i najprawdopodobniej również w Chinach migracje ludności, doprowadziło do spadku krańcowej produktywności myślistwa-zbieractwa poniżej krańcowej produktywności rolnictwa w ekosystemach charakteryzujących się najlepszymi warunkami do życia. Drugie to pojawienie się po młodszym dryasie interglacjału holocenińskiego – cieplej i stabilnej fazy klimatu. To spowodowało, że pierwsze lokalne społeczności, które rozwinęły rolnictwo, pozostały przy tym sposobie pozyskiwania żywności. W pozostałych regionach ciepły i wilgotny klimat sprzyjał utrzymywaniu się dodatniego przyrostu naturalnego, co pobudzało postęp techniczny. Jeżeli lokalne społeczności pozyskiwały żywność z myślistwa-zbieractwa i równocześnie prowadziły wędrowny tryb życia, to nie oddalały się zbyt daleko od linii równowagi $u = 0$ (poruszały się w obszarze charakteryzującym się $u > 0$ i $\dot{u} < 0$). Wówczas znajdowały się na ścieżce, na której produktywność myślistwa-zbieractwa spadała, a rosła produktywność rolnictwa. Gdyby wówczas jeszcze $u > 0$ i $A < \delta_{\max} \bar{A}$, a zaszłoby już $MPL_A > MPL_H$, to powstałoby rolnictwo. Gdyby natomiast lokalne społeczności poruszały się w obszarze $u > 0$ i $\dot{u} > 0$, wówczas znajdowałyby się na ścieżce rosnącej produktywności i myślistwa-zbieractwa, i rolnictwa. Wtedy

⁸⁷ Zob. P.J. Richerson, R. Boyd, R.L. Bettinger, op.cit., s. 400.

również, jeśli jeszcze $u > 0$ i $A < \delta_{\max} \bar{A}$, a zaszłoby już $MPL_A > MPL_H$, to powstałoby rolnictwo. Gdyby natomiast $u > 0$ i $A \geq \delta_{\max} \bar{A}$, czyli nastąpiłoby przekroczenie bariery samoodnowy ekosystemu, to lokalne społeczności, chroniąc się przed zagładą, dzieląc się na mniejsze grupy lub w całości, migrowałyby do rejonów o lepszych warunkach do życia. W nowych regionach, jeśli $u > 0$, to ponownie mogłoby zajść $MPL_A > MPL_H$ dla $A < \delta_{\max} \bar{A}$ i powstałoby rolnictwo, lub dla $A \geq \delta_{\max} \bar{A}$ nadal zachodziłoby $MPL_A < MPL_H$ i ponownie doszłoby do migracji. Gdyby dla $u > 0$ powtarzały się sytuacja $MPL_A < MPL_H$ dla $A \geq \delta_{\max} \bar{A}$, to wcześniej czy później wszystkie regiony zostałyby zamieszkane przez myśliwych-zbieraczy. Ponieważ wyczerpałyby się możliwości migracyjne, przed lokalnymi społecznościami stanęłaby groźba wymarcia. Zapewne część populacji wymarłaby, ale dzięki zdolnościom adaptacyjnym i nabytym umiejętnościom technicznym naturalną kolejną rzeczą byłoby zapewne wzmożone eksperymentowanie z kontrolowaniem wegetacji roślin i rozwoju zwierząt. W takich dramatycznych okolicznościach nastąpiłoby przejście do rolnictwa. Podsumowując, w holocenie, jeżeli $u > 0$, to niezależnie od relacji A do $\delta_{\max} \bar{A}$ nieuchronnie nastąpiłoby przejście do rolnictwa. Był to zatem nieunikniony proces ewolucji człowieka, wynikający z jego zdolności do utrzymywania dodatniego przyrostu naturalnego i wprost niezwykłych umiejętności adaptacyjnych do zmiennego środowiska.

Rozdział 6

Postęp techniczny w okresie agrarnym. Wyjście z pułapki stagnacji

Zakładamy, że okres przekształcania gospodarki łowiecko-zbierackiej w rolną całkowicie się zakończył. Udomowiono wszystkie łatwo dostępne i nadające się do udomowienia zwierzęta i rośliny. Każdy z regionów geograficznych zamieszkują wyłącznie lokalne społeczności prowadzące osiadły tryb życia i pozyskujące żywność poprzez uprawę ziemi i hodowlę zwierząt. Taka gospodarka, podobnie jak łowiecko-zbieracka, charakteryzowała się stagnacją przeciętnego poziomu życia, mierzonego produkcją *per capita*. Według najczęściej przytaczanych w literaturze szacunków A. Maddisona⁸⁸ w okresie od 1 roku naszej ery do roku 1000 poziom światowej produkcji na mieszkańca utrzymywał się prawie na tym samym poziomie (około 450 dolarów według parytetu siły nabywczej dolara z 1990 roku), nieznacznie wyższym od minimum egzystencji (około 400 dolarów). Po pierwszym tysiącleciu przez kolejne 800 lat światowa produkcja *per capita* podniosła się do 667 dolarów, co oznaczało bardzo małe średnioroczne tempo wzrostu 0,05%. Można przyjąć, że taka nieznaczna zmiana była całkowicie nieodczuwalna przez żyjące w tamtym okresie pokolenia. W przeciągu 18 stuleci produkcja na mieszkańca wzrosła zaledwie o około 48%. Równoległe, mimo stagnacji w poziomie życia, rosła globalna liczba ludności. 12 tys. lat temu Ziemię zamieszkiwało około 6 mln ludzi. W roku 0 – około 252 mln, a w 1800 roku liczebność ludzi wzrosła do 954 mln, czyli przez 18 stuleci naszej ery wzrosła 3,7 raza⁸⁹. Dopiero XIX wiek przynosi ogromny sukces, którym było wyrwanie się z oków stagnacji poziomu życia. Stopniowo, w miarę upływu czasu kolejne regiony wchodziły na ścieżkę trwałego wzrostu produkcji *per capita*. Najpierw Europa, Ameryka Północna, Australia, Nowa Zelandia na początku XIX wieku, następnie Ameryka Południowa i Japonia w drugiej połowie XIX wieku, i wreszcie w drugiej połowie XX wieku – Azja. Ostatnie lata wskazują, że na ścieżkę wzrostu wchodzi również Afryka.

⁸⁸ A. Maddison, *Contours of the World Economy 1–2030 AD. Essays in Macro-Economic History*, Oxford University Press, Oxford–New York 2007; A. Maddison, *The World Economy. Historical Statistics*, OECD, Paris 2003; A. Maddison, *The World Economy. A Millennial Perspective*, OECD, Paris 2001.

⁸⁹ M. Livi-Bacci, op.cit., s. 25–26.

Zadajemy pytanie, jaką rolę w gospodarce agrarnej, na przestrzeni tak długiego okresu stagnacji poziomu życia, odgrywał postęp techniczny. Czy i w jaki sposób można przełamać tę stagnację i wejść na ścieżkę trwałego wzrostu gospodarczego? Odpowiedzi poszukujemy poprzez zbadanie wzajemnych oddziaływań dynamiki postępu technicznego i dynamiki ludności. W szczególności chcemy się dowiedzieć, w jakich warunkach postęp techniczny jest w stanie tak wpłynąć na gospodarkę, że zostanie przełamana stagnacja poziomu życia.

W procesie produkcji w gospodarce rolnej wykorzystywane są dwa podstawowe czynniki produkcji: ziemia oraz praca. W produkcji żywności ziemia Z jako czynnik wytwórczy jest charakteryzowana odmiennie niż w myślistwie-zbieractwie. Nie jest to już ekosystem ze swoimi zasobami roślinnymi i zwierzęcymi. Nadmierna obfitość tych zasobów może być dużym utrudnieniem w uprawie roli i roślin oraz w chowie i hodowli zwierząt. Niejednokrotnie te nadmierne zasoby musiały być usunięte (na przykład karczowanie lasów), aby można było wykorzystać ziemię jako czynnik wytwórczy, czyli kopać ją, orać, spulchniać, nawadniać, obsiewać, odchwaszczać, nawozić, zbierać plony czy wypasać na danym terenie zwierzęta. A więc ziemia jako czynnik wytwórczy w rolnictwie to po prostu grunt o pewnej charakterystyce zwanej urodzajnością. Zachowujemy specyfikę ziemi jako czynnika, którego nie można wytwarzać, wykorzystując inne czynniki wytwórcze.

Przez L oznaczmy liczbę ludności, która z założenia jest równa liczbie pracowników sektora rolnego. Każdy z pracowników jest wyposażony w jedną jednostkę czasu, którą przeznaczają na pracę. Zatem w danym momencie t liczba ludności L jest równa podaży pracy, która, zakładamy, jest w pełni wykorzystana.

Zarówno jeden, jak i drugi czynnik wykazuje malejące przychody, natomiast ich łączne stosowanie charakteryzuje się stałymi przychodami. W produkcji pojawia się również specyficzny element, jakim jest wiedza techniczna, której zasób oznaczmy, tak jak do tej pory, A . Przyjmujemy, że w produkcji wspomaga ona pracę:

$$Y = Z^{1-\alpha} (AL)^\alpha, \quad 0 < \alpha < 1, \quad Z, A > 0, \quad L \geq 1. \quad (6.1)$$

Zasób wiedzy, odzwierciedlający poziom postępu technicznego, radykalnie zmienia swoją strukturę w porównaniu z epoką myślistwa-zbieractwa. Nie jest to już rozpoznawanie ekosystemu i wykorzystanie nabytej wiedzy do wzbogacania diety. Poznaniem objęty jest cały cykl wytwarzania żywności – od zasiania aż po zbiory i następnie przechowanie. Cały ten cykl jest kontrolowany przez człowieka. Poszerza się więc zakres problemów, przed którymi staje producent. Ponieważ cały proces wytwórczy ma charakter sztuczny, w tym sensie, że nie pochodzi wprost z funkcjonowania ekosystemu, lecz jest w całości wymyślony przez człowieka, jest tym

samym otwarty na wprowadzanie kolejnych zmian. Rozwiązanie jednego problemu może być inspiracją do rozwiązania kolejnego.

Ponieważ wszystkie dostępne regiony w wyniku migracji w okresie paleolitu i neolitu zostały zasiedlone, możemy przyjąć, że dostępna ziemia dla danej lokalnej społeczności jest stała i równa 1. Funkcja produkcji uprości się do postaci:

$$Y = (AL)^\alpha. \quad (6.2)$$

Wzór (6.2) można przekształcić, aby pokazać produkcję na mieszkańca:

$$y = A^\alpha L^{\alpha-1}. \quad (6.3)$$

Przy danym poziomie postępu technicznego produkcja na mieszkańca spada, gdy rośnie zatrudnienie. Wynika to z malejących przychodów z pracy.

Interesuje nas ścieżka produkcji na mieszkańca. Stopa zmiany y po czasie jest równa:

$$\dot{y} = [\alpha g_A - (1-\alpha)g_L]y, \text{ gdzie: } g_A \equiv \frac{\dot{A}}{A}, g_L \equiv \frac{\dot{L}}{L}. \quad (6.4)$$

Produkcja na mieszkańca stabilizuje się, czyli $\dot{y} = 0$, jeśli jest spełniony warunek:

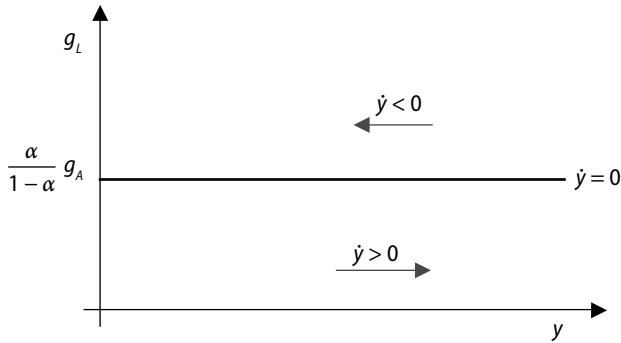
$$g_L = \frac{\alpha}{1-\alpha} g_A. \quad (6.5)$$

Jeśli takie tempo osiąga dynamika ludności, to produkcja na mieszkańca się stabilizuje. Wówczas dodatnie efekty postępu technicznego we wzroście produkcji na mieszkańca ($\alpha g_A y$) są w całości kompensowane ujemnym efektem spadku krańcowej produktywności pracy wynikającym ze wzrostu liczby ludności

($(1-\alpha)g_L y$). Gdyby zachodziło $g_L > \frac{\alpha}{1-\alpha} g_A$, to $\dot{y} < 0$, gdyż szybko rosnąca liczba

ludności niweluje efekty postępu technicznego. W przypadku $g_L < \frac{\alpha}{1-\alpha} g_A$ mie-

libyśmy $\dot{y} > 0$, ponieważ efekty relatywnie wysokiej dynamiki techniki przeważają nad ujemnymi efektami wzrostu liczby ludności. Rysunek 6.1 pokazuje wszystkie możliwe kombinacje dynamiki mieszkańców oraz produkcji na mieszkańca (kierunek strzałek pokazuje ruch y), przy założeniu, że postęp techniczny jest egzogeniczny. Dodatkowo przyjmujemy, że $g_A \geq 0$ (powody zostaną wyjaśnione w dalszej części rozdziału).



Rysunek 6.1. Dynamika y przy danym postępie technicznym

Gdy postęp techniczny traktujemy jako zewnętrzny wobec gospodarki, to dynamika produkcji na zatrudnionego jest funkcją jednej zmiennej, a mianowicie dynamiki zatrudnienia. Utrzymujemy dotychczasowe założenia, iż stopa urodzeń b jest egzogeniczna, natomiast stopa zgonów jest ściśle malejącą funkcją produkcji na mieszkańca $a = a(y)$ o własnościach: $a'(y) < 0$, $a''(y) > 0$, $\lim_{y \rightarrow 0} a(y) = +\infty$, $\lim_{y \rightarrow +\infty} a(y) = 0$. Stopa zmiany liczby ludności jest wówczas równa:

$$\dot{L} = [b - a(y)]L, \quad L_0 \geq 1. \quad (6.6)$$

Z (6.6) uzyskujemy tempo wzrostu liczby ludności:

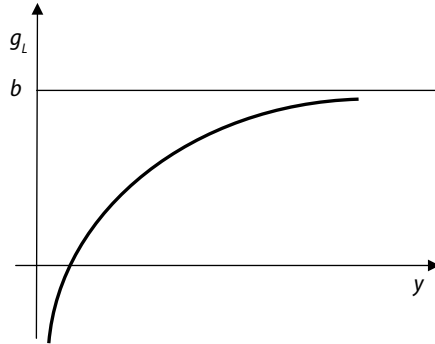
$$g_L = b - a(y). \quad (6.7)$$

Funkcja dynamiki ludności (6.7) jest ściśle monotonicznie rosnąca. Przy czym dla coraz większej produkcji na mieszkańca dynamika ludności zbliża się asymptotycznie do stopy urodzeń (rys. 6.2).

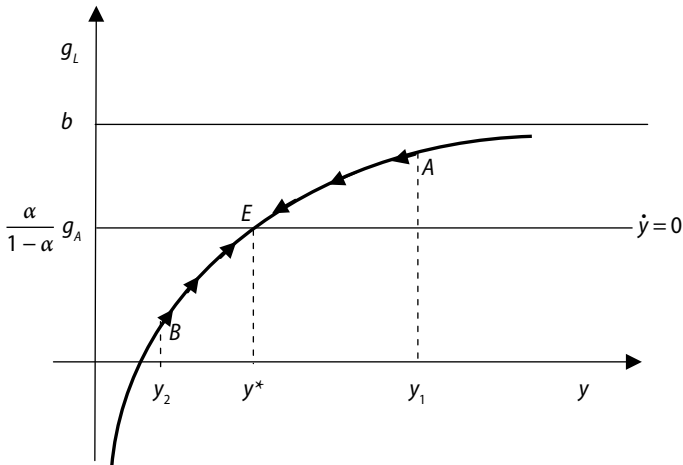
Równania (6.4) i (6.7) tworzą kompletny model długookresowej równowagi w gospodarce z egzogenicznym postępowem technologicznym. Dynamikę gospodarki można badać dla dwóch przypadków egzogenicznego postępu technicznego:

a) $0 \leq \frac{\alpha}{1-\alpha} g_A < b$, b) $\frac{\alpha}{1-\alpha} g_A \geq b$. Złożenie wykresów znajdujących się na rysun-

kach 6.1 i 6.2 pozwala uzyskać portret fazowy dla pary zmiennych (y, g_L) dla tych dwóch przypadków.



Rysunek 6.2. Dynamika ludności

Rysunek 6.3. Dynamika gospodarki dla $0 \leq \frac{\alpha}{1-\alpha} g_A < b$.

- a) Gdyby gospodarka osiągała produkcję y_1 , to znajdowałaby się w punkcie początkowym A na linii dynamiki ludności (rys. 6.3). W tym punkcie starto-

wym dynamika ludności przekraczałaby krytyczną wartość $\frac{\alpha}{1-\alpha} g_A$, przy

której stabilizuje się produkcja. Efekty spadku krańcowej produktywności pracy przeważałyby zatem nad efektami postępu technicznego i w konsekwencji produkcja spadałaby wtórnie, powodując zmniejszenie dynamiki ludności. Gospodarka zmierzałaby do poziomu produkcji y^* . Gdyby początkowa produkcja

wynosiła y_2 , to gospodarka startowałaby z punktu B na linii dynamiki ludności. Dodatkowo efekty postępu technicznego przewyższałyby wówczas negatywny wpływ dynamiki ludności i ostatecznie produkcja rosłaby. To z kolei wtórnie prowadziło do wzrostu dynamiki ludności. Ostatecznie gospodarka zmierza również w tym przypadku do poziomu produkcji y^* , który jest stabilnym punktem długookresowej równowagi.

Jeśli egzogeniczny postęp techniczny nie przekracza górnej granicy dynamiki ludności $\frac{\alpha}{1-\alpha} g_A < b$, to jedynym jego długookresowym efektem jest pojawienie się stabilnego dodatniego tempa wzrostu ludności. Natomiast produkcja na mieszkańca stabilizuje się na stałym poziomie w długim okresie.

Tak długo jak $g_A < \frac{\alpha}{1-\alpha} b$ postęp techniczny wpływa tylko na poziom dyna-

miki ludności, nie uruchamia zjawiska trwałego i samopodtrzymującego się wzrostu produkcji na mieszkańca. Długookresowo dynamika produkcji *per capita* jest równa zero. Jedynym sposobem podniesienia jej w długim okresie jest skokowy wzrost egzogenicznego postępu technicznego. Wówczas wyłącznie w okresie przejścia od jednego stanu długookresowej równowagi do drugiego, dla wyższej dynamiki postępu technicznego, pojawi się dodatnia dynamika produkcji *per capita*. Po dojściu do nowego stanu równowagi produkcja *per capita* ponownie się stabilizuje. Wzrost dynamiki postępu technicznego „przekształca się” w trwałe podniesienie dynamiki ludności i trwały wzrost poziomu produkcji *per capita* (dynamika wraca do poziomu zerowego). Gospodarka tkwi w pułapce stagnacji zwanej pułapką maltuzjańską⁹⁰.

