

ROZDZIAŁ 5

Maciej Malaczewski*

POSTĘP TECHNICZNY, ZUŻYCIE ZASOBÓW NATURALNYCH A ENERGOCHŁONNOŚĆ AKUMULACJI KAPITAŁU I WZROST GOSPODARCZY

Wprowadzenie

Według informacji zgromadzonych przez *International Energy Agency* około 80% światowego popytu na energię zaspokajane jest ze źródeł nieodnawialnych zasobów naturalnych – ropy naftowej, węgla, gazu ziemnego¹. Nie bez znaczenia zatem pozostaje fakt stopniowego wyczerpywania się tych źródeł. Związane jest to oczywiście z jednej strony z rozwojem gospodarczym świata, z drugiej – z brakiem dostatecznie dobrych substytutów, które mogłyby służyć jako źródło energii. Istniejące rozwiązania, takie jak elektrownie wiatrowe, słoneczne i atomowe, nie są jeszcze w stanie dostarczyć wystarczających ilości energii dla całej światowej gospodarki, nie wspominając o znaczących kosztach akumulacji nowoczesnego kapitału. Co ciekawe, samo posiadanie na swoim terytorium złóż zasobów naturalnych niekoniecznie musi być błogosławieństwem – liczne badania empiryczne dowodzą, że kierunek i siła zależności pomiędzy wyposażeniem gospodarki w złoża zasobów naturalnych a poziomem rozwoju gospodarczego bądź stopą wzrostu gospodarczego nie są jednoznaczne, różne wyniki otrzymywane w pracach Sachs, Warner, Gylfason, Stijns wskazują na złożoność tego zagadnienia.²

* Dr, Uniwersytet Łódzki, Instytut Ekonometrii.

¹ IEA, za: A. Pérez-Barahona, *Economic growth and the use of non-renewable energy resources*, CORE, Ph. D. Thesis 2010.

² Por. J. Sachs, A. Warner, *Natural resource Abundance and Economic Growth*, NBER, "Working Paper", no. 5398, 1995; J. Sachs, A. Warner, *Sources of Slow Growth in African Economies*, "Journal of African Economies", vol. 6, no. 3, 1997; T. Gylfason, *Natural resources, education and economic development*, *European Economic Review*, vol. 45, 2001;

W świetle tych faktów powstaje naturalne pytanie o wpływ, jaki wyczerpywanie się zasobów naturalnych może mieć na długookresowy wzrost gospodarczy. Brak bowiem relatywnie tanich źródeł energii, jakimi są wspomniane już ropa i węgiel, zmusi ludzkość do poszukiwania źródeł alternatywnych. Póki co jednak nie jest możliwe wykorzystywanie ich w sposób równie efektywny, np. silniki samochodowe nie są jeszcze przystosowane do używania np. energii atomowej bądź nawet słonecznej.

Oczywiste wydaje się twierdzenie, iż postęp techniczny i akumulacja kapitału ludzkiego rozwiąże, przynajmniej częściowo, wskazane powyżej problemy. Stać się tak może poprzez umożliwienie substytucji pomiędzy nieodnawialnymi zasobami naturalnymi a zasobami odnawialnymi bądź odnawialnym kapitałem fizycznym. Wynalezienie i wdrożenie, np. silnika samochodowego napędzanego energią jądrową stanowić może dobry przykład takiej substytucji. Pojawiają się tutaj także i inne problemy, m.in. część badaczy podkreśla, iż nie ma wystarczającej koordynacji procesu badawczo-rozwojowego, by o takim rozwiązaniu w przyszłości mówić.

Celem pracy jest próba odpowiedzi na pytania o teoretyczne zależności pomiędzy długookresowym wzrostem gospodarczym, postępem technicznym a zużyciem zasobów naturalnych. Głównym przedmiotem przeprowadzonego badania jest wpływ, jaki akumulacja kapitału ludzkiego mieć może na zużywanie zasobów naturalnych i wzrost gospodarczy. Praca ma charakter teoretyczny. Założeniem jest odmiennosc energochłonności procesów akumulacji kapitału fizycznego od zwykłego procesu produkcji dóbr konsumpcyjnych i inwestycyjnych. Narzędziem jest skonstruowany model endogenicznego wzrostu gospodarczego, zawierający zasoby naturalne. Generowane przez niego rozwiązanie poddane jest analizie, która prowadzi do wniosków związanych z badanym zagadnieniem.

Niniejsza praca jest finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2012 jako projekt badawczy własny Nr N N112 553138.

1. Przegląd literatury

Problem wyczerpywania się zasobów naturalnych był szczególnie mocno eksponowany w latach siedemdziesiątych, tuż po słynnym Raporcie Klubu Rzymskiego „Granice Wzrostu”³, który wskazywał, przy utrzymaniu istniejących trendów ekonomicznych, w tym także trendu w popycie na energię, na rychłe zużycie złóż. Wyczerpanie się źródeł energii prowadziłoby, zdaniem autorów raportu, do dramatycznego zmniejszenia wielkości produkcji. Raport

J. P. C. Stijns, *Natural Resource Abundance and Human Capital Accumulation*, “World Development”, vol. 34, 2006.

³ D. H. Meadows et al., *Granice Wzrostu*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1973.

ten został dość mocno skrytykowany przez ekonomistów głównie ze względu na brak uwzględnienia dostosowań do nowej sytuacji, a zwłaszcza efektów postępu technicznego.

Liczne prace podkreślają, że problem wyczerpywalności złóż zasobów naturalnych, przy pewnych warunkach, może zostać rozwiązany przez postęp techniczny. I tak, na przykład, Dasgupta i Heal stwierdzają, że wobec zagrożenia zerową produkcją istotną staje się możliwość substytucji w procesie produkcyjnym pomiędzy zasobami naturalnymi a innymi, odnawialnymi czynnikami produkcji. Autorzy uzupełniają swoje rozważania poprzez spostrzeżenie, że zmniejszenie się podaży zasobów naturalnych przy niemalejącym popycie na nie spowoduje wzrost ich ceny. To z kolei przełoży się na wzrost kosztów produkcji poszczególnych dóbr, co zachęci producentów do poszukiwania tańszych substytutów dla droższych zasobów naturalnych. Twierdzą zatem, że możliwe jest przynajmniej częściowe zastąpienie nieodnawialnych zasobów naturalnych przez kapitał fizyczny w procesie produkcyjnym. Ich propozycja teoretyczna polega na uwzględnieniu takiej formy postępu technicznego, która pozwoli zmniejszyć wykorzystanie zasobów naturalnych w procesie produkcyjnym. Mowa tu głównie o wynalezieniu tańszego w produkcji odnawialnego substytutu. W sytuacji skrajnej, mało prawdopodobnej, ale jednak możliwej, postęp techniczny umożliwi zupełne wyeliminowanie zasobów naturalnych z procesu produkcyjnego.⁴

Stiglitz wskazuje, że rozwój technologii może na trzy różne sposoby pomóc ludzkości w problemie niedostatku zasobów naturalnych.⁵ Po pierwsze zwiększenie TFP pozwoli na utrzymanie tego samego poziomu produkcji przy obniżeniu wysokości tych nakładów. Po drugie, nowopowstała technologia umożliwić może substytucję czynników produkcji w większym stopniu niż obecnie. Po trzecie, użytkowanie kapitału ludzkiego jako kolejnego czynnika produkcji pozwala na wykorzystanie rosnących korzyści skali⁶.

Solow zauważa, że wyczerpujące się zasoby naturalne można zastąpić przez zwiększenie wielkości odnawialnego kapitału. Krytykuje także ideę nieograniczonego postępu technicznego. Sugeruje zatem, iż całkowite wyeliminowanie zasobów naturalnych z procesu produkcyjnego może nie być w ogóle możliwe.⁷ Kontynuując ten wątek, Dasgupta zauważa, iż produkcja wszystkich dóbr wymaga pewnych, choćby najdrobniejszych składników

⁴ P. Dasgupta, G. Heal, *The Optimal Depletion of Exhaustible Resources*, Review of Economic Studies, (Symposium volume), 1974, pp. 3–28.

⁵ J. Stiglitz, Growth with Exhaustible Resources: Efficient and Optimal Growth Paths, "Review of Economic Studies", (Symposium volume), 1974.

⁶ Dość ciekawy przykład uzasadniający ten przypadek zawarty jest w pracy P. Romer, *Endogenous technological change*, "Journal of Political Economy", vol. 98, no. 5, 1990.