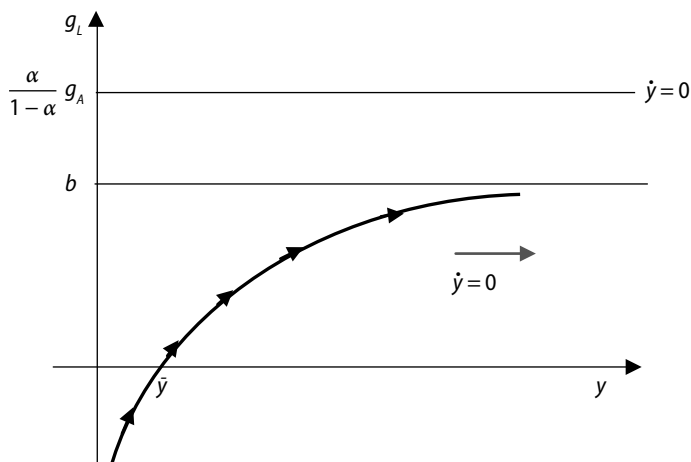
- b) Jeśli tempo egzogenicznego postępu technologicznego ukształtuje się na poziomie $g_A \geq \frac{1-\alpha}{\alpha} b$, wówczas gospodarka wchodzi na ścieżkę permanentnego

wzrostu produkcji na mieszkańca (rys. 6.4). Dla każdego poziomu produkcji *per capita* negatywny wpływ wzrostu liczby ludności (poprzez spadek krańco-

⁹⁰ Pierwsze poważne potraktowanie zjawiska pułapki stagnacji przypisuje się T. Malthusowi. W swojej słynnej rozprawie *An essay on the principle of population* z 1798 roku zwrócił uwagę na kluczowe źródła generowania stagnacji w przeciętnym poziomie życia, a mianowicie na dodatni związek przyrostu naturalnego z produkcją oraz ograniczoną dostępnością podstawowego czynnika produkcji, jakim była wówczas ziemia. W literaturze przyjęło się nazywać ten okres rozwoju gospodarki „epoką Malthusa” lub „pułapką maltuzjańską”.

wej produktywności pracy) jest permanentnie niwelowany przez wysoki postęp technologiczny, który umożliwia wzrost produkcji *per capita*. Mamy zatem dwa równoległe występujące efekty, które do tej pory wykluczały się nawzajem: wzrost poziomu życia i wynikającą z niego rosnącą dynamiką ludności. Kończy się okres stagnacji gospodarczej.

Górnym kresem dynamiki ludności jest stopa urodzeń, gdyby nadal utrzymywać, że stopa zgonów jest ściśle monotonicznie malejącą funkcją poziomu życia. Oczywiście stopa zgonów nie może cały czas maleć pod wpływem poprawy warunków życia. Pewna wysokość stopy zgonów nie może być wyeliminowana. Możemy zatem przyjąć, że w długim okresie, gdy poziom życia będzie poprawiał się dzięki postępowi technologicznemu, dynamika ludności będzie zbiegać do stałej wielkości, niezależnej od produkcji *per capita*.



Rysunek 6.4. Dynamika gospodarki dla $\frac{\alpha}{1-\alpha} g_A \geq b$

Jak widzimy, jednym z kluczowych czynników, który mógł spowodować wyjście gospodarki ze stagnacji poziomu życia, był postęp techniczny. Uchylmy założenie o jego egzogenicznym źródle.

Tworzenie nowej wiedzy, która stanowi podstawę zmian technicznych, zawdzięczamy w tamtym okresie historycznym przede wszystkim utalentowanym ludziom działającym w praktyce gospodarczej. Nie istniał sektor wytwórczości wiedzy użytecznej praktycznie. Taki sektor zaczął się kształtować dopiero w drugiej połowie XIX wieku. Do tego czasu utalentowani praktycy za pomocą kolejnych eksperymentów, metody prób i błędów pokonywali trudności w procesie produkcji

i doskonalili produkty. Tak wynaleziono między innymi beton, cegłę wypalaną (ceramiczną), opracowano standaryzację procesów produkcyjnych, orkę sprzężającą. Taki sposób kreowania nowej wiedzy nazywamy *learning by doing*.

Proces *learning by doing* przebiega dwoma kanałami: pierwszy to przypadkowe tworzenie nowatorskich, unikatowych wynalazków, a drugi to kreowanie na ich bazie mutacji, które są rozpraszane w gospodarce. Tak wygenerowaną nową wiedzę zmierzmy za pomocą nowej wytwórczości. Część ω zagregowanej produkcji Y jest wynikiem zastosowania nowej wiedzy powstałej w praktyce (*learning by doing*). Czyli parametr ω określa, ile przeciętnie całkowicie nowych, nieznanych do tej pory wynalazków pojawia się na 100 wyprodukowanych jednostek zagregowanej produkcji. W tym sensie wynalazczość jest procesem losowym. Z drugiej strony ta nowa wiedza, dzięki swojej własności dobra publicznego, rozprzestrzenia się na pozostałą produkcję. Staje się w ten sposób źródłem tworzenia nowych, zmodyfikowanych wynalazków, opartych na pierwotnych pomysłach. Istotne jest to, że modyfikacje te powstają również w procesie produkcji. Są efektem ubocznym działań produkcyjnych. Funkcję tworzenia wiedzy jako efektu zewnętrznego zapiszemy:

$$\dot{A} = (\omega Y)^\varphi, \text{ gdzie: } 0 < \omega < 1, \varphi \geq 1. \quad (6.8)$$

Parametr φ informuje o stopniu rozpraszania pierwotnych wynalazków we wtórnych wynalazkach. $\varphi = 1$ oznacza, że nie ma rozproszenia, że nowe wynalazki nie przekładają się na kolejne udoskonalenia i mutacje pierwotnych wynalazków. $\varphi > 1$ oznacza, że nowa wiedza jest wykorzystywana do dalszych wynalazków. Można wyobrazić sobie, iż $\varphi < 1$. Oznaczałoby to, że wtórna fala wynalazków jest właściwie falą antywynalazków, niszczy pierwotne idee. Taką destrukcyjną działalność trudno sobie wyobrazić, chociaż nie można jej wykluczyć⁹¹. Przyjmijmy zatem, że $\varphi \geq 1$, co raczej odpowiada rzeczywistości w długim okresie.

Z podstawienia (6.2) do (6.8) otrzymujemy ostateczną funkcję tworzenia wiedzy w procesie *learning by doing*:

$$\dot{A} = \rho A^{\alpha\varphi} L^{\alpha\varphi}, \text{ gdzie: } \rho \equiv \omega^\varphi. \quad (6.9)$$

Na tworzenie wiedzy w postaci efektów zewnętrznych wpływ ma zarówno liczba zatrudnionych (równa z założenia liczbie ludności), jak i aktualny, istniejący w danym momencie zasób wiedzy. Ponieważ $0 < \alpha < 1$ oraz $\varphi \geq 1$, to $\alpha\varphi > 0$. Jednak

⁹¹ Przykładem może być dosyć poważny regres w stosowanych technikach po upadku Cesarstwa Rzymskiego, który doprowadził do wyludnienia miast i daleko idącego obniżenia poziomu higieny.

gdy $\alpha\varphi > 1$, czyli mielibyśmy rosnące przychody z istniejącego zasobu wynalazków, to dla każdego wyjściowego poziomu wiedzy $A > 0$ dynamika wiedzy cały czas przyspieszałaby aż do nieskończoności, co jest absurdem ekonomicznym. Zatem realnym wariantem jest przyjęcie, że $0 < \alpha\varphi \leq 1$. Wówczas mielibyśmy malejące lub stałe przychody zarówno z wiedzy, jak i z pracy oraz rosnące (dla $2\alpha\varphi > 1$ i $\varphi \geq 1$), malejące (dla $2\alpha\varphi < 1$ i $\varphi \geq 1$) lub stałe (dla $2\alpha\varphi = 1$ i $\varphi > 1$) przychody względem tych dwóch czynników.

Wyznamy warunki, dla których tempo wzrostu poziomu wiedzy stabilizowałoby się, czyli gdy $\dot{g}_A = 0$. Tempo wzrostu poziomu wiedzy jest równe:

$$g_A = \rho A^{\alpha\varphi-1} L^{\alpha\varphi}. \quad (6.10)$$

Różniczkując (6.10) po czasie, otrzymujemy:

$$\dot{g}_A = \rho(\alpha\varphi - 1)A^{\alpha\varphi-2}L^{\alpha\varphi}\dot{A} + \rho\alpha\varphi A^{\alpha\varphi-1}L^{\alpha\varphi-1}\dot{L}, \quad (6.11)$$

co można zapisać jako:

$$\dot{g}_A = (\alpha\varphi - 1)g_A g_A + \alpha\varphi g_A g_L. \quad (6.12)$$

To jest równe zero, gdy:

$$g_A = \frac{\alpha\varphi}{1 - \alpha\varphi} g_L. \quad (6.13)$$

Czyli jeżeli tempo wzrostu postępu technicznego osiągnie wartość wprost proporcjonalną do tempa wzrostu liczby ludności określoną przez wzór (6.13), to stabilizuje się ono na stałym poziomie. Oznacza to, że wpływ istniejącej wiedzy jest kompensowany efektami zmiany zatrudnienia. Pierwszy człon równania (6.11), na mocy przyjętych założeń dotyczących postępu technicznego, jest zawsze ujemny. Inaczej mówiąc, już osiągnięta dynamika postępu technologicznego obniża jej wysokość w następnych okresach. Jest to efekt malejących przychodów z tworzenia nowych idei w procesie *learning by doing* ($0 < \alpha\varphi < 1$). Każdy kolejny wynalazek, przy danej liczbie ludności, jest w stanie przyczynić się do generowania nowych użytecznych idei w coraz mniejszym stopniu. Czyli przy danym zasobie pracy im większy jest zasób wiedzy, tym mniejsze jego tempo wzrostu. Drugi człon równania (6.11) opisuje wpływ na dynamikę postępu technicznego zmiany w dynamice ludności. Ponieważ dynamika ludności może być dodatnia lub ujemna, to wpływ czynnika ludnościowego na przyrost dynamiki postępu technicznego jest również dodatni

lub ujemny. Przy danej dynamice postępu technicznego wzrost dynamiki ludności pozytywnie wpływa na dynamikę postępu technicznego. Wynika to z faktu, że wzrost liczby ludności przy danym zasobie wiedzy zwiększa strumień nowych wynalazków dzięki wzrostowi produkcji. Ponieważ mamy przyrost wiedzy przy danym jej zasobie, oznacza to, że tempo przyrostu tej wiedzy rośnie. Gdy liczba ludności spadnie, zjawiska będą przebiegały w przeciwnym kierunku, czyli zmniejszy się przyrost wynalazków, co prowadzi do spadku jego tempa wzrostu.

Gdy wpływ liczby ludności i zasobu wiedzy równoważy się, to dynamika postępu technicznego stabilizuje się na stałym poziomie. Ma to miejsce wtedy, gdy $\dot{g}_A = 0$, czyli musi być spełniony warunek (6.13). Gdyby tempo postępu nie spełniało

tego warunku i było na takim poziomie, że $g_A > \frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} g_L$, to $\dot{g}_A < 0$ i tempo zmniejszałoby się. Jeśli $g_A < \frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} g_L$, to $\dot{g}_A > 0$ i dynamika postępu technicznego rosłaby.

Rysunek 6.5 podsumowuje dotychczasowe rozważania o dynamice postępu technicznego. Linia $\dot{g}_A = 0$ pokazuje dynamikę postępu technicznego, która dla danego poziomu produkcji *per capita* jest stała. Wyróżniamy trzy możliwości położenia tej linii: a) gdy jest położona powyżej wykresu dynamiki ludności, co

ma miejsce, gdy $\frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} > 1$, b) gdy jest położona poniżej linii przebiegu dynamiki ludności, co wystąpi dla $\frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} < 1$, c) gdy pokrywa się z linią dynamiki ludności,

gdy $\frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} = 1$. Przypadek a) wymaga, aby proces *learning by doing* charaktery-

zował się rosnącymi przychodami skali $\varphi > \frac{1}{2\alpha}$, b) malejącymi $\varphi < \frac{1}{2\alpha}$, c) stałymi

$$\varphi = \frac{1}{2\alpha}.$$

Gdyby dynamika postępu technicznego przebiegała wzdłuż linii $\dot{g}_A = 0$, to stabilizowałby się dla dowolnego $y > 0$. Natomiast w przypadku gdyby postęp technologiczny osiągnął niższą wartość, to stopa zmiany jego dynamiki byłaby dodatnia ($\dot{g}_A > 0$). Gdyby był większy, to stopa zmiany jego dynamiki byłaby ujemna ($\dot{g}_A < 0$). Na rysunku 6.5 ruch dynamiki postępu technologicznego pokazują pionowe strzałki. Ponieważ dla każdego $y > 0$ mamy $g_A > 0$, to na rysunku 6.5 wyróżniamy dwa obszary kształtowania się dynamiki postępu tech-

nologicznego. Niech \bar{y} oznacza produkcję *per capita*, przy której $g_L = 0$. Dla

$y < \bar{y}$ dynamika ludności jest ujemna, zatem zawsze zachodzi $g_A > \frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} g_L$,

czyli w tym obszarze mamy opadającą dynamikę postępu technicznego (pionowa strzałka skierowana do dołu). Natomiast dla $y > \bar{y}$ może zajść zarówno

$g_A < \frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} g_L$, jak i $g_A > \frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} g_L$, czyli dynamika postępu technologicznego

może być opadająca (powyżej linii $\dot{g}_A = 0$) lub rosnąca (poniżej linii $\dot{g}_A = 0$). Ze wzoru (6.4) wynika, że produkcja na mieszkańca stabilizuje się, czyli $\dot{y} = 0$, jeśli jest spełniony warunek:

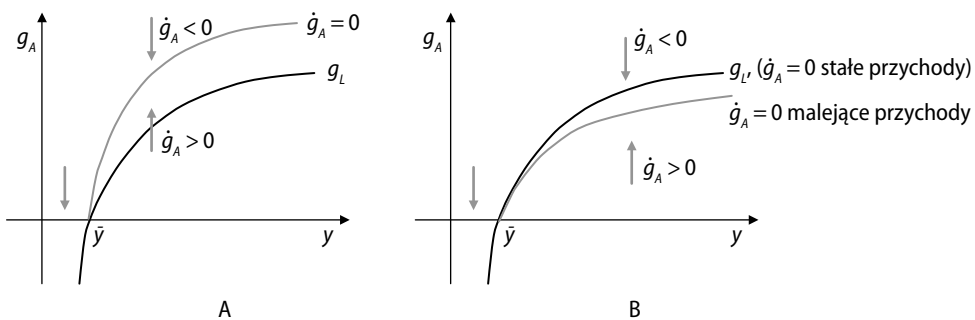
$$g_A = \frac{1-\alpha}{\alpha} g_L. \quad (6.14)$$

Jeśli takie tempo osiąga endogeniczny postęp techniczny, to produkcja na miesz-

kańca się stabilizuje. Gdyby zachodziło $g_A > \frac{1-\alpha}{\alpha} g_L$, to $\dot{y} > 0$, czyli produkcja

na mieszkańca rosłaby. W przypadku $g_A < \frac{1-\alpha}{\alpha} g_L$ mielibyśmy $\dot{y} < 0$ i produkcja

spadałaby.



Rysunki 6.5A i 6.5B. Dynamika postępu technologicznego

Opis: A – dla rosnących przychodów ze skali, B – dla malejących i stałych przychodów ze skali.

Na rysunku 6.6 linia $\dot{y} = 0$ pokazuje dynamikę postępu technologicznego, przy której produkcja stabilizuje się. Wyróżniamy trzy możliwości położenia tej linii:

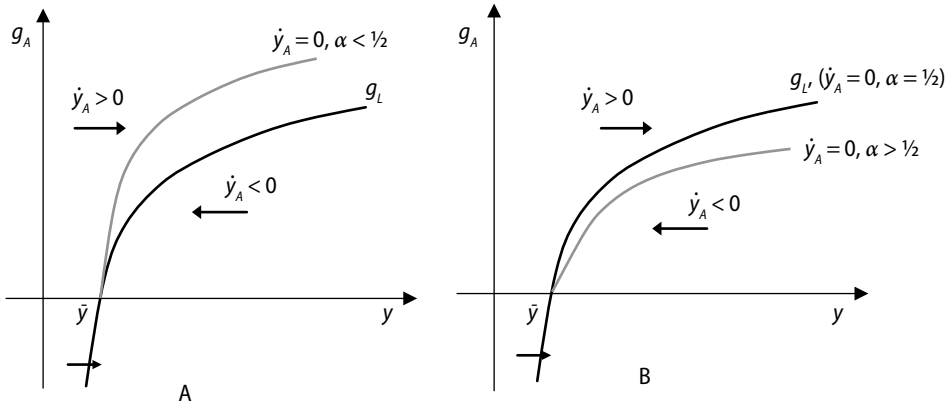
a) gdy jest położona powyżej wykresu dynamiki ludności, co ma miejsce, gdy $\frac{1-\alpha}{\alpha} > 1$, b) leży poniżej przebiegu dynamiki ludności, co wystąpi dla $\frac{1-\alpha}{\alpha} < 1$,

c) pokrywa się z linią dynamiki ludności, gdy $\frac{1-\alpha}{\alpha} = 1$. Przypadek a) wymaga, aby

$\alpha < 1/2$, przypadek b) jest równoznaczny z $\alpha > 1/2$, natomiast c) oznacza $\alpha = 1/2$. Rysunek 6.6 pokazuje wszystkie trzy przypadki. Podobnie jak przy wykreślaniu linii $\dot{g}_A = 0$ bierzemy pod uwagę, że dynamika postępu technicznego jest zawsze nieujemna. Dlatego też dla wartości produkcji niższej od \bar{y} zawsze zachodzi

$g_A > \frac{1-\alpha}{\alpha} g_L$, a z tego wynika, że w tym obszarze produkcja rośnie ($\dot{y} > 0$, poka-

zuje to pozioma strzałka skierowana na prawo). Dla produkcji większej od \bar{y} mogą zajść wszystkie trzy przypadki. Rysunek 6.6A pokazuje przypadek dla $\alpha < 1/2$. Linia $\dot{y} = 0$ pokazuje tempo wzrostu postępu technicznego, przy którym stopa zmiany produkcji jest równa zero i produkcja musi się stabilizować. Gdyby dynamika postępu technicznego była wyższa niż wytyczona przez linię $\dot{y} = 0$, to produkcja rosłaby ($\dot{y} > 0$). W przeciwnym przypadku – niższej dynamiki postępu technologicznego, produkcja spadałaby ($\dot{y} < 0$, pokazuje to pozioma strzałka skierowana na lewo). Rysunek 6.6B pokazuje przypadek dla $\alpha \geq 1/2$. Jego interpretacja jest analogiczna do interpretacji rysunku 6.6A.



Rysunki 6.6A i 6.6B. Dynamika produkcji *per capita* względem dynamiki postępu technicznego

Opis: Rysunek 6.6A dla $\alpha < \frac{1}{2}$, rysunek 6.6B dla $\alpha \geq \frac{1}{2}$.

Wyraźmy postęp technologiczny w funkcji produkcji *per capita*, dzięki czemu można będzie analizować dynamikę systemu w układzie produkcja *per capita* a dynamika postępu i ludności. W tym celu wzór (6.8) przekształćmy do postaci:

$$g_A = \rho \frac{L^\varphi}{A} y^\varphi. \quad (6.15)$$

Natomiast produkcja na mieszkańca jest już opisana wzorem (6.3). Równania (6.15) i (6.3) są wystarczające do wyznaczenia dynamiki postępu technologicznego, gdy zanany jest poziom zatrudnienia i techniki w danym okresie.

Dysponujemy już wszystkimi równaniami opisującymi dynamikę gospodarki (6.15, 6.7 i 6.3). Są to równania pozwalające ustalić dynamikę postępu technicznego i dynamikę ludności:

$$g_A = \rho \frac{L^\varphi}{A} y^\varphi, \quad (6.15)$$

$$g_L = b - a(y), \quad (6.7)$$

$$y = A^\alpha L^{\alpha-1}, \quad 0 < \alpha < 1, \quad A_0 > 0, \quad L_0 \geq 1. \quad (6.3)$$

Drugą grupę stanowią równania określające warunki stabilizacji postępu technologicznego i produkcji *per capita*:

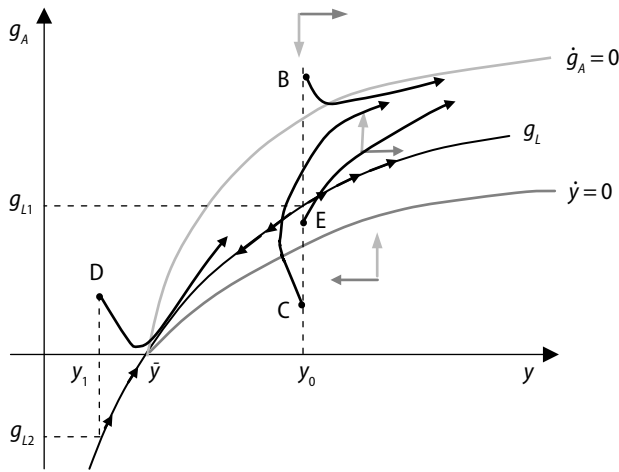
$$\dot{g}_A = 0, \text{ gdy } g_A = \frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} g_L, \quad (6.13)$$

$$\dot{y} = 0, \text{ gdy: } g_A = \frac{1-\alpha}{\alpha} g_L. \quad (6.14)$$

Wzajemne oddziaływanie dynamiki postępu technologicznego, ludności oraz produkcji *per capita* rozstrzyga o ogólnej dynamice gospodarki, którą mierzymy dynamiką produkcji *per capita*.

Analizę rozpoczynamy od początkowych wartości L oraz A . Na ich podstawie można wyznaczyć y i następnie z równania (6.10) dynamikę ludności i z (6.15) dynamikę postępu technicznego. Aby gospodarka była w długookresowej równowadze, muszą być równocześnie spełnione równania (6.13) i (6.14). Dlatego też dla analizy dynamiki gospodarki kluczowe znaczenie ma wzajemne położenie linii $\dot{g}_A = 0$ i $\dot{y} = 0$ względem siebie. To położenie wyznacza równoczesny kierunek zmiany postępu technicznego oraz produkcji *per capita*. Dla dynamiki systemu drugorzędne znaczenie ma położenie tych linii względem dynamiki ludności g_L .

Z punktu widzenia wzajemnego położenia linii $\dot{g}_A = 0$ i $\dot{y} = 0$ możemy wyróżnić trzy przypadki: 1) linia $\dot{g}_A = 0$ leży powyżej linii $\dot{y} = 0$, gdy $\frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} > \frac{1-\alpha}{\alpha}$, 2) linia $\dot{g}_A = 0$ leży poniżej linii $\dot{y} = 0$, gdy $\frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} < \frac{1-\alpha}{\alpha}$, 3) linia $\dot{g}_A = 0$ pokrywa się z linią $\dot{y} = 0$, gdy $\frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} = \frac{1-\alpha}{\alpha}$.



Rysunek 6.7. Dynamika gospodarki dla $\frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} > \frac{1-\alpha}{\alpha}$

Ad 1) Załóżmy, że mamy dane początkowe wartości A_0 i L_0 . Można zatem wyznaczyć produkcję *per capita*. Niech będzie równa y_0 . Dla y_0 dynamika ludności wynosi g_{L1} (rys. 6.7). Mając A_0 i L_0 oraz y_0 możemy wyznaczyć dynamikę postępu technicznego g_A na podstawie wzoru (6.15). Przyjmijmy, że początkowo zasób ludności jest relatywnie obfity przy danym poziomie techniki A_0 oraz występują silne efekty wtórnego modyfikowania pierwotnych wynalazków (wysoki

parametr φ). Da to ostatecznie relatywnie wysoki iloraz $\frac{L^\varphi}{A}$ i dla danego y_0 rela-

tywnie wysokie tempo postępu technicznego. Załóżmy, że jest ono określone przez punkt B. Dynamika postępu technicznego na tym poziomie zdecydowanie przewyższa tę wymaganą dla stabilizacji produkcji *per capita* (linia $\dot{y} = 0$). Zatem wzrośnie ona doprowadzając do wyższej dynamiki ludności (pokazują to strzałki

na prawo na linii g_L). Równocześnie dynamika postępu technicznego nie jest w stanie się utrzymać (leży powyżej linii $\dot{g}_A = 0$) i będzie opadać. Gdy dotrze do linii $\dot{g}_A = 0$, nie zatrzyma się na niej, gdyż równocześnie pchany jest przyrost produkcji, który nadal pobudza dynamikę ludności, która z kolei przyczynia się do powiększenia strumienia wynalazków poprzez *learning by doing* i powstrzymuje dalszy spadek dynamiki postępu technicznego. Te dwa procesy – wzrost produkcji i dynamiki postępu technicznego – powodują, że wzrost gospodarczy zaczyna się endogenicznie podtrzymywać: wysoka dynamika postępu technicznego pobudza wzrost produkcji, który pobudza dynamikę ludności, która z kolei podtrzymuje na rosnącym poziomie procesy *learning by doing*, które przyspieszają dynamikę postępu technicznego. Ponieważ mamy do czynienia z gasnącym przyrostem dynamiki ludności, cały ten proces również wykazuje tendencję do wygasania przyspieszenia dynamiki postępu technicznego i w konsekwencji dynamiki produkcji *per capita*.

Gdy punktem wyjścia jest C, czyli relatywnie mniej obfita jest ludność (niski

iloraz $\frac{L^\varphi}{A}$ lub parametr φ), to początkowo dochodzi do spadku produkcji. Dyna-

mika postępu technologicznego jest za mała, aby kompensować negatywne efekty dynamiki ludności. Zmniejszenie produkcji prowadzi do spadku dynamiki ludności (strzałki na lewo na linii g_L). Z kolei spadek dynamiki ludności negatywnie wpływa na dynamikę postępu technicznego. Jesteśmy jednakże w obszarze, gdzie nadal są silne efekty postępu technicznego na sam postęp techniczny. Nowe wynalazki i zmutowane przyczyniają się do silnych przyrostów (choćby malejących) kolejnych wynalazków, co w konsekwencji powoduje, że $\dot{g}_A > 0$ (jesteśmy poniżej linii $\dot{g}_A = 0$). Rosnąca dynamika postępu technicznego osłabia siłę spadku produkcji (poruszamy się po skosie ku górze na lewo, co oznacza, że dynamika postępu rośnie przy spadającej produkcji *per capita*). Gdy zostaje osiągnięta linia $\dot{y} = 0$, postęp techniczny osiąga wówczas dynamikę kompensującą negatywne efekty wzrostu ludności i produkcja oraz dynamika ludności stabilizują się na stałym poziomie. Jednak jest to tylko chwilowe zjawisko. Nadal mamy do czynienia z silnym oddziaływaniem samego postępu technicznego na proces *learning by doing*, nadal $\dot{g}_A > 0$, czyli dynamika postępu technicznego nadal rośnie. To powoduje, że produkcja również ostatecznie wzrośnie przyczyniając się do wzrostu dynamiki ludności. To z kolei przyspiesza wzrost dynamiki postępu technicznego i owocuje kolejnym wzrostem dynamiki ludności i przyrostem produkcji *per capita*. Poruszamy się wzdłuż linii g_L ku górze, a dynamika postępu technicznego zmierza po skosie na prawo ku linii $\dot{g}_A = 0$. Tak jak w poprzednim przypadku mamy do

czynienia z gasnącym przyrostem dynamiki ludności. To powoduje, że przyrosty dynamiki postępu technicznego i w konsekwencji dynamiki produkcji *per capita* również będą stopniowo wygasały.

Podobna jest analiza punktu E jako wyjściowego. Jesteśmy w obszarze dodatniego zarówno przyrostu dynamiki postępu technicznego ($\dot{g}_A > 0$) jaki przyrostu produkcji *per capita* ($\dot{y} > 0$). Dynamika postępu technicznego będzie zmierzała do linii $\dot{g}_A = 0$, a dynamika ludności będzie się powiększała wzdłuż linii g_L .

Interesujący jest punkt D z ujemnym tempem wzrostu ludności. Spadająca liczba ludności powiększa produkcję *per capita* (strzałki ku górze na linii g_L). Równocześnie mamy do czynienia ze spadającym tempem postępu technicznego z powodu ujemnego tempa wzrostu ludności. Nie spada ono jednak do zera, gdyż zawsze $L > 0$ i $A > 0$. Dzięki temu, gdy produkcja wzrośnie do poziomu \bar{y} , przy którym dynamika ludności wyniesie zero, to taka sytuacja jest tylko chwilowa. Dynamika postępu technicznego większa od zera powoduje wzrost produkcji, który pociąga za sobą wzrost dynamiki ludności. Ona z kolei przyczynia się do wzrostu dynamiki postępu technicznego. Ponownie gospodarka wchodzi na ścieżkę samopodtrzymującego się wzrostu produkcji *per capita* dzięki wzajemnemu oddziaływaniu rosnących dynamik postępu technicznego i ludności.

Startując z dowolnego poziomu y i g_A , gospodarka zawsze wkracza na ścieżkę samopodtrzymującego się wzrostu gospodarczego. Możemy wyznaczyć jego tempo ze wzoru:

$$\frac{\dot{y}}{y} = \alpha g_A - (1 - \alpha) g_L. \quad (6.16)$$

Tempa g_L i g_A możemy wyznaczyć dla rosnącej wartości y w miarę upływu czasu:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} g_L = b. \quad (6.17)$$

Gdy warunki życia poprawiają się w miarę wzrostu produkcji *per capita*, to dynamika ludności jest determinowana przez dynamikę urodzeń (która jest egzogeniczna w naszym modelu). Jednocześnie stopa zmiany tempa postępu technicznego będzie wygasała. Inaczej mówiąc, dynamika g_A zmierza do linii $\dot{g}_A = 0$, czyli:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} g_A = \frac{\alpha \varphi}{1 - \alpha \varphi} b. \quad (6.18)$$

Po podstawieniu (6.17) i (6.18) do (6.16) otrzymujemy tempo wzrostu produkcji w długim okresie:

$$g_y = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha\varphi} - 1 \right) b > 0, \text{ dla: } \alpha\varphi \leq 1, \varphi > \frac{1 - \alpha}{\alpha}. \quad (6.19)$$

Do takiego tempa gospodarka zbliża się asymptotycznie w miarę upływu czasu. Jest to długookresowa stabilna równowaga, co oznacza, że jakiegokolwiek odchylenia od niej sprowadzą ją z powrotem na ścieżkę asymptotycznie zbliżającą się do tempa (6.19). Gdy gospodarka osiągnie linię $\dot{g}_A = 0$, stabilizującą tempo postępu technicznego, to równocześnie będzie to tempo większe od niezbędnego do stabilizacji produkcji *per capita*. Zatem produkcja ta rośnie, pobudzając tempo wzrostu liczby ludności, które asymptotycznie zbliża się do dynamiki urodzeń (b). Z kolei zwiększające się tempo wzrostu ludności pociąga za sobą zwiększenie dynamiki postępu technicznego, która jest ponownie wytrącona poza linię $\dot{g}_A = 0$. Wyższa dynamika ludności ponownie kieruje tempo techniki ku linii stabilizacji $\dot{g}_A = 0$. Ta ciągła interakcja pomiędzy dynamiką ludności i techniki powoduje,

że asymptotycznie ta ostatnia zbliża się do wartości $\frac{\alpha\varphi}{1 - \alpha\varphi} b$. Gospodarka jest

asymptotycznie stabilna.

Zgodnie ze wzorem (6.19) długookresowa dynamika produkcji jest zdeterminowana przez trzy parametry modelu: stopę urodzeń (b), elastyczność zagregowanej produkcji względem pracy (α) i współczynnik kreowania wtórnych wynalazków (φ). Zależność tempa produkcji od wszystkich trzech parametrów jest dodatnia. Wpływ parametru α jest prosty do wyjaśnienia. Im jest on wyższy, tym silniej reaguje produkcja na jednoprocentową zmianę zatrudnienia. Wzrost produkcji zwiększa strumień wynalazków. Rośnie tempo postępu technicznego, które bezpośrednio przyczynia się do wzrostu dynamiki produkcji *per capita* (wzór (6.3)). Natomiast b określa górną granicę dynamiki ludności, która z założenia jest równa dynamice zatrudnienia. Im wyższe b przy danym α , tym większy jest przyrost produkcji i następnie postępu technologicznego. Natomiast im większy jest parametr φ , tym więcej jest wtórnych wynalazków i rośnie dynamika postępu technicznego, która ostatecznie podnosi tempo produkcji *per capita*. Może budzić pewne zdziwienie brak parametru β , który określa skalę oryginalnych wynalazków. Określa on pośrednio tempo wzrostu produkcji *per capita*. Pamiętajmy, że $\varphi \geq 1$, co oznacza, że zawiera on w sobie oryginalne wynalazki dla $\varphi = 1$. Tylko „nadwyżka” φ ponad 1 wynika z faktu pojawienia się wtórnych wynalazków. Ponadto gdyby nastąpiła trwała zmiana β , to miałyby ona wpływ na dynamikę postępu technicznego, i tym samym produkcji, tylko przejściowy. Ostatecznie dynamika postępu technicznego zmierzałaby asymptotycznie do linii $\dot{g}_A = 0$,

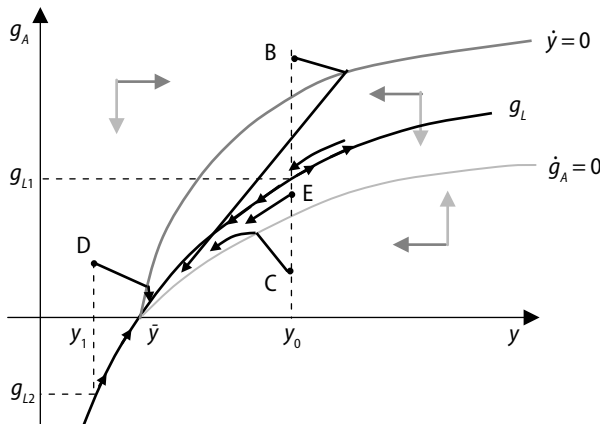
Ad 2) Wymagane tempo postępu technicznego dla jego stabilizacji jest niższe niż tempo wymagane dla stabilizacji produkcji *per capita* (rys. 6.10) Załóżmy, że początkowe wartości A_0 i L_0 oraz wielkość parametru φ ustalają poziom postępu technicznego w punkcie B dla produkcji y_0 . Dzięki tak wysokiemu postępowi technicznemu poruszamy się początkowo ku wyższym wartościom y . Jednak dynamika ludności jest za mała, aby takie tempo techniki mogło się utrzymać, dlatego też mimo wzrostu produkcji *per capita* g_A spada (poruszamy się z punktu B po skosie do dołu na prawo). Gdy osiągniemy linię $\dot{y} = 0$, dynamika postępu technicznego obniży się na tyle, że będzie ona za mała, aby utrzymać osiągnięty poziom y , i produkcja zacznie spadać. Wraz ze spadkiem produkcji zmniejsza się dynamika ludności, co prowadzi do dalszego spadku dynamiki postępu technicznego. Zarówno dynamika techniki, jak i ludności zamierza asymptotycznie do zera. W konsekwencji również dynamika produkcji asymptotycznie zmierza do zera. Gospodarka znajduje się w stagnacji. Poziom życia zmienia się prawie niezauważalnie. Nieznacznie powiększa się również populacja i zasób użytecznej wiedzy odzwierciedlony w różnych zrealizowanych wynalazkach.

Podobny efekt końcowy uzyskamy, startując z punktu C. Początkowo dynamika postępu technicznego jest za mała, aby utrzymać produkcję *per capita*. Ta ostatnia będzie wobec tego spadała. Jednak dynamika ludności jest na tyle wysoka, że pobudza tempo postępu technicznego. Poruszamy się zatem po skosie na lewo do góry. Gdy dynamika postępu technicznego osiągnie linię swojej stabilizacji ($\dot{g}_A = 0$), będzie to tylko chwilowa równowaga. Równocześnie tempo to nadal jest za niskie, aby stabilizować produkcję *per capita*, która nadal spada. Jej spadek pociąga za sobą spadek dynamiki ludności, który powoduje zmniejszenie dynamiki postępu technicznego. Gospodarka asymptotycznie zbliża się do poziomu produkcji \bar{y} , zerowej dynamiki postępu technicznego i ludności. Ponownie mamy sytuację stagnacji.

Podobny efekt asymptotycznego zmierniania do zerowej dynamiki zarówno ludności, jak i postępu technicznego oraz stabilizowania się produkcji w pobliżu wartości nieznacznie przekraczającej \bar{y} uzyskujemy, gdy wyjdziemy ze stanów początkowych określonych punktami D oraz E. W tym ostatnim dynamika postępu technicznego jest początkowo za wysoka w stosunku do dynamiki ludności i będzie spadać, uruchamiając proces spadku produkcji w pobliże punktu \bar{y} .

W przypadku punktu D mamy trochę inną sytuację – dynamika postępu technicznego jest dodatnia, a dynamika ludności jest ujemna. Jak pamiętamy, sam fakt spadku liczby ludności, dzięki prawu malejących przychodów z pracy, oznacza zwiększanie produkcji *per capita*. Ten wzrost produkcji jest dodatkowo wzmacniany przez dodatnią dynamikę postępu technicznego. Gospodarka zmierza do produkcji

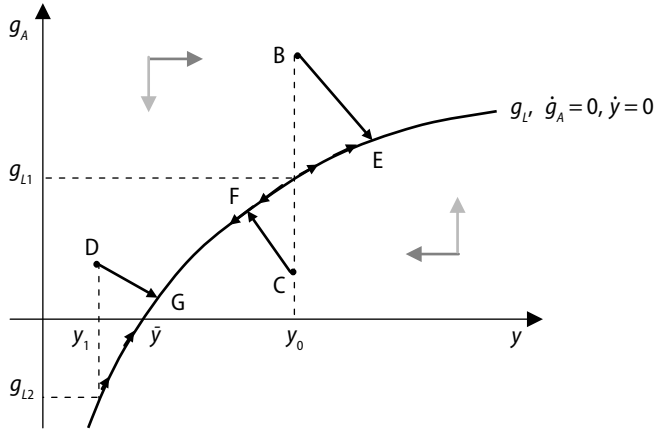
równej \bar{y} . Gdy ją osiągnie, jest niej wytrącana przez dodatnią dynamikę postępu technicznego. Rosnąca produkcja zapewnia dodatnią dynamikę ludności. Jednak dynamika postępu technicznego jest nadal powyżej poziomu, który ją stabilizuje. Będzie zatem dalej spadać. Gospodarka znajdzie się w obszarze, w którym następuje spadek dynamiki techniki i produkcji *per capita* (pomiędzy liniami $\dot{y} = 0$ i $\dot{g}_A = 0$). Dynamika techniki i ludności ponownie asymptotycznie zmierza do zera, a produkcja – do poziomu \bar{y} . Gospodarka wchodzi w okres stagnacji poziomu życia.