⁷ R. Solow, *Intergenerational Equity and Exhaustible Resources*, "Review of Economic Studies", (Symposium volume), 1974, pp. 29–45.

pochodzących z natury, czy to w formie fizycznej, czy też energii do ich wyprodukowania. Uważa także, że podział pomiędzy zasobami odnawialnymi i nieodnawialnymi jest raczej ostry i wynika z drugiego prawa termodynamiki, które implikuje, że nigdy nie jest możliwe odzyskanie 100% materiału w procesie recyklingu. Dasgupta zauważa również, że popyt na zasoby naturalne wynika wyłącznie z zapotrzebowania na produkty, które są tworzone przy ich udziale. Autor wymienia 9 mechanizmów, które implikują substytucję pomiędzy czynnikami produkcji, każdy z tych mechanizmów (choć każdy w różnym stopniu) wymaga w implementacji nowej wiedzy lub innowacyjnego wykorzystania wiedzy istniejącej. Do działalności naukowo-badawczej potrzebna jest jednak zachęta w postaci np. wysokich kosztów wydobycia czystej postaci złoża.⁸

Grimaud, Rouge zauważają, że w literaturze postawione zostało paradoksalne pytanie – czy możliwy jest nieograniczony postęp techniczny, jeżeli do produkcji (w tym także do wytwarzania nowych technologii) używane są nieodnawialne zasoby naturalne.⁹ W serii prac zapoczątkowanej powyższą autorzy udowadniają, że rynek równoważy się w optimum społecznym przy zastosowaniu subsydiów dla działalności badawczo-rozwojowej związanej z wykorzystaniem zasobów odnawialnych oraz podatku nałożonego na zużycie zasobów nieodnawialnych. Stanowi to, jak nietrudno zauważyć, naturalną zachętę do prowadzenia odpowiednich badań, których wyniki mogą ułatwić wspomnianą wcześniej substytucję czynników produkcji.¹⁰

Powyżej omówione prace wskazują na konieczność uwzględnienia postępu technicznego generowanego endogenicznie w modelach wzrostu gospodarczego. We wspomnianych artykułach autorzy jednak nie dokonywali rozróżnienia pomiędzy energochłonnością procesu produkcyjnego i akumulacji kapitału. W serii prac Perez-Barahona¹¹, powołując się na pracę Azomahou et

⁸ P. Dasgupta, *Natural Resources in the age of substitutability*, [in:] *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, A. V. Kneese, J. L. Sweeney (eds.), ESP B.V., 1993.

⁹ A. Grimaud, L. Rouge, *Non-Renewable Resources and Growth with Vertical Innovations: Optimum, Equilibrium and Economic Policies*, "Journal of Environmental Economics and Management", 2003, pp. 433–453.

¹⁰ A. Grimaud, L. Rouge, *Polluting Non-Renewable Resources, Innovation and Growth: Welfare and Environmental Policy*, "Resource and Energy Economics", no. 27(2), 2005, pp. 109–129; A. Grimaud, L. Rouge, *Environment, Directed Technical Change and Economic Policy*, "Environmental and Resource Economics", no. 41, 2008, pp. 439–463.

¹¹ A. Pérez-Barahona, *The problem of exhaustible energy resources in the production of capital*, "CORE Discussion Papers", no. 2007/8, 2007; A. Pérez-Barahona, *Capital accumulation and exhaustible energy resources: a Special Functions case*, "CORE Discussion Papers", no. 2007/9, 2007; A. Pérez-Barahona, *Economic growth and the use of non-renewable energy resources*, CORE, Ph. D. Thesis 2010; A. Pérez-Barahona, *Non-renewable energy resources as input for physical capital accumulation: A new approach*, "Macroeconomic Dynamics", 15(1), 2011, pp. 1–30.

al., zauważa, że energochłonność procesów akumulacji kapitału fizycznego jest wyższa niż w przypadku dóbr konsumpcyjnych. Wykorzystując dane pochodzące z Structural Analysis Database (OECD) i Energy Balances and Energy Prices and Taxes (International Energy Agency, (2004)) skonstruowano miernik intensywności wykorzystania energii jako iloraz konsumpcji energii w danym sektorze do wartości dodanej w nim uzyskanej dla 14 sektorów gospodarki. Tak zdefiniowana relacja okazuje się być szczególnie duża dla sektorów związanych z akumulacją kapitału fizycznego (np. produkcja żelaza i stali - 0.809, transport i przechowywanie - 0.85, produkcja metali nieżelaznych - 0.599, niemetaliczne minerały - 0.507). Tymczasem dla sektorów produkujących dobra konsumpcyjne wskaźniki te są niższe (żywność i tytoń - 0.134, tekstylia i wyroby skórzane - 0.082, budownictwo, rozumiane jako składanie materiałów budowlanych w celu uzyskania budynków - 0.018). Wyniki te sugerują, że modelowanie procesu akumulacji kapitału powinno uwzględniać jego odmienną energochłonność w stosunku do zwykłego procesu produkcyjnego. Perez-Barahona wskazuje też, że ponieważ (jak wynika z danych International Energy Agency (2004)) paliwa kopalne (czyli nieodnawialne zasoby naturalne) stanowią źródło ok. 80% światowej produkcji energii, to modelowanie akumulacji kapitału fizycznego powinno uwzględniać zużycie zasobów naturalnych. Autor, korzystając z kilku upraszczających założeń, takich jak np. technologia typu AK, wyprowadza rozwiązanie, które pozwala wskazać warunki na to, by postęp techniczny, nastawiony na oszczędność energii, umożliwił utrzymanie długookresowego wzrostu.