Rysunek 6.8. Dynamika gospodarki dla $\frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} < \frac{1-\alpha}{\alpha}$

Ad 6) W tym szczególnym przypadku linie $\dot{g}_A = 0$ i $\dot{y} = 0$ pokrywają się z linią g_L (rys. 6.9). Proces *learning by doing* ogranicza się tylko do tworzenia oryginalnych wynalazków, które nie są dalej rozprzestrzeniane w zmutowanej formie. Gdy punktem wyjścia jest B, to gospodarka zmierza do punktu E, który jest punktem stabilnej równowagi długookresowej. W tym punkcie tempo postępu technicznego równa się zarazem tempu wymaganemu do jego stabilizacji i stabilizacji produkcji *per capita*. Dodatkowo efekty postępu technicznego w produkcji *per capita* są dokładnie równoważone przez ujemny wpływ dynamiki ludności. Dlatego też produkcja pozostaje na stałym poziomie. Podobnie jest dla punktów D i C. Punkty E, F, G są punktami stanu ustalonego dla produkcji *per capita* w zależności od wyjściowego poziomu dynamiki postępu technicznego. Nie występuje zjawisko samopodtrzymującego się wzrostu produkcji. Produkcja może rosnąć tylko pod wpływem egzogenicznej zmiany parametru ω lub parametrów określających dynamikę ludności (zmiana stopy urodzeń b lub egzogeniczna zmiana stopy umieralności dla danego y). Jednak każda taka zmiana ma wygasające efekty we wzroście y . Stopa urodzeń nie może

spaść do zera, a ω może co najwyżej wzrosnąć do 1, z kolei stopa wymieralności nie może być wyższa od 1. To stanowi kres dla podnoszenia dynamiki y .



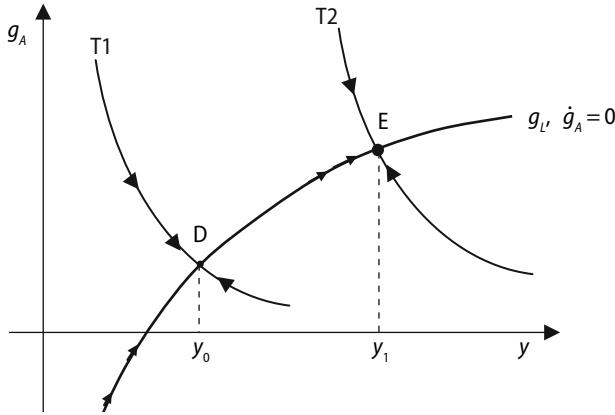
Rysunek 6.9. Dynamika gospodarki dla $\frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} = \frac{1-\alpha}{\alpha}$

W tym szczególnym trzecim przypadku bardzo łatwo wyznaczyć dynamikę postępu technicznego w funkcji produkcji *per capita*⁹²:

$$g_A = \omega \frac{1-\alpha}{\alpha} y^{-1}. \quad (6.20)$$

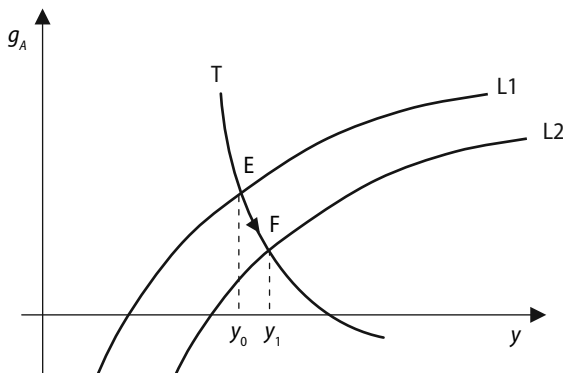
Parametr ω wyznacza położenie funkcji dynamiki postępu technicznego, która jest malejącą funkcją produkcji *per capita*. Załóżmy, że wyjściowy stan długookresowej równowagi znajduje się w punkcie D (rys. 6.10). Niech w procesie *learning by doing* wzrośnie zdolność do kreowania oryginalnych wynalazków na jednostkę produkcji. Wykres postępu technicznego przesuwa się na prawo z T1 do T2. Mamy nowy punkt długookresowej równowagi E przy wyższym poziomie produkcji *per capita*. W okresie przejściowym dynamika produkcji była większa od zera. Jednak po dojściu do nowego stanu ustalonego ponownie jest równa zero. Gdyby przyjąć, że T2 jest dla maksymalnej wartości parametru ω , czyli 1, to w punkcie E gospodarka osiągnęła kres powiększania produkcji *per capita* w wyniku rozszerzenia efektów procesu *learning by doing*.

⁹² Dynamika postępu technicznego dla $\varphi = \frac{1-\alpha}{\alpha}$ jest równa $g_A = \omega^\varphi (L^{\alpha-1} A^\alpha)^{-1}$. Po uwzględnieniu, że wyrażenie w nawiasie jest równe produkcji *per capita*, otrzymujemy ostatecznie: $g_A = \omega^\varphi y^{-1}$.



Rysunek 6.10. Dynamika gospodarki dla $\frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} = \frac{1-\alpha}{\alpha}$ z postępowem technicznym
T1 dla $0 < \omega < 1$, T2 dla $\omega = 1$

Inną możliwością wzrostu produkcji jest zmiana dynamiki ludności w wyniku obniżenia stopy urodzeń lub podniesienia stopy śmiertelności przy danym poziomie produkcji y (rys. 6.11). Niech gospodarka umiejscowiona zostanie w punkcie E. Jeśli stopa urodzeń spadnie lub wzrośnie śmiertelność, albo równocześnie wystąpi jedno i drugie, to linia dynamiki ludności przesunie się z L1 do L2. Punkt równowagi przesunie się z E do F. Ponownie okres przejściowy charakteryzuje się dodatnim tempem wzrostu gospodarczego. Jednak w nowym stanie ustalonym wzrost ustaje.



Rysunek 6.11. Dynamika gospodarki dla $\frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi} = \frac{1-\alpha}{\alpha}$ z postępowem technicznym
T i spadkiem stopy urodzeń lub wzrostem stopy umieralności

Stan ustalony charakteryzuje się tym, że dynamika postępu technicznego jest równa dynamice ludności. Całość efektów postępu technicznego jest zamieniana na przyrost ludności (sytuacja podobna do pułapki Malthusa). Tylko w okresie przejściowym wzrost postępu technicznego powoduje równocześnie wzrost liczby ludności i produkcji *per capita*.

Zanalizowane powyżej przypadki tworzą dwa możliwe kierunki ewolucji gospodarki. Punkt 1) pokazuje samopodtrzymujący się wzrost (przy założeniu, że ludzie wykazują naturalną skłonność do wynalazczości odzwierciedloną w parametrach $\omega > 0$ i $\varphi \geq 1$). Punkty 2) i 3) przedstawiały gospodarkę w stagnacji. Nasuwa się oczywisty wniosek, że sam postęp techniczny nie jest wystarczającym bodźcem do wyjścia z pułapki Malthusa. Muszą być spełnione jeszcze inne warunki, które przekształcą postęp techniczny w trwały wzrost gospodarczy (mierzony tempem wzrostu produkcji *per capita*).

Aby doszło do rozkwitu gospodarczego – przypadek 1) – wymagane tempo postępu technicznego do jego stabilizacji musi być wyższe od tempa postępu technicznego wymaganego do stabilizacji produkcji *per capita*. Wówczas gospodarka zmierza do obszaru, w którym interakcja dynamiki ludności i postępu technicznego podtrzymuje wzrost produkcji *per capita*. Te trzy przypadki miały jedną wspólną cechę. Dla dowolnej elastyczności produkcji względem pracy z przedziału $0 < \alpha < 1$ (działa prawo malejących przychodów z pracy), jeśli współczynnik mutowania

wynalazków spełnia warunek $\varphi > \frac{1-\alpha}{\alpha}$, to gospodarka ewoluuje ku samopod-

trzymującemu się wzrostowi produkcji *per capita*. Ta ewolucja jest wynikiem splotu technicznych warunków funkcji produkcji (parametr α) oraz względnej dynamiki wynalazków w procesie *learning by doing* (parametr φ , którego wysokość zależy od samej pomysłowości ludzi i ich skłonności do praktycznych eksperymentów oraz czynników instytucjonalnych generujących różnorodne nagrody dla wytwórców). Ciekawe jest to, że nie jest ważna skala oryginalnych wynalazków. Wystarczy, żeby $\omega > 0$, czyli żeby nawet w minimalnej liczbie, ale by w ogóle jakieś oryginalne wynalazki powstawały. Natomiast kluczową rolę odgrywa kombinacji parametrów α i φ .

Rozpatrzmy skrajny przypadek $\varphi = 1$. Czyli oryginalne wynalazki nie mutują.

Aby był spełniony warunek $\varphi > \frac{1-\alpha}{\alpha}$, elastyczność produkcji względem pracy

musi spełniać $\alpha > 1/2$. Wówczas zachodzi również $\varphi > \frac{1}{2\alpha}$, czyli mamy przypadek

rosnących przychodów z *learning by doing*. Zgodnie ze wzorem (6.10) wartość $\varphi = 1$, dla danego ω , α , A i L , zmniejsza dynamikę postępu technicznego. Mimo tego zmniejszenia gospodarka, startując z dowolnego poziomu dynamiki ludności i postępu technicznego, wchodzi na ścieżkę samopodtrzymującego się wzrostu produkcji *per capita*. Jest to możliwe dzięki względnie wysokiej elastyczności produkcji względem pracy ($\alpha > 1/2$). Ta wysoka wrażliwość produkcji na pracę częściowo kompensuje brak mutacji i przeciwdziała silnemu spadkowi dynamiki postępu technicznego. Co prawda, postęp techniczny traci na dynamice z powodu braku mutacji, jednak zyskuje, przy danym poziomie ω , na wzroście strumienia oryginalnych wynalazków. Im wyższe α , tym bardziej wrażliwe jest tempo postępu technicznego na dynamikę ludności (por. wzór (6.12)). Równocześnie wyższe α zmniejsza negatywny efekt malejących przyrostów wynalazków z nowych wynalazków (por. również wzór (6.12)). Dzięki temu wymagane tempo wzrostu postępu technicznego dla danej dynamiki ludności utrzymuje się na poziomie poniżej wymaganego dla stabilizacji dynamiki postępu technicznego. To z kolei sprawia, że tempo postępu technicznego nie stabilizuje się, ale zbliża się do poziomu wyzna-

czanego przez asymptotę funkcji $\dot{g}_A = 0$ (asymptota jest opisana wzorem $g_A = \frac{\alpha}{1-\alpha}b$).

Ważne są zatem warunki środowiskowe, jak np. naturalna urodzajność gleby, klimat, dostępność i możliwość udomowienia zwierząt pociągowych, naturalna odporność roślin uprawnych na choroby i pasożyty, wpływ pasożytów na kondycję ludzi itp. Warunki środowiskowe muszą sprzyjać wysokiemu α (tak było na nowych obszarach zdobytych w czasie wielkich odkryć geograficznych na przełomie XV i XVI wieku – sprzyjające warunki do uprawy zbóż i eksploatacji lasów w Ameryce Północnej, pozyskanie Ameryki Środkowej i Południowej na uprawy cukru, tytoniu, bawełny i ryżu). Gdy $\varphi > 1$, to dodatkowo zwiększa się dynamika wzrostu gospodarczego (asymptotycznie zbliżamy się do wyższego tempa

$g_A = \frac{\alpha\varphi}{1-\alpha\varphi}b$). Nie jest to jednak warunek konieczny wejścia na ścieżkę rozkwitu.

Wystarczy, aby były spełnione warunki: $\omega > 0$ oraz $\alpha > 1/2$ i gospodarka wkroczy na ścieżkę trwałego wzrostu poziomu życia.

Wejście na ścieżkę rozkwitu jest również możliwe w mniej sprzyjających warunkach środowiskowych dla $\alpha \leq 1/2$ (odpowiada to przypadkom 2) i 3)). Jednak wówczas gospodarka musi się charakteryzować dynamizmem innowacyjnym

przejawiającym się w $\varphi > \frac{1-\alpha}{\alpha}$. Jeśli współczynnik mutowania wynalazków spełnia

warunek $\varphi > \frac{1-\alpha}{\alpha}$, to również musi być spełniona nierówność $\varphi > \frac{1}{2\alpha}$, czyli rów-

nież w tym przypadku mamy rosnące przychody z *learning by doing*. Wówczas wymagane tempo postępu technicznego do jego stabilizacji przewyższa tempo niezbędne do stabilizacji produkcji *per capita*. Inaczej mówiąc, zjawisko mutowania oryginalnych wynalazków musi być na tyle rozpowszechnione, aby możliwe było przewyższenie słabych uwarunkowań technicznych produkcji (polegających na słabym oddziaływaniu pracy na produkcję). W tym przypadku istotną rolę ogrywają czynniki pobudzające dynamizm innowacyjny. Szeroko rozumiany system zachęt do usprawniania oryginalnych wynalazków. Interesujące jest to, że kluczową rolę pełni dynamizm innowacyjny w postaci wtórnej fali wynalazków, czyli przetwarzania oryginalnych pomysłów (np. koło wodne do mielenia ziarna i wykorzystywane w tartakach, kuźniach i do napędzania maszyn folujących). W długim okresie nie odgrywa roli skala strumienia oryginalnych wynalazków opisywana przez parametr $\omega > 0$. Linia stabilizacji dynamiki postępu technicznego ($\dot{g}_A = 0$), do której zmierza dynamika postępu technicznego, nie zależy od parametru ω . Jest wyznaczana przez parametry α i φ . Dlatego też zmiana wolumenu pierwotnych wynalazków może mieć tylko przejściowy wpływ na dynamikę produkcji *per capita*. Jeśli wynalazki nie mutują, to postęp techniczny przekształca się tylko we wzrost liczby ludności, a nie wzrost poziomu życia. Trudno jednoznacznie odpowiedzieć, jakie dokładnie zmiany sprzyjają rozwojowi wtórnych wynalazków, jednak nie ulega wątpliwości, że korzystne dla tego procesu było: ustanowienie prawa własności, stabilizacja polityczna i prawa patentowe. Znany jest jednak przypadek Europy, która, niezależnie od uwarunkowań instytucjonalnych, charakteryzuje się trwałą tendencją do generowania postępu technicznego. Zawsze istnieli ludzie skłonni do tworzenia nowych i udoskonalonych wynalazków⁹³.

Podsumowując, niezależnie od rozmiarów elastyczności produktu względem pracy warunkiem koniecznym wyjścia ze stagnacji jest pojawienie się rosnących

przychodów z *learning by doing* ($\varphi > \frac{1}{2\alpha}$). Natomiast warunkiem wystarczającym

jest, aby współczynnik rozpraszania wynalazków kształtował się na odpowiednim

poziomie względem α : $\varphi > \frac{1-\alpha}{\alpha}$. Wówczas dynamika postępu technicznego jest

⁹³ Szerzej na ten temat w: E. Jones, *The European miracle: environments, economies, and geopolitics in the history of Europe and Asia*, Cambridge University Press, Cambridge–New York 1981.

na wystarczającym poziomie, aby na trwałe zapewnić wzrost produkcji kompensujący z nadwyżką malejącą krańcową produktywność pracy powodowaną rosnącą liczbą ludności. Jeśli gospodarka wychodzi z pułapki maltuzjańskiej, to *learning by doing* zawsze charakteryzuje się rosnącymi przychodami z pracy i postępu technicznego.

Dwa ostatnie przypadki – 2) i 3) – opisują gospodarkę w stagnacji. Wymagane tempo postępu technicznego dla jego stabilizacji musi być równe lub niższe od tempa postępu technicznego wymaganego dla stabilizacji produkcji per capita. Warunkiem wystarczającym zaistnienia takich relacji pomiędzy tymi tempami

jest $\varphi \leq \frac{1-\alpha}{\alpha}$. Ponieważ $\varphi \geq 1$, to ten warunek na współczynnik mutowania wy-

lasków nie zachodzi dla dowolnej elastyczności produkcji względem pracy. Gdyby produkcja charakteryzowała się relatywnie wysoką elastycznością względem pracy

– $1/2 < \alpha < 1$ – to $\frac{1-\alpha}{\alpha} < 1$ i wówczas warunek $\varphi \leq \frac{1-\alpha}{\alpha}$ nie byłby spełniony.

Elastyczność produkcji względem pracy musi zawierać się w przedziale $0 < \alpha \leq 1/2$, aby wystarczający warunek na φ był spełniony i gospodarka znajdzie się w stagnacji przeciętnego poziomu życia. Zauważmy, że jeśli *learning by doing* charakteryzuje się malejącymi lub stałymi przychodami z pracy i postępu technicznego, czyli

zachodzi $\varphi \leq \frac{1}{2\alpha}$, to zawsze spełniony jest warunek na gospodarczą stagnację

($\varphi \leq \frac{1-\alpha}{\alpha}$). Zatem jeśli *learning by doing* charakteryzuje się malejącymi lub stałym

przychodami ze skali, to zawsze gospodarki znajdują się w stagnacji przeciętnego poziomu życia.

Pomimo iż przypadki 2) i 3) opisują gospodarkę w stagnacji, jednak występują między nimi zasadnicze różnice. W przypadku 2) dynamika postępu technicznego, z powodu relatywnie małego φ i α , jest na tyle niska, że nie jest w stanie kompensować negatywnego wpływu na krańcową produktywność pracy rosnącej liczby ludzi dla każdego $g_L > 0$. Dlatego też linia wymaganego tempa postępu technicznego stabilizującego to tempo leży poniżej tempa postępu stabilizującego produkcję per capita. Ostatecznie dynamika postępu technicznego jest niewystarczająca, aby podtrzymać osiągnięty poziom produkcji per capita. Będzie on zatem spadał wraz ze spadającą asymptotycznie do zera dynamiką ludności i postępu technicznego. Zarówno dynamika ludności, jak i dynamika postępu technicznego nigdy nie osiągną

zera. Kształtują się w pobliżu zera. To powoduje, że mimo stagnacji w poziomie życia śladowa dynamika postępu technicznego zapewnia stały, choć równocześnie bardzo mały, wzrost ludności. Tak jak w przypadku 1) gospodarka nie zmierza do żadnego stanu ustalonego. Typowym stanem jest brak zrównoważonego wzrostu chociaż gospodarka wykazuje asymptotyczną długookresową stabilność przy niskim poziomie produkcji *per capita* w pobliżu poziomu trwałej egzystencji (\bar{y}).

Przypadek 3) był jedynym, w którym gospodarka zmierzała do stanu ustalonego dla produkcji *per capita*, dynamiki postępu technicznego oraz dynamiki ludności. Inaczej mówiąc, był to jedyny przypadek, gdy równocześnie były spełnione wszystkie trzy warunki: $\dot{y} = 0$, $\dot{g}_A = 0$, $\dot{g}_L = 0$. W takiej sytuacji mówimy więc o stagnacji w tym sensie, że poziom życia stabilizuje się po osiągnięciu stanu ustalonego (brak wzrostu gospodarczego w stanie ustalonym). W przeciwieństwie do poprzedniego przypadku stagnacji, w którym standard życia znajdował się na najniższym możliwym poziomie, w tym przypadku poziom produkcji *per capita* może ustalić się na dowolnym poziomie powyżej trwałej egzystencji. Możemy mieć nieskończoną liczbę stanów ustalonych w zależności od wyjściowych poziomów ludności, techniki i parametru ω . Dochodzenie do nich może się charakteryzować dodatnią lub ujemną stopą wzrostu produkcji *per capita*. Przypadek ten wymaga, aby parametry

α i φ były równe konkretnym wartościom określonym wzorem: $\varphi = \frac{1-\alpha}{\alpha}$ dla

$0 < \alpha \leq 1/2$. Jeśli nastąpią ich niewielkie, wręcz minimalne wahnięcia, gospodarka będzie zmierzała albo ku rozkwitowi, albo ku stagnacji przy niskim poziomie

produkcji *per capita*. Ponownie zauważmy, że jeśli $\varphi = \frac{1-\alpha}{\alpha}$, to równocześnie

zachodzi $\frac{1}{2\alpha} < \varphi = \frac{1-\alpha}{\alpha}$. Czyli tej szczególnej formie stagnacji mogą towarzyszyć

rosnące przychody z *learning by doing*, jednak o zbyt niskich efektach we wzroście produkcji, aby niwelować niekorzystne działanie dynamiki ludności.

Z powyższych rozważań wynikają istotne ustalenia. Każda gospodarka wychodząca ze stagnacji charakteryzowała się rosnącymi przychodami z *learning by doing*. Ale nie każda gospodarka o rosnących przychodach z *learning by doing* jest w stanie opuścić maltuzjańską pułapkę. I wreszcie każda gospodarka ze stałymi lub malejącymi przychodami z *learning by doing* jest w stagnacji. Zatem koniecznym, chociaż niewystarczającym, warunkiem wyjścia ze stagnacji jest pojawienie się rosnących przychodów z *learning by doing*. Mogą się one pojawić na dwa sposoby. Po pierwsze, gdy współczynnik rozpraszanie wynalazków jest niski ($\varphi \approx 1$),

to wysoka wrażliwość produktu na pracę $\alpha > 1/2$ jest wystarczającym warunkiem powstania rosnących przychodów z *learning by doing* i równocześnie wystarczającym warunkiem wyjścia ze stagnacji $\left(\varphi > \frac{1-\alpha}{\alpha}\right)$. Po drugie, gdy wrażliwość

produktu na pracę jest w miarę niska ($\alpha > 1/2$), to wówczas kluczowego znaczenia nabiera parametr φ , czyli warunki mutowania oryginalnych wynalazków. Gospodarka musi cechować się silnym dynamizmem innowacji technicznych. Jeśli

dynamizm ten charakteryzuje się $\varphi > \frac{1}{2\alpha}$, to pojawią się rosnące przychody z *learning by doing*. Nie wystarcza to jednak dla wyjścia ze stagnacji. Dynamizm innowacyjny musi być jednak jeszcze wyższy, aby został spełniony warunek $\varphi > \frac{1-\alpha}{\alpha}$.

Wówczas rosnące przychody z *learning by doing* zapewnią gospodarce transformację ku wzrostowi gospodarczemu.

Powstaje kluczowe pytanie: czy wyjście ze stagnacji było nieuchronnym procesem na drodze społecznej ewolucji człowieka, podobnie jak stało się to z rolnictwem? Inaczej mówiąc, czy elastyczność produktu względem pracy i współczynnik rozpraszania wynalazków kształtują się całkowicie egzogenicznie i wtedy przypadek rozstrzyga o wyjściu ze stagnacji, czy też parametry te mają swoje własne czasowe ścieżki ewolucji. Jeśli mają takie ścieżki, to czy przebiegają one niezależnie od siebie, czy też są w jakiś sposób współzależne?

Niestety materiał historyczny nie dostarcza takich odpowiedzi. Ekonomiści badający ilościowe zależności dla bardzo długich okresów dosyć arbitralnie przyjmują kształtowanie się α na przestrzeni tysięcy lat. Na przykład C.I. Jones, w ślad za M. Kremerem, przyjmuje $\alpha = 2/3$ na stałym poziomie aż od 25 000 lat temu do XX wieku naszej ery⁹⁴. Można mimo wszystko zaryzykować podanie pewnych kierunków myślenia o ścieżkach α i φ .

W gospodarce myśliwsko-zbierackiej kluczowym czynnikiem wytwórczym był ekosystem, którego zasobność w składniki pokarmowe bezpośrednio określała produkcję *per capita*. Udział pracy w tworzeniu produktu był zapewne niewielki. Pojawienie się rolnictwa musiało to istotnie zmienić. Po raz pierwszy w dziejach

Niestety materiał historyczny nie dostarcza takich odpowiedzi. Ekonomiści badający ilościowe zależności dla bardzo długich okresów dosyć arbitralnie przyjmują kształtowanie się α na przestrzeni tysięcy lat. Na przykład C.I. Jones, w ślad za M. Kremerem, przyjmuje $\alpha = 2/3$ na stałym poziomie aż od 25 000 lat temu do XX wieku naszej ery⁹⁴. Można mimo wszystko zaryzykować podanie pewnych kierunków myślenia o ścieżkach α i φ .

W gospodarce myśliwsko-zbierackiej kluczowym czynnikiem wytwórczym był ekosystem, którego zasobność w składniki pokarmowe bezpośrednio określała produkcję *per capita*. Udział pracy w tworzeniu produktu był zapewne niewielki. Pojawienie się rolnictwa musiało to istotnie zmienić. Po raz pierwszy w dziejach

⁹⁴ C.I. Jones, *Was an Industrial Revolution Inevitable? Economic Growth Over the Very Long Run*, „Advances in Macroeconomics” 2001, vol. 1, no. 2; M. Kremer, *Population Growth and Technological Change. One Million B.C. to 1990*, „Quarterly Journal of Economics” 1993, vol. 108, no. 3.

ludzkości za pomocą pracy kontrolowano cały proces pozyskiwania pożywienia. Dzięki postępowi technicznemu człowiek był w stanie stworzyć sztuczne środowisko, w którym produkował żywność. Przyroda nie zawsze była „sprzymierzeńcem” w sprawowaniu kontroli nad tym sztucznym środowiskiem. Bardzo często proces wytwórczy był zakłócany na przykład przez nadmierne opady atmosferyczne lub ich brak, przedłużające się okresy upałów lub chłódów, gwałtowny wzrost populacji szkodników i chwastów. Siły przyrody należało więc zdominować i ujarzmić, aby służyły produkcji rolnej. Do tego niezbędna była praca, za pomocą której przekształcano, na ile to było możliwe, naturalne środowisko w sztuczne twory służące produkcji rolnej. Bez wątplenia udział pracy w tworzeniu produktu wzrósł. Produkt stał się bardziej wrażliwy na zmianę wykorzystywanych zasobów pracy. Praca zaczynała odgrywać kluczową rolę w kontroli procesu wytwarzania produktów. Proces wytwórczy stawał się coraz bardziej złożony, obejmował coraz więcej operacji kontrolowanych i programowanych przez człowieka. Na przykład w uprawie roli przejście z techniki kopieniaczej, stosowanej we wczesnym neolicie, na orkę sprzężającą rozszerzyło udział pracy w proces wytwórczy. Uprawa kopieniacza wymagała zastosowania do spulchniania gleby prostych ręcznych narzędzi (np. łopat) do odwracania wierzchniej warstwy gleby. Natomiast orka sprzężająca do spulchniania gleby za pomocą bardziej skomplikowanych narzędzi, jak radło, socha i pług, wykorzystywała siłę pociągową, początkowo ludzi, później zwierząt (np. wołów, koni). Nie wystarczyło wejść na pole z łopata i rozpocząć uprawę ziemi. Ktoś musiał zająć się hodowlą i selekcją zwierząt pociągowych, skonstruować, wytworzyć i konserwować narzędzia rolnicze. Podobnie wynalezienie sztucznych systemów nawadniania, wprowadzając nową fazę wytwórczości, rozszerzyło zastosowanie pracy w produkcji. Zwiększała się liczba kierunków zastosowania pracy w produkcji. Można zatem przyjąć, że w miarę wpływu czasu współczynnik α rósł. W pewnym zakresie był wrażliwy na zmiany techniczne rozszerzające skalę zastosowania pracy w produkcji. Można zatem przyjąć, że α jest rosnącą funkcją rozwoju techniki:

$$\alpha = \alpha(A), \quad \alpha' > 0, \quad \alpha'' < 0, \quad \alpha(1) \rightarrow 0, \quad \alpha(+\infty) \rightarrow 1. \quad (6.21)$$

Mimo iż w epoce rolnictwa człowiek nauczył się kontrolować procesy wegetacji roślin i zwierząt, to jednak jeden z kluczowych obszarów jego funkcjonowania nadal był silnie uwarunkowany przyrodniczo. Chodzi o dynamikę ludności. Nadal stopa przyrostu naturalnego zależała od ilości żywności *per capita*. Gdy żywności brakowało, stopa przyrostu naturalnego spadała, co prowadziło do spadku liczby ludności. Gdy żywności było relatywnie więcej, ludności przybywało. Nadal troską

ludzi było zadbanie o biologiczne przetrwanie – własne i swojego potomstwa. Z tego powodu reguły funkcjonowania społeczeństw w tym okresie historycznym bywają porównywane do darwinowskiego mechanizmu ewolucji gatunków w przyrodzie⁹⁵. Przetrwać mogły tylko jednostki najlepiej przystosowane do środowiska i dzięki temu mające największe szanse na wyżywienie siebie i swojego potomstwa. Miała więc miejsce swoista selekcja naturalna.

Każdy podmiot działał w warunkach ograniczonego zasobu, jakim był dostępny czas pracy. Przyjmijmy, że każdy dysponował czasem pracy pozwalającym na wytwarzanie powyżej niezbędnego minimum egzystencji. Wówczas nadwyżkę mógł lokować w powiększanie produkcji ponad minimum egzystencji lub w eksperymenty z nowymi technikami. Celem tych eksperymentów było przekształcanie nowych oryginalnych wynalazków (o nich informuje parametr ω) w nowe formy, użyteczne w odmiennych od oryginalnych zastosowaniach. Suma efektów osiągniętych z tych eksperymentów określała poziom parametru φ , czyli rozproszenie zmutowanych wynalazków. Jedna i druga alokacja czasu pracy miała ostatecznie na celu zwiększenie szans przetrwania dzięki powiększeniu ilości dostępnej żywności. Alokacja czasu w zwiększenie produkcji bezpośrednio zwiększała wytworzoną produkcję *per capita*. Dzięki temu szanse przetrwania rodziny danego wytwórcy rosły, ponieważ jej członkowie byli po prostu lepiej odżywieni. Wzrost ilości dostępnej żywności przede wszystkim zwiększał szanse na przeżycie dzieci w danej rodzinie. Natomiast zakończone sukcesem eksperymenty z nową techniką podnosiły produktywność danego podmiotu. Wobec tego w każdej godzinie alokowanej do wytwórczości rolnej uzyskiwano wyższą produkcję *per capita*. Rodziny stosujące tę strategię mogły osiągnąć zatem wyższą produkcję, niż rodziny ekstensywnie wydłużające godziny pracy bez zmiany techniki. Dzięki wyższej produkcji mogły mieć więcej dzieci, które dożywały wieku dojrzałego. Zasadniczo lepiej radzą sobie w konkurencji o przetrwanie, niż rodziny stosujące strategię ekstensywnego wydłużania godzin pracy.

Rodziny składające się na lokalną społeczność mogą stosować różnorodne kombinacje alokacji czasu pracy. Załóżmy, że mamy dwa typy rodzin. Pierwszy preferuje alokowanie czasu w wydłużenie godzin pracy ponad minimalny poziom egzystencji (liczba przepracowanych godzin będzie większa, niż liczba godzin, które członkowie rodzin musieliby przepracować, by zapewnić sobie minimalny poziom egzystencji). Drugi preferuje eksperymenty z nowymi technikami, czyli

⁹⁵ Zob. G. Clark, *A Farewell to Alms. A Brief Economic History of the World*, Princeton University Press, Princeton 2007; O. Galor, O. Moav, *Natural Selection and the Origin of Economic Growth*, „Quarterly Journal of Economics”, November 2002, vol. 117, no. 4.

zajmuje się udoskonalaniem oryginalnych wynalazków. Oznaczmy przez m udział podmiotów drugiego typu w całej populacji. Jeśli w danym okresie udział ten rośnie, co oznacza, że coraz więcej rodzin alokuje czas do eksperymentów z techniką, to rośnie współczynnik φ :

$$\varphi = \varphi(m), \quad \varphi' > 0, \quad \varphi'' < 0, \quad \varphi(0) = 1, \quad \varphi(1) = \max > 1. \quad (6.22)$$

Przy czym przyjmiemy, że im więcej rodzin zajmuje się udoskonalaniem oryginalnych wynalazków, tym więcej pojawi się takich samych lub bardzo podobnych udoskonaleń, co ostatecznie spowalnia wzrost współczynnika φ ($\varphi < 0$). Gdy podmioty w ogóle nie zajmują się udoskonalaniem oryginalnych wynalazków, to na pewno nie powodują ich zniszczenia ($\varphi(0) = 1$). Natomiast gdy wszyscy podejmują trud udoskonalania pierwotnych wynalazków, to współczynnik φ przyjmuje maksymalną wartość ($\varphi(1) = \max$).

Załóżmy również, w ślad za O. Galorem i O. Moavem⁹⁶, że preferencje są dziedziczne z pokolenia na pokolenie. Niech w punkcie wyjścia liczba podmiotów preferujących udoskonalanie oryginalnych wynalazków, co prowadzi do powstania ich mutacji, będzie niezwykle mała, $m \approx 0$. Ma to zatem prawie żaden wpływ na współczynnik rozpraszania wynalazków, można więc przyjąć, że wynosi on $\varphi = 1$. Jednak rodziny, które dokonały udoskonaleń, okazały się lepiej przystosowane do biologicznego przetrwania dzięki wyższemu poziomowi żywienia. Osiągają one wyższą stopę przyrostu naturalnego niż pozostałe rodziny. Rośnie więc udział rodzin preferujących przydzielanie czasu na udoskonalanie oryginalnych wynalazków, gdyż dzieci dziedziczą preferencje swoich rodziców. Równocześnie ze wzrostem m rośnie również współczynnik. Kolejna wymiana pokoleń ponownie powoduje wzrost m i φ .

Uzupełnienie modelu o równania (6.21) i (6.22) dość istotnie skomplikowało dynamikę gospodarki agrarnej. Nie da się jej już przedstawić za pomocą wcześniejszych portretów fazowych (rys. 6.7, 6.8, 6.9), gdyż α i φ stały się teraz zmiennymi endogenicznymi. Jednakże można się pokusić o intuicyjny opis prawdopodobnej dynamiki systemu gospodarczego.

W początkowej fazie rozwoju rolnictwa bez wątpienia, co jest truizmem, poziom techniki produkcji rolnej był niski, jak również znikomy był udział w lokalnych społecznościach eksperymentatorów zmieniających oryginalne wynalazki. Zatem

za typową sytuację można przyjąć $\varphi \leq \frac{1-\alpha}{\alpha}$, czyli lokalne społeczności rolnicze

⁹⁶ O. Galor, O. Moav, op.cit.

znajdowały się na ścieżkach prowadzących do stagnacji poziomów życia. Jednak, jak pamiętamy z rozdziału 4, społeczności lokalne wchodziły w gospodarkę rolną z produkcją *per capita* znacząco przekraczającą produkcję z okresu myśliwsko-zbierackiego. Czyli była to produkcja powyżej poziomu stabilnej egzystencji ($y > \bar{y}$). A więc dynamika postępu technicznego, mimo iż niska, była jednak dodatnia, czyli poziom techniki rolnej A rósł. Zatem ostatecznie powiększał się stopniowo udział pracy w wytwarzaniu zagregowanego produktu. Ponieważ dynamika postępu technicznego w społecznościach znajdujących się na ścieżce prowadzącej do stagnacji nigdy nie równała się zero, co najwyżej tylko asymptotycznie zbliżała się do wartości zerowej, to poziom techniki zwiększał się, chociaż mogło

się to dziać w powolnym tempie. Ostatecznie iloraz $\frac{1-\alpha}{\alpha}$ stopniowo, w miarę

upływu czasu, zmniejszał się. Równocześnie rósł udział eksperymentatorów udoskonalających oryginalne wynalazki, którzy odnosili sukces w rywalizacji o dostęp do żywności z pozostałymi członkami lokalnych społeczności. Powiększał się zatem współczynnik φ . Gospodarka znajdowała się na ścieżce ku ukształtowaniu

relacji $\varphi > \frac{1-\alpha}{\alpha}$, czyli na ścieżce prowadzącej do wzrostu gospodarczego i wzro-

stu przeciętnego poziomu życia. Ostateczna konkluzja jest taka, iż wcześniej czy później lokalne społeczności, jeśli nie pojawiły się zewnętrzne przeszkody w postaci naturalnych katastrof bądź wyniszczających wojen, były w stanie wydostać się z pułapki maltuzjańskiej.

Zakończenie

Prawie przez cały okres istnienia człowieka towarzyszyły mu dwa kluczowe zjawiska: stagnacja w przeciętnym poziomie życia oraz ekspansja ludności we wszystkie dające się zamieszkać regiony Ziemi. Zjawiska te występowały przy równoległe dokonującym się postępie technicznym. Miał on co prawda niezwykle powolne tempo aż do pojawienia się rolnictwa, tym nie mniej powstaje pytanie, jak pogodzić fakt istnienia stagnacji z jednoczesnym wzrostem postępu technicznego.

Analizę rozpoczęliśmy od założenia braku postępu technicznego. Okazało się, że ekspansję ludnościową w prostych gospodarkach łowiecko-zbierackich można wówczas wyjaśnić dążeniem do równowagi dwóch głównych elementów ją tworzących: ludności i ekosystemu. Dla danego zasobu ekosystemu gęstość zaludnienia w danym regionie jest określana przez ilość żywności odpowiadającą niezbędnemu poziomowi egzystencji y^* . Pozyskując żywność, lokalne społeczności równocześnie wpływały na równowagę ekosystemu rozumianą jako jego zdolność do samoodnowy. Biorąc pod uwagę wzajemne oddziaływanie dynamiki ludności i dynamiki ekosystemu, wyróżniliśmy społeczności stagnacyjne i społeczności ekspansywne. W przypadku społeczności stagnacyjnych występuje idealna równowaga pomiędzy dynamiką ludności a dynamiką ekosystemu. Zasoby danego regionu w zupełności wystarczały, by wyżywić lokalną społeczność, której liczebność kształtowała się na stałym poziomie. Natomiast w przypadku społeczności ekspansywnych osiągnięcie stabilnej równowagi ludnościowej nie było możliwe, ponieważ stale naruszana była zdolność ekosystemu do samoodnowy. Rozwiązaniem tego problemu była migracja części ludności do sąsiednich, niezamieszkanymi regionów. Powstawaniu ekspansywnych społeczności sprzyjały lokalne ekosystemy charakteryzujące się łatwością pozyskania żywności. Dopóki warunki środowiskowe pozostawały niezmienione, dopóty lokalna społeczność zachowywała ekspansywne cechy. Wystarczyło, aby tylko jedna lokalna grupa społeczna żyła w środowisku sprzyjającym ekspansji, by proces zaludniania Ziemi mógł się rozpocząć poprzez sekwencyjnie powtarzane migracje nadwyżek mieszkańców. Hipoteza ta jest zgodna z najnowszymi wynikami badań genetycznych oraz licznymi odkryciami paleoantropologicznymi. Badania te wskazują, że, w daleko idącym uproszczeniu, cała współczesna ludzkość ma wspólnego praprzodka, który zamieszkiwał Afrykę nie później niż 200 tys. lat temu.