W następnym podrozdziale dokonamy konstrukcji modelu wzrostu endogenicznego uwzględniającego zużycie zasobów naturalnych. Przesłanki teoretyczne w jego konstrukcji wpływają z omówionych powyżej prac. Następnie ów model zostanie rozwiązany oraz dokonana zostanie analiza generowanych przez niego wyników.

2. Model

Podstawą konstrukcji naszego modelu jest standardowy model opisany w artykule Lucasa¹², który stanowił jedną z pierwszych usystematyzowanych prób ujęcia wpływu wartości kapitału ludzkiego na wzrost gospodarczy. Rozważamy gospodarkę zamkniętą, bez widocznego udziału państwa. Gospodarstwa domowe składają się łącznie z L nieskończenie długo żyjących jednostek. Ilość jednostek rośnie w czasie według stałej stopy $n \in (0,1)$, co daje zależność:

$$\dot{L} = nL.$$

¹² R. Lucas, *On the Mechanics of Economic Development*, "Journal of Monetary Economics", vol. 22, no.1, July 1988.

Każdy z pracowników może zaangażować pewną część posiadanego czasu nie zużywanego na odpoczynek, oznaczoną przez u , na wzięcie udziału w procesie produkcyjnym, a pozostałe $1-u$ czasu – na akumulację własnego kapitału ludzkiego h . Akumulacja ta uzależniona jest od już posiadanych zasobów kapitału ludzkiego¹³. Istotny jest też przeciętny poziom wiedzy h_a , odzwierciedlający zaawansowanie technologiczne danej gospodarki, reprezentowany tu przez łączną wielkość kapitału ludzkiego będącego w posiadaniu jednostek podzieloną przez ilość tych jednostek. Mamy zatem

$$h_a = \frac{\int_0^{+\infty} hL(h)dh}{\int_0^{+\infty} L(h)dh}.$$

Wzrost wielkości przeciętnego zasobu wiedzy jest, jak łatwo zauważyć z powyższego wzoru, ubocznym efektem wzrostu wielkości kapitału ludzkiego u poszczególnych jednostek. Oznacza to, że proces akumulacji h ma w gospodarce podwójny wpływ na wielkość produkcji: przez wzrost poziomu wiedzy zatrudnionych pracowników, którzy bezpośrednio oddziałują na wielkość produkcji, oraz przez wzrost ogólnego poziomu wiedzy, który poprzez postęp techniczny pośrednio wpływa na produkt. Efektywna wielkość zasobów sił pracy wykorzystywanych w procesie produkcyjnym równa jest zatem $L^e = uhL$. Przyjmując założenie o identyczności wszystkich jednostek w gospodarce, dostajemy też, iż $h_a = h$.

Wielkość produkcji dana jest przez funkcję produkcji:

$$Y = AK^\alpha (uhL)^{1-\alpha} h_a^\gamma,$$

gdzie $\alpha, \gamma \in (0,1)$, a A jest pewnym stałym współczynnikiem. Ze względu jednak na wyróżniony udział kapitału ludzkiego oraz przeciętnego zasobu wiedzy, mającego odzwierciedlać postęp techniczny, parametr A traci część swej technologicznej interpretacji związanej z postępowaniem technicznym określanym jako wzrost poziomu wiedzy. Może być zatem rozumiany jako wielkość niezmiennej struktury używanej w procesie produkcyjnym, np. zasobu ziemi. Zauważmy też, że przy jednostkowym nakładzie czynników produkcji – kapitału fizycznego K oraz jednostkowym nakładzie zasobów kapitału ludzkiego

¹³ W pracy G. Becker, *Human capital*, Columbia University Press for the National Bureau of Economic Research, New York 1964 – autor sugeruje, iż krańcowe zyski z edukacji mają tendencję do zmniejszania się wraz ze starzeniem się jednostki (por. P. Aghion, P. Howitt, *Endogenous Growth Theory*, The MIT Press, Cambridge 1998, p. 330), co powoduje zmniejszenie się chęci poświęcania swego czasu na dalszą naukę umiejętności.