Dodatkowym efektem migracji ludności było zbliżenie standardu życia pomiędzy regionami do poziomu zapewniającego stabilną egzystencję (y^*), przy zróżnicowanej gęstości zaludnienia. Przy czym ekspansywne społeczności lokalne, dzięki cyklicznym migracjom, które krótkookresowo podnosiły krańcową produktywność pracy, miały przeciętny poziom spożycia żywności powyżej zapewniającego stabilną egzystencję (y^*).

Uwzględnienie postępu technicznego urealniło analizę zachowań społeczności lokalnych. Postęp techniczny został potraktowany jako efekt rozszerzania diety. Natomiast samo rozszerzanie diety było wymuszone przez rosnącą populację ludzi. Takie urozmaicenie diety wymagało stosowania nowych technik myśliwskich i zbierackich. Tworzenie nowych idei technicznych było głównie determinowane przez umiejętności gatunku ludzkiego do poznawania swojego środowiska i uczenia się od samego ekosystemu. Ludzie uczyli się dobierać jadalne produkty poprzez bezpośredni kontakt z ekosystemem. Podobnie działo się z doбором najskuteczniejszych technik łowieckich. Zapewne podczas samego polowania pojawiały się pomysły odnośnie jego udoskonalenia. Ludzie wykazywali naturalną zdolność do uczenia się na podstawie obserwacji efektów swoich działań w procesie przekształcania surowych składników ekosystemu w dobra pośrednie i następnie w finalne. Na każdym z tych etapów człowiek nabywał nowe umiejętności, które pozwalały mu zrozumieć ukryte możliwości ekosystemu. Było to swoiste *learning by doing*, czyli pozyskiwanie wiedzy w procesie codziennej penetracji ekosystemu w poszukiwaniu pożywienia. Ukryta wiedza, do której ludzie musieli dotrzeć i ją przyswoić, była zakumulowana przez ekosystem danego regionu w liczbie potencjalnych zastosowań jego składników (\bar{A}). Gdyby go poznali w całości, czyli odkryliby wszystkie możliwe praktyczne zastosowania ekosystemu, postęp techniczny i proces uczenia ustaliby dla warunków wyznaczonych przez łowiecko-zbieraczy tryb życia. Inaczej mówiąc, w epoce myśliwsko-zbierackiej granice postępu technicznego były wyznaczone przez samą naturę, w tym sensie, że zdobywanie nowej wiedzy, przekładanej na nowe idee techniczne, ograniczało się tylko do fazy rozpoznawania składników ekosystemu nadających się na pokarm, zbierania ich (bądź łowienia) i dostosowania do spożycia. *Learning by doing* miało wobec tego ograniczony zakres swojego działania, ograniczony tylko do tej jedynej fazy pozyskiwania żywności. Powstało zatem pytanie, czy taki ograniczony zakres postępu technicznego mógł nieuchronnie doprowadzić do powstania rolnictwa, które przecież obejmuje dodatkowo fazy kontroli wegetacji roślin i zwierząt oraz zbieranie plonów i pozyskiwanie produktów zwierzęcych. Odpowiedź brzmi: tak.

Po pierwsze, wiedza o produkcji rolnej była zewnętrznym efektem działalności myśliwsko-zbierackiej. Doświadczenie myśliwsko-zbierackie było przetwarzane

na praktyczne umiejętności polegające na kontrolowaniu wegetacji uprawianych roślin i etapów życia hodowlanych zwierząt. Jednakże nie dotyczyło to każdego lokalnego ekosystemu. Było to możliwe tylko tam, gdzie ekosystem zawierał składniki nadające się do udomowienia, a więc, jak wynika z badań, w siedmiu regionach świata (w rejonie Żyźnego Półksiężycza na Bliskim Wschodzie, w dolinach rzek Jangcy i Żółtej Rzeki – obecne południowo-wschodnie Chiny, w południowo-wschodniej części Ameryki Północnej, w Ameryce Środkowej – centralnych regionach obecnego Meksyku, w Ameryce Południowej – w rejonie dzisiejszego Peru, na obszarze Afryki Subsaharyjskiej i na Nowej Gwinei). Po drugie, musiały zaistnieć jakiś impuls, który sprawił, iż krańcowa produktywność rolnictwa trwale przewyższała krańcową produktywność myślistwa-zbieractwa. Wówczas opłacalne było alokowanie pracy do działalności rolniczej. Tym czynnikiem były duże zmiany klimatyczne, które nazywaliśmy wstrząsami klimatycznymi.

Chodzi przede wszystkim o intensywność zmian klimatycznych, jakie miały miejsce szczególnie w środkowym i górnym paleolicie. Niestabilny klimat, wytrącając lokalne społeczności z równowagi, „popychał” postęp techniczny w myślistwie i zbieractwie. Lokalne społeczności intensywnie eksploatowały ekosystemy, w tym również te, które zawierały składniki nadające się do udomowienia. W ten sposób składniki zostały włączone do poszerzanej ciągle diety. Ostatecznie sprzyjało to rozwojowi wiedzy o technikach rolnych.

Impulsem do wprowadzenia sektora rolnego były dwa kluczowe zjawiska klimatyczne, które doprowadziły do spadku produktywności myślistwa-zbieractwa poniżej produktywności rolnictwa. Pierwsze to gwałtowne oziębienie klimatu w młodszym dryasie, które spowodowało migracje ludności (na Bliskim Wschodzie w regionie zwanym Żyźnym Półksiężycem i najprawdopodobniej również w Chinach), co doprowadziło do spadku krańcowej produktywności myślistwa-zbieractwa poniżej krańcowej produktywności rolnictwa. Drugie to pojawienie się, po okresie młodszego dryasu, interglacjału – cieplej i dodatkowo stabilnej fazy klimatu, która przypada na holocen. To spowodowało, że pierwsze lokalne społeczności, które rozwinęły rolnictwo, pozostały przy tym sposobie pozyskiwania żywności. W pozostałych regionach, w których ekosystem zawierał składniki do udomowienia, ciepły i wilgotny klimat sprzyjał utrzymywaniu się dodatniego przyrostu naturalnego pobudzającego postęp techniczny. Dzięki trwałej tendencji do utrzymywania dodatniego przyrostu naturalnego, niezależnie od krótkookresowego kształtowania się relacji poziomu postępu technicznego (mierzonego A) do zdolności do samoodnowy (mierzonej $\delta_{\max} A$), lokalne społeczności w ekosystemach ze składnikami nadającymi się do udomowienia nieuchronnie zmierzały ku rolnictwu. Było ono zatem nieuniknionym wynikiem procesu ewolucji człowieka, który posiadał biologiczną zdolność

do utrzymywania dodatniego przyrostu naturalnego i wprost niezwykłą mentalną umiejętność adaptacji swojego zachowania do zmiennego środowiska.

Pojawienie się rolnictwa radykalnie rozszerzyło możliwości pozyskiwania wiedzy poprzez praktyczne działanie (*learning by doing*) i tym samym stanowiło nowy impuls do rozwoju postępu technicznego. Pozyskiwanie wiedzy nie ograniczało się już tylko jedynie do rozpoznawanie potencjału żywnościowego ekosystemów, lecz obejmowało sadzenie roślin, hodowlę zwierząt, zbieranie plonów oraz pozyskiwanie produktów zwierzęcych, i wreszcie przekształcanie ich w dobra nadające się do bezpośredniego spożycia. To była kluczowa zmiana na drodze społecznego rozwoju człowieka. Nasze zdolności mentalne zostały wprężnięte do rozwiązywania całkowicie nowych kwestii, wynikających nie tyle z obserwowanych przez człowieka naturalnych przyrodniczych procesów, ile będących wynikiem świadomej działalności człowieka mającej na celu już nie pozyskanie żywności z przyrody, ale planowe jej wyprodukowanie. Człowiek jako pierwszy z hominidów rozpoczął swoją wielką przygodę z aktywnym kreowaniem własnego środowiska życiowego.

Ta radykalna zmiana w przedmiocie postępu technicznego nie spowodowała jednak automatycznie wejścia na ścieżkę trwałego wzrostu poziomu produkcji *per capita*. Z badań wynika, że od rewolucji neolitycznej aż po XVIII wiek naszej ery ma miejsce stagnacja w przeciętnym poziomie życia, przy równocześnie dynamicznie rosnącej liczbie ludności. Postęp techniczny sam z siebie nie powodował wyjścia z pułapki maltuzjańskiej. Musiały być spełnione dodatkowe warunki określające jego dynamikę. Generalnie chodzi o to, aby dynamika postępu technicznego przekraczała poziom, przy którym stabilizuje się produkcja *per capita*. Było to możliwe, gdy gospodarka charakteryzowała się relatywnie wysokim udziałem pracy w produkcji. Wychodzenie z pułapki stagnacji odbywało się szybciej, gdy dodatkowo w społeczności lokalnej znajdowały się podmioty zajmujące się udoskonalaniem pierwotnych wynalazków, w wyniku czego powstawały ich mutacje.

Udział pracy w produkcji oraz udział podmiotów doskonalących wynalazki miał swoje własne ścieżki czasowe. Udział pracy zmieniał się wraz z rozwojem techniki rolnej, a udział podmiotów doskonalących wynalazki zmieniał się w wyniku selekcji naturalnej regulującej dostęp do zasobów żywności. Gdy gospodarki po wprowadzeniu rolnictwa znajdowały się w pułapce stagnacji, to dynamika tych zmiennych, wcześniej czy później, wyprowadzała je z tej niekorzystnej społecznie stagnacji poziomu życia. Wówczas pojawiała się trwała dodatnia dynamika wzrostu produkcji *per capita*.

Kluczowym wynikiem naszej analizy jest stwierdzenie, że zarówno pojawienie się rolnictwa, jak również wyjście z pułapki maltuzjańskiej było nieuchronne na drodze społecznej ewolucji człowieka. Tylko garstka ludzi pozostała do dnia dzisiejszego

na etapie niezwykle prostych sposobów pozyskiwania żywności – poprzez łowiectwo i zbieractwo, ogrodnictwo czy też pasterstwo. Używając języka ekonomii, powiedzielibyśmy, że przebywają oni w stanie długookresowej równowagi. Zdecydowana większość lokalnych społeczności była w ciągłej nierównowadze i była zmuszana do rozwiązywania wynikających z tego problemów. Zazwyczaj końcowym efektem poszukiwania rozwiązań było pojawianie się kolejnej innowacji technicznej.

Bibliografia

- Ambrose S.H., *Chronology of the Later Stone Age and Food Production in East Africa*, „Journal of Archaeological Science” 1998, vol. 25.
- Ambrose S.H., *Did the super-eruption of Toba cause a human population bottleneck? Reply to Gathorne-Hardy and Harcourt-Smith*, „Journal of Human Evolution” 2003, vol. 45.
- Ambrose S.H., *Late Pleistocene human population bottlenecks, volcanic winter, and differentiation of modern humans*, „Journal of Human Evolution”, June 1998, vol. 34, no. 6.
- Baker M.J., *An Equilibrium Conflict Model of Land Tenure In Hunter-Gatherer Societies*, „Journal of Political Economy” 2005, vol. 111, no. 1.
- Bar-Yosef O., *Climatic Fluctuations and Early Farming in West and East Asia*, „Current Anthropology”, October 2011, vol. 52, supp. 4.
- Bar-Yosef O., *The Upper Paleolithic Revolution*, „Annual Review of Anthropology” 2002, vol. 31.
- Bellwood P., *First farmers. The origins of agricultural societies*, Blackwell, Oxford 2005.
- Boone J.L., *Subsistence Strategies and Early Human Population History. An Evolutionary Ecological Perspective*, „World Archaeology” 2002, vol. 34, no. 1.
- Bouzouggar A. et al., *82,000-year-old shell beads from North Africa and implications for the origins of modern human behavior*, „Proceedings of the National Academy of Sciences”, 2007, vol. 104, no. 24, <http://www.pnas.org/content/104/24/9964>, 10.08.2013.
- Burroughs W.J., *Climate Change in Prehistory. The End of the Reign of Chaos*, Cambridge University Press, Cambridge–New York 2005.
- Clark G., *A Farewell to Alms. A Brief Economic History of the World*, Princeton University Press, Princeton 2007.
- Diamond J., *Evolution, consequences and future of plant and animal domestication*, „Nature” 8.08.2002, vol. 418.
- Diamond J., *Strzelby, zarazki, maszyny. Losy ludzkich społeczeństw*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000.
- Diamond J., *The Worst Mistake in the History of the Human Race*, „Discover Magazine”, May 1987.
- Dow G.K., Reed C.G., *Stagnation and innovation before agriculture*, „Journal of Economic Behavior & Organization” 2011, vol. 77, no. 3.
- Dow G.K., Reed C.G., Olewiler N., *Climate reversals and the transition to agriculture*, „Journal of Economic Growth” 2009, vol. 14, no. 1.

- Flannery K.V., *Origins and ecological effects of early domestication in Iran and Near East*, w: *The Domestication and Exploitation of Plants and Animals*, red. P.J. Ucko, G.H. Dimbleby, Aldine Transaction, New Jersey 2009.
- Galor O., *From Stagnation to Growth. Unified Growth Theory*, w: *Handbook of Economic Growth*, red. P. Aghion, S. Durlauf, North Holland, Amsterdam 2005.
- Galor O., *Unified growth theory*, Princeton University Press, Princeton 2011.
- Galor O., Moav O., *Natural Selection and the Origin of Economic Growth*, „Quarterly Journal of Economics”, November 2002, vol. 117, no. 4.
- Galor O., Weil D., *From Malthusian Stagnation to Modern Growth*, „American Economic Review” 1999, vol. 89, no. 2.
- Galor O., Weil D., *Population, Technology, and Growth. From Malthusian Stagnation to Demographic Transition and Beyond*, „American Economic Review” 2000, vol. 90, no. 4.
- Goodfriend M., McDermott J., *Early Development*, „American Economic Review” 1995, vol. 85, no. 1.
- Guzmán R.A., *Life-Work Balance During The Neolithic Revolution*, „Revista Abante” 2007, vol. 10, no. 2.
- Guzmán R.A., Weisdorf J., *The Neolithic Revolution from a Price-Theoretic Perspective*, Department of Economics, University of Copenhagen, „Discussion Papers” 2010, no. 10–13.
- Hayden B., *Population Control among Hunter-Gatherers*, „World Archaeology” 1972, vol. 4, no. 2.
- Headrick D.R., *Technology. A World History*, Oxford University Press, New York 2009.
- Henshilwood C.S., Marean C.W., *The Origin of Modern Human Behavior*, „Current Anthropology”, December 2003, vol. 44, no. 5.
- Hetherington R., Reid R.G.B., *The Climate Connection. Climate Change and Modern Human Evolution*, Cambridge University Press, New York 2010.
- Johnson A., Earle T., *The evolution of human societies. From foraging group to agrarian state*, Stanford University Press, Stanford (California) 2000.
- Jones C.I., *Was an Industrial Revolution Inevitable? Economic Growth Over the Very Long Run*, „Advances in Macroeconomics” 2001, vol. 1, no. 2.
- Jones E., *The European miracle: environments, economies, and geopolitics in the history of Europe and Asia*, Cambridge University Press, Cambridge–New York 1981.
- Kessler P., *Prehistoric World. Hominid Chronology*, 26.07.2005, www.historyfiles.co.uk/FeaturesAfrica/HominidChronology7.htm, 22.07.2013.
- Kremer M., *Population Growth and Technological Change. One Million B.C. to 1990*, „Quarterly Journal of Economics” 1993, vol. 108, no. 3.

- Lagerlöf N.-P., *From Malthus to Modern Growth. Can Epidemics Explain the Three Regimes?*, „International Economic Review”, May 2003, vol. 44, no. 2.
- Lagerlöf N.-P., *The Galor-Weil Model Revisited. A Quantitative Exercise*, „Review of Economic Dynamics”, January 2006, vol. 9, no. 1.
- Livi-Bacci M., *A Concise History of World Population*, Blackwell Publishing, Oxford 2007.
- McBrearty S., Brooks A.S., *The revolution that wasn't: a new interpretation of the origin of modern human behavior*, „Journal of Human Evolution” 2000, vol. 39.
- Maddison A., *Contours of the World Economy 1–2030 AD. Essays in Macro-Economic History*, Oxford University Press, Oxford–New York 2007.
- Maddison A., *The World Economy. Historical Statistics*, OECD, Paris 2003.
- Maddison A., *The World Economy. A Millennial Perspective*, OECD, Paris 2001.
- Malthus T., *An essay on the principle of population*, London 1798.
- Marceau N., Myers G.M., *From Foraging to Agriculture*, Center for Research on Economic Fluctuations and Employment, Université du Québec à Montréal, „Working Paper”, February 2000, no. 103.
- Mellars P., *Why did modern human populations disperse from Africa ca. 60,000 years ago? A new model*, „Proceedings of the National Academy of Sciences” 2006, vol. 103, no. 25.
- Morris I., *Why the West rules – for Now. The Patterns of History, and What They Reveal About the Future*, eBook edition, 2010.
- The Neolithic Demographic Transition and its Consequences*, red. J.-P. Bocquet-Appel, O. Bar-Yosef, Springer, New York 2008.
- Olsson O., *The Rise of Neolithic Agriculture*, Department of Economics, Göteborg University, „Working Paper in Economics”, September 2001, no. 57.
- Olsson O., Hibbs D.A. Jr, *Biogeography and long-run economic development*, „European Economic Review” 2005, vol. 49, no. 4.
- Olsson O., Hibbs D.A., *Geography, Biogeography, and Why Some Countries Are Rich and Others Are Poor*, „Proceedings of the National Academy of Sciences” 2004, vol. 101, no. 10, www.pnas.org/content/101/10/3715.full.pdf+html, 10.08.2013.
- Pryor F.L., *Economic Systems of Foraging, Agricultural, and Industrial Societies*, Cambridge University Press, New York 2005.
- Pryor F.L., *From Foraging to Farming. The So-Called „Neolithic Revolution”*, 22.01.2003, http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=395040, 22.07.2013.
- Richerson P.J., Boyd R., Bettinger R.L., *Was Agriculture Impossible during the Pleistocene but Mandatory during the Holocene? A Climate Change Hypothesis*, „American Antiquity” 2001, vol. 66, no. 3.
- Robson A.J., *A Bioeconomic View of the Neolithic Transition to Agriculture*, „Canadian Journal of Economics” 2010, vol. 43, no. 1.

- Smith B.D., *The emergence of agriculture*, Scientific American Library, New York 1998.
- Smith V.L., *The Primitive Hunter Culture, Pleistocene Extinction, and the Rise of Agriculture*, „Journal of Political Economy”, August 1975, vol. 83.
- Stiner M.C. et al., *Paleolithic Population Growth Pulses Evidenced by Small Animal Exploitation*, „Science” 1999, vol. 283, no. 5399.
- Stiner M.C., *Thirty years on the „Broad Spectrum Revolution” and Paleolithic Demography*, „Proceeding of the National Academy of Science” 2001, vol. 98, no. 13.
- Strulik H., Weisdorf J., *Population, food, and knowledge: a simple unified growth theory*, „Journal of Economic Growth”, September 2008, vol. 13, no. 3.
- Tattersall I., *Dzieje człowieka od jego początków do IV tysiąclecia p.n.e.*, PIW, Warszawa 2010.
- Uriarte A., *Earth's Climate History*, Kindle Edition, 2011.
- Weisdorf J., *From Foraging To Farming. Explaining The Neolithic Revolution*, „Journal of Economic Surveys” 2005, vol. 19, no. 4.
- Weisdorf J., *From Stagnation to Growth. Revisiting Three Historical Regimes*, „Journal of Population Economics” 2004, vol. 17, no. 3.
- Wong K., *Kiedy człowiek nauczył się myśleć*, „Świat Nauki” 2006, nr 1.
- Wood J.W., *A Theory of Preindustrial Population Dynamics. Demography, Economy, and Well-Being in Malthusian Systems*, „Current Anthropology”, February 1998, vol. 39, no. 1.

Aneks do rozdziału 3*

Zbadamy formalnie, jak zachowuje się lokalna społeczność ze względu na dynamikę gęstości zaludnienia i postępu technicznego.

Wychodząc od równań (3.9) i (3.14), a także korzystając z założeń $z \equiv 0$, $\lambda(u) = u^2$, $a(y) = y^{-\varepsilon}$, $\varepsilon > 0$, dochodzimy do układu równań różniczkowych postaci:

$$\begin{cases} \begin{cases} \dot{A} = (b - A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)})^2 \bar{A} A \\ \dot{l} = (b - A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)}) l \end{cases} & \text{dla } A < \bar{A} \\ \begin{cases} \dot{A} = 0 \\ \dot{l} = (b - A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)}) l \end{cases} & \text{dla } A \geq \bar{A} \end{cases} \quad (1)$$

$$A(0) = A_0 \in (0, \bar{A}), l(0) = l_0 \in (0, \infty)$$

gdzie: $\bar{A} > 0$, $b > 0$, $\varepsilon > 0$, $0 < \alpha < 1$, to ustalone stałe.

Ponadto w dowodach będziemy rozważali uproszczony układ:

$$\begin{cases} \begin{cases} \dot{A} = (b - A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)})^2 \bar{A} A \\ \dot{l} = (b - A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)}) l \end{cases} \\ A(0) = A_0 \in (0, \bar{A}), l(0) = l_0 \in (0, \infty) \end{cases} \quad (2)$$

Pomijając przypadek $A = 0$, $l = 0$, w układzie równań (2) $\dot{A} = 0$ i $\dot{l} = 0 \Leftrightarrow b = A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)}$. Dostajemy więc zbiór takich par (A, l) , dla których stabilizuje się poziom technologii i gęstości zaludnienia. Pary te tworzą na płaszczyźnie krzywą (oznaczymy ją ϕ), której równanie w postaci rozwikłanej ze względu na l ma postać:

$$l = \left(b A^{\varepsilon} \bar{A}^{-\varepsilon(1-\alpha)} \right)^{\frac{1}{\varepsilon(1-\alpha)}} = c A^{\frac{1}{1-\alpha}}, \quad (3)$$

gdzie: $c = b^{\frac{1}{\varepsilon(1-\alpha)}} \bar{A}^{-1} = \text{const.}$

Formalnie krzywą ϕ można opisać: $\phi = \left\{ (A, l) \in (0, \infty)^2 : l = c A^{\frac{1}{1-\alpha}} \right\}$.

* Aneks został sporządzony przy współpracy z Piotrem Dworcakiem.

W celu zbadania właściwości rozwiązania układu (2) warto rozpatrzyć równanie różniczkowe opisujące zachowanie się stopy przyrostu naturalnego $u = b - A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)} = b - F(A, l)$. Różniczkując u po czasie otrzymujemy (pomijamy argumenty funkcji dla przejrzystości zapisu):

$$\dot{u} = \varepsilon F \frac{\dot{A}}{A} - \varepsilon(1-\alpha) F \frac{\dot{l}}{l} = \varepsilon F \left[\frac{\dot{A}}{A} - (1-\alpha) \frac{\dot{l}}{l} \right]. \quad (4)$$

Podstawiając stopy przyrostu A i l z układu (2), otrzymujemy:

$$\dot{u} = \varepsilon F [u^2 \bar{A} - (1-\alpha)u] = -\varepsilon F u [-u\bar{A} + (1-\alpha)]. \quad (5)$$

Pomijając przypadek $l = 0$, zmienna u stabilizuje się w dwóch punktach: $u = 0$ oraz $u = \frac{1-\alpha}{A}$. Pierwszy punkt odpowiada krzywej ϕ na płaszczyźnie (A, l) . Drugi punkt odpowiada krzywej wyznaczonej przez równanie:

$$u = b - A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)} = \frac{1-\alpha}{A}, \quad (6)$$

po przekształceniu:

$$b - \frac{1-\alpha}{A} = A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)}. \quad (7)$$

Niech:

$$b^* = b - \frac{1-\alpha}{A}. \quad (8)$$

Zakładamy, że b, \bar{A}, α są takie, że $b^* > 0$. Wówczas rozwiązania powyższego równania tworzą krzywą o równaniu:

$$l = b^* \frac{1}{\varepsilon(1-\alpha)} A^{\frac{1}{1-\alpha}} \bar{A}^{-1} = c^* A^{\frac{1}{1-\alpha}}, \quad (9)$$

gdzie: $c^* = b^* \frac{1}{\varepsilon(1-\alpha)} \bar{A}^{-1} < c$.

Niech $\psi = \left\{ (A, l) \in (0, \infty)^2 : l = c^* A^{\frac{1}{1-\alpha}} \right\}$. Ponieważ $c^* < c$, to krzywa ψ leży pod

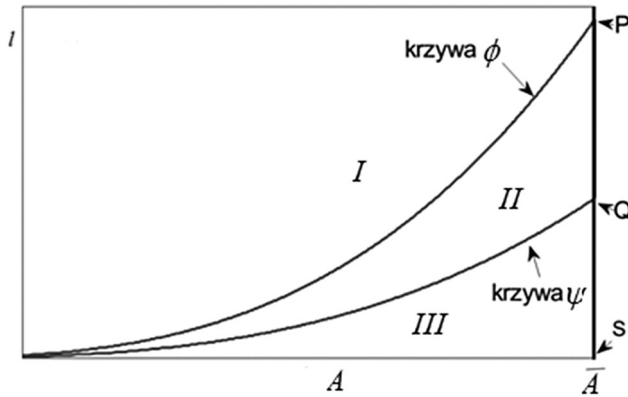
krzywą ϕ . Rysunek 1 przedstawia krzywe ψ i ϕ oraz obszary I, II i III , które są charakteryzowane jako:

$$I = \{(A, l) \in (0, \bar{A}) \times (0, \infty) : l > cA^{\frac{1}{1-\alpha}}\}$$

$$II = \{(A, l) \in (0, \bar{A}) \times (0, \infty) : c^*A^{\frac{1}{1-\alpha}} > l > cA^{\frac{1}{1-\alpha}}\}$$

$$III = \{(A, l) \in (0, \bar{A}) \times (0, \infty) : l < c^*A^{\frac{1}{1-\alpha}}\}$$

Ponadto oznaczmy punkty: $P = (\bar{A}, c\bar{A}^{\frac{1}{1-\alpha}})$, $Q = (\bar{A}, c^*\bar{A}^{\frac{1}{1-\alpha}})$, $S = (\bar{A}, 0)$.



Rysunek 1. Obszary położenia (A, l)

Sformułujmy pierwsze pomocnicze stwierdzenie mówiące o zachowaniu się układu (2).

Definicja. Niech ϕ będzie krzywą zawartą w $(0, \infty)^2$. Mówimy, że rozwiązanie (A, l) układu (2) zbiega do krzywej ϕ , jeżeli istnieje punkt $(A_1, l_1) \in \phi$, taki, że $\lim_{t \rightarrow \infty} (A, l) = (A_1, l_1)$.

Stwierdzenie 1. Niech (A, l) spełnia układ (2). Oznaczmy $F_0 = F(A_0, l_0)$, $u_0 = b - F_0$.

Niech $\phi = \left\{ (A, l) \in (0, \infty)^2 : l = cA^{\frac{1}{1-\alpha}} \right\}$ oraz $\psi = \left\{ (A, l) \in (0, \infty)^2 : l = c^*A^{\frac{1}{1-\alpha}} \right\}$.

Wówczas:

1. Jeżeli $(A_0, l_0) \in I$ lub $(A_0, l_0) \in II$, to (A, l) zbiega do krzywej ϕ . Ponadto, jeżeli $A_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t)$, gdzie $A(t)$ jest rozwiązaniem dla A , to prawdziwe jest oszacowanie:

$$l_0^{1-\alpha} \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha-\bar{A}u_0} \right)^{\frac{1-\alpha}{\varepsilon b \bar{A}}} \bar{A}^{1-\alpha} b^{\frac{1}{\varepsilon}} \leq A_1 \leq l_0^{1-\alpha} \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha-\bar{A}u_0} \right)^{\frac{1-\alpha}{\varepsilon F_0 \bar{A}}} \bar{A}^{1-\alpha} b^{\frac{1}{\varepsilon}}. \quad (10)$$

2. Jeżeli $(A_0 l_0) \in \phi$, to $\forall t (A, l) = (A_0 l_0)$.
3. Jeżeli $(A_0 l_0) \in \psi$, to istnieje $t_1 < \infty$ takie, że $(A, l)|_{t=t_1} = Q$.
4. Jeżeli $(A_0 l_0) \in III$, to istnieje $t_2 < \infty$ i punkt $(A_3 l_3)$ należący do odcinka \overline{SQ} taki, że $(A, l)|_{t=t_2} = (A_3 l_3)$.

W dowodzie posłużymy się dwoma lematami oraz twierdzeniem Picarda–Lindelöfa i twierdzeniem o ciągłej zależności rozwiązań od warunku początkowego, które przytaczamy bez dowodu.

Twierdzenie Picarda–Lindelöfa. Niech funkcja $f(t, y): \mathbb{R} \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ będzie ciągła na

$$Q = \{(t, y) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^m : |t - t_0| \leq a, y - y_0 \leq b\},$$

przy czym $M = \sup \{\|f(t, y)\| : (t, y) \in Q\}$
 oraz $\exists L > 0 \forall t, y_1, y_2 \|f(t, y_1) - f(t, y_2)\| \leq L \|y_1 - y_2\|$ (warunek Lipschitza).
 Wtedy równanie $\dot{y} = f(t, y)$, $y(t_0) = y_0$ ma dokładnie jedno rozwiązanie na prze-

dziale $|t - t_0| < \alpha$, gdzie $\alpha < \min\left(a, \frac{b}{M}\right)$.

Twierdzenie o ciągłej zależności rozwiązania od warunku początkowego.
 Jeżeli funkcja ciągła $f(t, x)$ jest określona na $G \subseteq \mathbb{R} \times \mathbb{R}^m$ zawierającym (t_0, x_0) i spełnia warunek Lipschitza względem zmiennej x na G , $\phi(\bar{x}, t)$ jest rozwiązaniem równania $\dot{x} = f(t, x)$ z warunkiem początkowym $x(t_0) = \bar{x}$ dla \bar{x} z pewnego otoczenia x_0 , to ϕ jest ciągła względem \bar{x} .

Lemat 1. Jeżeli $\dot{x} = f(t, x)$, $\dot{y} = g(t, y)$, funkcje f i g są ciągłe, rozwiązanie obu równań istnieje na (a, b) , $x(t_0) = z_0 = y(t_0)$ dla pewnego $t_0 \in (a, b)$ oraz $\forall t \forall x f(t, x) > g(t, x)$, to $\forall t \in [t_0, b) x(t) \geq y(t)$. Ponadto $\forall t \in (t_0, b) x(t) > y(t)$.

Dowód. Niech $t_1 = \sup\{t \in (a, b) : \forall s \in [t_0, t] x(s) \geq y(s)\}$, gdzie x i y są dowolnymi rozwiązaniami równań $\dot{x} = f(t, x)$, $\dot{y} = g(t, y)$, odpowiednio, z zadanym warunkiem początkowym $x(t_0) = z_0 = y(t_0)$. Załóżmy, że $t_1 < b$. Wówczas

$x(t_1) = y(t_1) = z_1$ dla pewnego z_1 oraz istnieje ciąg $t_n \rightarrow t_1^+$ taki, że $x(t_n) < y(t_n)$. Z twierdzenia Lagrange'a o wartości średniej istnieją ciągi c_n i d_n takie, że:

$$\frac{x(t_n) - x(t_1)}{t_n - t_1} = x'(c_n) = f(c_n, x(c_n)),$$

$$\frac{y(t_n) - y(t_1)}{t_n - t_1} = y'(d_n) = g(d_n, y(d_n)).$$

Ponieważ $x(t_n) < y(t_n)$ oraz $x(t_1) = y(t_1)$, to $\forall n g(d_n, y(d_n)) > f(c_n, x(c_n))$.

$c_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} t_1$, $d_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} t_1$. W granicy otrzymujemy więc $g(t_1, y(t_1)) > f(t_1, x(t_1))$, czyli $g(t_1, z_1) \geq f(t_1, z_1)$. Sprzeczność z założeniem $\forall t \forall x f(t, x) > g(t, x)$. Zatem $t_1 = b$.

Dla dowodu drugiej części lematu założymy, że istnieje $t_2 \in (t_0, b)$ takie, że $x(t_2) = y(t_2) = z_2$. Weźmy ciąg $\tilde{t}_n \rightarrow \tilde{t}_2$. Z już udowodnionej części wyniku, że $x(\tilde{t}_n) \geq y(\tilde{t}_n)$, a wobec tego mamy:

$$\frac{x(\tilde{t}_n) - x(t_2)}{\tilde{t}_n - t_2} \leq \frac{y(\tilde{t}_n) - y(t_2)}{\tilde{t}_n - t_2}.$$

Korzystając z twierdzenia Lagrange'a o wartości średniej i przechodząc do granicy, otrzymujemy $f(t_2, z_2) \leq g(t_2, z_2)$, sprzeczność z założeniem lematu. ■

Lemat 2. Jeżeli $\dot{x} = f(t, x)$, $\dot{y} = g(t, y)$, funkcje f i g są ciągłe i spełniają warunek Lipschitza ze względu na drugą zmienną, $x(t_0) = z_0 = y(t_0)$ dla pewnego $t_0 \in (a, b)$ oraz $\forall t > t_0 \forall x > z_0 f(t, x) > g(t, x)$, to $\forall t \in [t_0, b) x(t) \geq y(t)$. Ponadto $\forall t \in (t_0, b) x(t) > y(t)$.

Dowód. Istnienie rozwiązań układów $\dot{x} = f(t, x)$, $\dot{y} = g(t, y)$ dla dowolnych warunków początkowych wynika z twierdzenia Picarda-Lindelöfa. Niech $\phi(x_0, t)$ oznacza rozwiązanie $\dot{x} = f(t, x)$ z warunkiem początkowym $x(t_0) = x_0$ a $\psi(y_0, t)$ to rozwiązanie $\dot{y} = g(t, y)$ z warunkiem początkowym $y(t_0) = y_0$. Rozważmy dowolny ciąg $z_n \rightarrow z_1^+$ taki, że $\forall n z_n \neq z_0$. Z twierdzenia o ciągłej zależności rozwiązania od warunków początkowych wynika, że $\lim_{z_n \rightarrow z_0} \phi(z_n, t) = \phi(z_0, t)$

oraz $\lim_{z_n \rightarrow z_0} \psi(z_n, t) = \psi(z_0, t)$. Z lematu 1 wynika, że $\forall n \phi(z_n, t) \geq \psi(z_n, t)$. Prze-

chodząc do granicy, otrzymujemy $\phi(z_0, t) \geq \psi(z_0, t)$, czyli $\forall t \in [t_0, b) x(t) \geq y(t)$. Drugą część lematu dowodzimy tak samo jak w lemacie 1. ■

Dowód Stwierdzenia 1. Na mocy twierdzenia Picarda–Lindelöfa, rozwiązanie układu (2) istnieje i jest jednoznaczne na każdym domkniętym dwuwymiarowym przedziale zawartym w $(0, \infty)^2$. Wynika to z faktu, że funkcja:

$$f(t, A, l) \stackrel{\text{def}}{=} \left((b - A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)})^2 \bar{A} A, (b - A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)}) l \right)$$

jest różniczkowalna w sposób ciągły, a więc lokalnie spełnia warunek Lipschitza (i jako funkcja ciągła przyjmuje kresy na zbiorze zwartym).

Ad 2. Jeżeli $(A_0 l_0) \in \phi$, to $\dot{A} = 0$ i $\dot{l} = 0$. Stąd $\forall t (A, l) = (A_0 l_0)$.

Ad 3. W tym przypadku $u_0 = \frac{1-\alpha}{A}$ i z równania (5) wynika, że u nie zmienia się

w czasie ($\dot{u} = 0$). Stąd $\forall t (A, l) \in \psi$. Ponadto na krzywej ψ mamy $\dot{A} = u_0^2 \bar{A} A \geq u_0^2 \bar{A} A_0 > c_0 > 0$ dla pewnej stałej c_0 . Z lematu 1 wynika, że $A(t) \geq A_0 e^{c_0 t}$, czyli istnieje takie t_1 , że $A(t_1) = \bar{A}$ (z założenia $A_0 < \bar{A}$). Tym samym $(A, l)|_{t=t_1} = Q$.

Ad 4. W tej sytuacji $u_0 > \frac{1-\alpha}{A}$. Wówczas z równania (5) wynika, że $\dot{u} > 0$ i u stale

rośnie. Stąd rozwiązanie (A, l) nie może zbiegać do żadnego punktu na krzywej ψ ani jej przecinać (w przeciwnym wypadku, ponieważ na krzywej ψ $u = \frac{1-\alpha}{A}$,

istniałoby takie t_3 , że $u(t_3) < u_0$, a wtedy z twierdzenia Lagrange'a o wartości średniej wynikałoby, że dla pewnego $t_4 \in (0, t_3)$ $\dot{u} < 0$, co jest niemożliwe). Argument analogiczny jak w punkcie 4 przekonuje nas, że A rośnie nieograniczenie, a ponieważ l również rośnie i $l_0 > 0$, to istnieją t_2 i punkt (A_3, l_3) takie, że $(A, l)|_{t=t_2} = (A_3, l_3) \in \overline{SQ}$.

Ad 1. Załóżmy, że $(A_0 l_0) \in II$. Wówczas $u_0 < \frac{1-\alpha}{A}$, zatem $\dot{u} < 0$. Ponieważ

$u = b - F(A, l)$, to wnioskujemy, że $F(A, l) < b$ oraz wartość F rośnie w czasie. Mamy zatem (dla $u > 0$) $F(A, l) < b$ oraz $F(A, l) \geq F_0$, przy czym $F(A, l) > F_0$ dla $u < u_0$. Rozważmy dwa równania różniczkowe:

$$\dot{u} = -\varepsilon F_0 u [-u\bar{A} + (1 - \alpha)], \quad (11)$$

$$\dot{u} = -\varepsilon b u [-u\bar{A} + (1 - \alpha)]. \quad (12)$$

Dla $u \in (0, u_0)$ zachodzi:

$$\begin{aligned} -\varepsilon b u [-u\bar{A} + (1 - \alpha)] &< -\varepsilon F(A, l) u [-u\bar{A} + (1 - \alpha)] < \\ &< -\varepsilon F_0 u [-u\bar{A} + (1 - \alpha)]. \end{aligned} \quad (13)$$

Z lematu 2 wynika, że rozwiązanie równania (5) z warunkiem początkowym $u(0) = u_0$ leży pomiędzy rozwiązaniami równań (11) i (12) z tym samym warunkiem początkowym.

Rozwiążmy równanie $\dot{u} = -\varepsilon F u [-u\bar{A} + (1 - \alpha)]$, gdzie $F = \text{const}$.

Dokonajmy podstawienia $v = \frac{1}{u}$. Wówczas mamy $\dot{v} = \frac{-\dot{u}}{u^2} = -v^2 \dot{u}$, czyli $\dot{u} = -\frac{\dot{v}}{v^2}$.

Stąd w nowych zmiennych równanie ma postać:

$$-\frac{\dot{v}}{v^2} = \varepsilon F \bar{A} \frac{1}{v^2} - \varepsilon F (1 - \alpha) \frac{1}{v}. \quad (14)$$

Po pomnożeniu przez $-v^2$ stronami dostajemy równanie liniowe:

$$\dot{v} = -\varepsilon F \bar{A} + \varepsilon F (1 - \alpha) v, \quad (15)$$

którego rozwiązanie ma postać:

$$v(t) = c_0 e^{\varepsilon F (1 - \alpha) t} + \frac{\bar{A}}{1 - \alpha}, \quad (16)$$

gdzie c_0 to dowolna stała dodatnia.

Wracając do oryginalnej zmiennej:

$$u(t) = \frac{1}{c_0 e^{\varepsilon F (1 - \alpha) t} + \frac{\bar{A}}{1 - \alpha}}. \quad (17)$$

Narzucając warunek $u(0) = u_0$, dostajemy ostatecznie:

$$u(t) = \frac{1}{\left(\frac{1}{u_0} - \frac{\bar{A}}{1-\alpha}\right) e^{\varepsilon F(1-\alpha)t} + \frac{\bar{A}}{1-\alpha}}. \quad (18)$$

Podstawiając do rozwiązania $F = F_0$ i $F = b$ oraz oznaczając przez $u(t)$ rozwiązanie równania (5), dostajemy dla $t > 0$:

$$\frac{1}{\left(\frac{1}{u_0} - \frac{\bar{A}}{1-\alpha}\right) e^{\varepsilon F_0(1-\alpha)t} + \frac{\bar{A}}{1-\alpha}} > u(t) > \frac{1}{\left(\frac{1}{u_0} - \frac{\bar{A}}{1-\alpha}\right) e^{\varepsilon b(1-\alpha)t} + \frac{\bar{A}}{1-\alpha}}. \quad (19)$$

W szczególności z nierówności (19) wynika, że $\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = 0$ oraz że $\forall t \ u \in (0, u_0)$.

Wykorzystamy oszacowanie rozwiązania dla $u(t)$, aby rozwiązać równanie:

$$\dot{l} = (b - F(A, l))l = ul. \quad (20)$$

Rozpatrzmy równania:

$$\dot{l} = \frac{1}{\left(\frac{1}{u_0} - \frac{\bar{A}}{1-\alpha}\right) e^{\varepsilon F_0(1-\alpha)t} + \frac{\bar{A}}{1-\alpha}} l, \quad (21)$$

$$\dot{l} = \frac{1}{\left(\frac{1}{u_0} - \frac{\bar{A}}{1-\alpha}\right) e^{\varepsilon b(1-\alpha)t} + \frac{\bar{A}}{1-\alpha}} l. \quad (22)$$

Z otrzymanej nierówności (19) wynika, że możemy ponownie zastosować lemat 2. Rozwiązanie równania $\dot{l} = ul$ leży pomiędzy rozwiązaniem równań (21) i (22). Oznaczmy dla wygody zapisu:

$$c_1 = \frac{1}{u_0} - \frac{\bar{A}}{1-\alpha}, \quad c_2 = \varepsilon F(1-\alpha), \quad c_3 = \frac{\bar{A}}{1-\alpha}, \quad \text{gdzie } F = \text{const.}$$

$$(F = F_0 \text{ lub } F = b).$$

Wówczas:

$$\dot{l} = \frac{1}{c_1 e^{c_2 t} + c_3} l. \quad (23)$$

Rozwiązanie ogólne:

$$l(t) = c_4 \exp\left(\frac{c_2 t - \ln(c_1 e^{c_2 t} + c_3)}{c_2 c_3}\right). \quad (24)$$

Biorąc warunek $l(0) = l_0$, dostajemy:

$$c_4 (c_1 + c_3)^{\frac{-1}{c_2 c_3}} = l_0. \quad (25)$$

Stąd:

$$c_4 = \left(\frac{1}{u_0}\right)^{\frac{1}{\varepsilon F \bar{A}}} l_0 \quad (26)$$

oraz:

$$l(t) = l_0 \left(\frac{1}{u_0}\right)^{\frac{1}{\varepsilon F \bar{A}}} \exp\left(\frac{c_2 t - \ln(c_1 e^{c_2 t} + c_3)}{c_2 c_3}\right) = \quad (27)$$

$$l_0 \left(\frac{1}{u_0}\right)^{\frac{1}{\varepsilon F \bar{A}}} \exp\left(\frac{1-\alpha}{\bar{A}} t\right) \left(\left(\frac{1}{u_0} - \frac{\bar{A}}{1-\alpha}\right) \exp(\varepsilon F(1-\alpha)t) + \frac{\bar{A}}{1-\alpha}\right)^{\frac{-1}{\varepsilon F \bar{A}}}.$$

Granica tego wyrażenia przy $t \rightarrow \infty$ jest równa:

$$l_0 \left(\frac{1}{u_0}\right)^{\frac{1}{\varepsilon F \bar{A}}} \left(\frac{1}{u_0} - \frac{\bar{A}}{1-\alpha}\right)^{\frac{-1}{\varepsilon F \bar{A}}} = l_0 \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha - \bar{A}u_0}\right)^{\frac{1}{\varepsilon F \bar{A}}}. \quad (28)$$

Podstawiając $F = F_0$ i $F = b$, wnioskujemy, że granica $l_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} l(t)$ rozwiązania równania (20) leży pomiędzy (granica istnieje, bo $l(t) > 0$ i $\dot{l}(t)$ jest ograniczone):

$$l_0 \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha - \bar{A}u_0}\right)^{\frac{1}{\varepsilon b \bar{A}}} \text{ i } l_0 \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha - \bar{A}u_0}\right)^{\frac{1}{\varepsilon F_0 \bar{A}}}. \quad (29)$$

Korzystając z tego, że $\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = 0$, wnioskujemy, że istnieje $A_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t)$ (z faktu

$\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = 0$ wynika, że graniczny punkt $(A_1, l_1) \in \phi$) i szacujemy jako:

$$l_0^{1-\alpha} \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha - \bar{A}u_0}\right)^{\frac{1-\alpha}{\varepsilon b \bar{A}}} \bar{A}^{1-\alpha} b^{-\frac{1}{\varepsilon}} \leq A_1 \leq l_0^{1-\alpha} \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha - \bar{A}u_0}\right)^{\frac{1-\alpha}{\varepsilon F_0 \bar{A}}} \bar{A}^{1-\alpha} b^{-\frac{1}{\varepsilon}}. \quad (30)$$

Teraz zajmijmy się przypadkiem $(A_0, l_0) \in I$. W tej sytuacji $u_0 < 0$ i $\dot{u} > 0$. Wobec tego $F(A, l) > b$ oraz wartość F maleje w czasie. Stąd (dopóki $u < 0$) mamy oszacowanie $F_0 > F(A, l) > b$ (z ostrą nierównością dla $(A, l) \neq (A_0, l_0)$). Można więc dokładnie powtórzyć całe powyższe rozumowanie. W szczególności otrzymujemy oszacowanie granicznych wartości rozwiązań: nierówność (30) oraz:

$$l_0 \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha-\bar{A}u_0} \right)^{\frac{1}{\varepsilon b \bar{A}}} \leq l_1 \leq l_0 \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha-\bar{A}u_0} \right)^{\frac{1}{\varepsilon F_0 \bar{A}}}. \quad (31)$$

To kończy dowód. ■

Teraz możemy przystąpić do analizy zachowania układu (1). Stwierdzenie 2 jest wnioskiem ze Stwierdzenia 1.

Stwierdzenie 2. Niech (A, l) spełnia układ (1). Wówczas:

1. Jeżeli $(A_0, l_0) \in I$ lub $(A_0, l_0) \in II$, to albo $(A, l) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} P$, albo (A, l) zbiega do krzywej ϕ .
2. Jeżeli $(A_0, l_0) \in \phi$, to $\forall t (A, l) = (A_0, l_0)$.
3. Jeżeli $(A_0, l_0) \in \psi$ lub $(A_0, l_0) \in III$, to $(A, l) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} P$.

Dowód. Teza wynika natychmiast ze Stwierdzenia 1, o ile wykazemy, że jeżeli

w pewnym momencie t_1 zajdzie $A(t_1) = \bar{A}$, to $(A, l) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} P$. Oczywiście jeżeli $A(t_1) = \bar{A}$,

to $\forall t > t_1 A(t) = \bar{A}$. Niech $P = (\bar{A}, \bar{l})$. Wystarczy wykazać, że $l(t) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} \bar{l}$. Jeżeli $l(t) > \bar{l}$, to $\dot{l} < 0$, a jeżeli $l(t) < \bar{l}$, to $\dot{l} > 0$. Dla ustalenia uwagi niech $l(t_1) > \bar{l}$. Jeżeli istnieje t_2 takie, że $l(t_2) = \bar{l}$, to $\forall t > t_2 l(t) = \bar{l}$. Stąd i z monotoniczności wynika, że istnieje granica $l_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} l(t)$. Załóżmy, że $l_1 > \bar{l}$. W otoczeniu $(l_1 + \varepsilon, l_1 - \varepsilon)$

zachodzi $\dot{l} < (b - \bar{A}^{-\varepsilon \alpha} (l_1 - \varepsilon)^{\varepsilon(1-\alpha)}) (l_1 - \varepsilon) = \text{const.} < 0$. Stąd $l(t)$ w skończonym czasie osiąga wartość mniejszą niż l_1 , sprzeczność z faktem, że l_1 jest granicą. ■

Pozostaje do rozstrzygnięcia kwestia warunków, które decydują o tym, która z rozłącznych alternatyw zachodzi w punkcie 1 Stwierdzenia 2. Mówi o tym Stwierdzenie 3.

Stwierdzenie 3. Niech (A, l) spełnia układ (1). Istnieje krzywa ciągła ϕ zawarta w obszarze II , taka, że jeżeli $(A_0, l_0) \in II$ i (A_0, l_0) leży nad krzywą ϕ , to (A, l)

zbiega do krzywej ϕ , a jeżeli (A_0, l_0) leży na lub pod krzywą φ , to $(A, l) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} P$. Ponadto krzywa φ leży pomiędzy krzywymi φ_{\min} i φ_{\max} zdefiniowanymi jako:

$$\varphi_{\min} = \left\{ (A, l) \in II : \frac{1-\alpha}{\varepsilon b \bar{A}} \ln f_1(A, l) = f_2(l) \right\}, \quad (32)$$

$$\varphi_{\max} = \left\{ (A, l) \in II : \frac{1-\alpha}{\varepsilon \left(A^{-\varepsilon} \bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)} l^{\varepsilon(1-\alpha)} \right) \bar{A}} \ln f_1(A, l) = f_2(l) \right\}, \quad (33)$$

gdzie:

$$f_1(A, l) = \frac{1-\alpha}{1-\alpha-\bar{A}(b-A^{-\varepsilon}\bar{A}^{\varepsilon(1-\alpha)}l^{\varepsilon(1-\alpha)})},$$

$$f_2(l) = \alpha \ln \bar{A} + \frac{1}{\varepsilon} \ln b - (1-\alpha) \ln l.$$

Dowód. Rozważmy rozwiązanie układu (2). Niech $A_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t)$ będzie graniczną wartością rozwiązania dla $(A_0, l_0) \in II$. Ze względu na monotoniczność A i l w czasie ($\dot{A} > 0, \dot{l} > 0$) wnioskujemy, że $\exists t_1 > 0(A, l)|_{t=t_1} \in \overline{PQ} \Leftrightarrow A_1 \geq \bar{A}$. Zatem rozwiązanie układu (1) dąży do punktu P wtedy i tylko wtedy, gdy $A_1 > \bar{A}$. Możemy teraz wykorzystać oszacowanie (30). Ponieważ:

$$A_1 \geq l_0^{1-\alpha} \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha-\bar{A}u_0} \right)^{\frac{1-\alpha}{\varepsilon b \bar{A}}} \bar{A}^{1-\alpha} b^{-\frac{1}{\varepsilon}}. \quad (34)$$

to jeżeli zachodzi nierówność:

$$l_0^{1-\alpha} \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha-\bar{A}u_0} \right)^{\frac{1-\alpha}{\varepsilon b \bar{A}}} \bar{A}^{1-\alpha} b^{-\frac{1}{\varepsilon}} \geq \bar{A}. \quad (35)$$

to rozwiązanie (A, l) z warunkiem początkowym (A_0, l_0) zbiega do punktu P . Nierówność można przekształcić do:

$$\frac{1-\alpha}{\varepsilon b \bar{A}} \ln \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha-\bar{A}u_0} \right) \geq \alpha \ln \bar{A} + \frac{1}{\varepsilon} \ln b - (1-\alpha) \ln l_0. \quad (36)$$

Podobnie z nierówności:

$$A_1 \leq l_0^{1-\alpha} \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha-\bar{A}u_0} \right)^{\frac{1-\alpha}{\varepsilon F_0 \bar{A}}} \bar{A}^{1-\alpha} b^{-\frac{1}{\varepsilon}} \quad (37)$$

wnioskujemy, że jeżeli:

$$l_0^{1-\alpha} \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha-\bar{A}u_0} \right)^{\frac{1-\alpha}{\varepsilon F_0 \bar{A}}} \bar{A}^{1-\alpha} b^{-\frac{1}{\varepsilon}} < \bar{A}, \quad (38)$$

to rozwiązanie (A, l) z warunkiem początkowym (A_0, l_0) zbiega do krzywej ϕ . Nierówność (38) można przekształcić do postaci:

$$\frac{1-\alpha}{\varepsilon F_0 \bar{A}} \ln \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha-\bar{A}u_0} \right) > \alpha \ln \bar{A} + \frac{1}{\varepsilon} \ln b - (1-\alpha) \ln l_0. \quad (39)$$

Stąd jeżeli krzywa ϕ istnieje, to leży pomiędzy krzywymi φ_{\min} i φ_{\max} , które otrzymujemy, przyjmując równość w nierównościach (36) i (39) oraz korzystając z definicji u_0 i F_0 . Łatwo pokazać (korzystając z własności Darboux funkcji ciągłej), że krzywe φ_{\min} i φ_{\max} są dobrze określone, w tym sensie, że dla każdego $A_0 \in (0, \bar{A})$

istnieje dokładnie jedno $l_0^{\min} \in \left(c^* A_0^{1-\alpha}, c A_0^{1-\alpha} \right)$ i $l_0^{\max} \in \left(c^* A_0^{1-\alpha}, c A_0^{1-\alpha} \right)$ takie, że

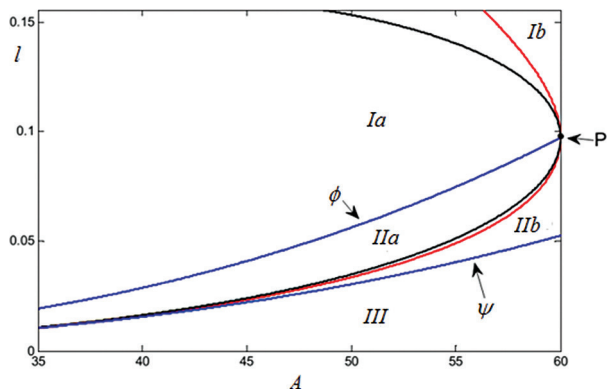
$(A_0, l_0^{\min}) \in \varphi_{\min}$ i $(A_0, l_0^{\max}) \in \varphi_{\max}$, przy czym $l_0^{\min} < l_0^{\max}$. Ustalmy $A_0 \in (0, \bar{A})$. Niech $A_1(l_0) = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t, l_0)$, gdzie $A(t, l_0)$ jest pierwszą współrzędną rozwiązania układu (2) z warunkiem początkowym (A_0, l_0) . Korzystając z twierdzenia o ciągłej zależności rozwiązania od warunku początkowego i faktu, że dla $l_0^{\min} < l_0^{\max}$ $A_1(l_0) > \bar{A}$, a dla

$l_0^{\min} > l_0^{\max}$ $A_1(l_0) < \bar{A}$, wnioskujemy, że zbiór $G(A_0) = \left\{ l_0 \in [l_0^{\min}, l_0^{\max}] : A_1(l_0) = \bar{A} \right\}$

jest niepusty i domknięty. Jest ponadto spójny. Załóżmy, że $l_1 \in G(A_0)$, $l_2 \in G(A_0)$ oraz weźmy dowolny $l_3 \in (l_1, l_2)$. Gdyby $A_1(l_3) \neq \bar{A}$, to musiałyby istnieć moment t_1 , w którym trajektoria rozwiązania z warunkiem początkowym (A_0, l_3) przecina trajektorię rozwiązania z warunkiem (A_0, l_1) lub trajektorię rozwiązania z warunkiem (A_0, l_2) . Wtedy jednak, na mocy jednoznaczności rozwiązania, trajektorie pokrywałyby się dla $t \geq t_1$, a więc w szczególności $A_1(l_3) = \bar{A}$. Uzyskana sprzeczność dowodzi, że $l_3 \in G(A_0)$. Dla każdego $A_0 \in (0, \bar{A})$ $G(A_0)$ jest zatem domkniętym odcinkiem (być może zdegenerowanym do punktu). Możemy teraz zdefiniować krzywą ϕ jako $\{(A, l) \in II : l = \max G(A)\}$. Ciągłość ϕ wynika z twierdzenia o ciągłej zależności rozwiązania od warunku początkowego. ■

Uwaga. Analogiczne rozumowanie do powyższego można przeprowadzić dla obszaru I .

Rysunek 2 przedstawia krzywe φ_{\min} (czerwona) i φ_{\max} (czarna) dla obszaru I i II, wyznaczone numerycznie dla konkretnych wartości liczbowych parametrów ($\bar{A} = 60$). Jeżeli punkt startowy znajduje się w obszarze Ia lub IIa, to rozwiązanie zbiega do krzywej ϕ , jeżeli zaś w Ib, IIb lub III, to do punktu P.



Rysunek 2. Krzywe φ_{\min} (czerwona) i φ_{\max} (czarna)