w procesie produkcyjnym ($uhL=1$) – łączna produktywność czynników produkcji dana jest wzorem

$$TFP = Ah_a^\gamma,$$

a zatem

$$\frac{\dot{TFP}}{TFP} = \gamma \frac{\dot{h}_a}{h_a}.$$

Jednostki realizują konsumpcję, globalnie równą iloczynowi ilości jednostek L oraz przeciętnej konsumpcji na jednostkę, c . Jednostki te podejmują decyzje maksymalizując swą łączną użyteczność, daną tu wzorem:

$$\int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \ln(c) dt,$$

gdzie ρ jest współczynnikiem dyskonta konsumpcji, czyli wartością informującą nas o tym jaka jest relacja użyteczności płynącej z konsumpcji w okresie bieżącym do użyteczności konsumpcji realizowanej w okresie przyszłym, $\rho \in (0,1)$.

Ewolucja wartości kapitału ludzkiego przebiega według schematu zaproponowanego w pracy Uzawy¹⁴:

$$\dot{h} = h^\xi \delta(1-u),$$

gdzie $\delta > 0$ jest maksymalną stopą wzrostu h w sytuacji, gdyby cały czas jednostek poświęcany był na rozwój wielkości kapitału ludzkiego. Rosen pokazał, że przyjęcie $\xi = 1$ jest zgodne z empirycznymi dowodami dotyczącymi przychodów jednostek.¹⁵

Złoża zasobów naturalnych S występują w momencie początkowym w ilości S_0 a ich zmniejszanie się postępuje w tempie zgodnym z wielkością ich wydobycia R :

$$\dot{S} = -R.$$

Oczywiście chcemy, by ewolucja kapitału fizycznego przebiega w nieklasyczny sposób, zaczerpnięty z pracy Perez-Barahona.¹⁶

¹⁴ H. Uzawa, *Optimum technological change in an aggregative model of economic growth*, "International Economic Review", no. 6, 1965.

¹⁵ S. Rosen, *A theory of life earnings*, "Journal of Political Economy", no. 84, 1976.

¹⁶ A. Pérez-Barahona, *Non-renewable energy...*, *op. cit.*

$$\dot{K} = \Omega R^\beta I^{1-\beta} h_a^\kappa.$$

Zależność powyższą można interpretować jako wynik pewnego procesu produkcyjnego, którego czynnikami są R i I . Można też patrzeć na powyższe równanie jako na szczególny przypadek agregacji typu CES. Parametr β informuje tutaj o udziale zużycia zasobów naturalnych, będącym efektem produkcji energii. Oprócz tego, dopuszczono do występowania efektów akumulacji kapitału ludzkiego. Możliwe jest zatem uzyskanie wyższego wzrostu zasobów kapitału ludzkiego przy jednakowych nakładach energii oraz inwestycji, jeżeli tylko podniesie się stopień zaawansowania technologicznego gospodarki. Nietrudno zauważyć przez analogię do zmian zachodzących w TFP, że wzrost ten następuje w tempie identycznym jak tempo wzrostu kapitału ludzkiego, przemnożone przez parametr κ . Inwestycje natomiast równe są nieskonsumowanej produkcji:

$$I = Y - C, \text{ gdzie } C = cL.$$

Korzystamy z możliwości dokonania przeliczenia wszystkich wielkości na jednostkę pracy. Wprowadzamy zatem wielkość $k = \frac{K}{L}$, którą nazwiemy technicznym uzbrojeniem pracy, wartość istniejących zasobów w przeliczeniu na jednostkę pracy $s = \frac{S}{L}$, wielkość wydobycia zasobów naturalnych na jednostkę pracy $r = \frac{R}{L}$ oraz $y = \frac{Y}{L}$, które odzwierciedla wydajność pracy. Nietrudno zauważyć, że cały model przybiera teraz postać:

$$\int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \ln(c) dt \rightarrow \max,$$

$$\dot{k} = \Omega r^\beta (A k^\alpha (uh)^{1-\alpha} h_a^\gamma - c)^{1-\beta} h_a^\kappa - nk,$$

$$\dot{h} = h\delta(1-u),$$

$$\dot{s} = -r - sn,$$

przy dodatkowym założeniu, że $h_a = h$ z zastrzeżeniami opisanymi już wcześniej. Gospodarstwa domowe maksymalizują zatem swoją użyteczność, wybierając udział czasu u , jaki poświęcają na pracę (i tym samym udział czasu $1-u$, jaki pożytkują na rozwijanie własnego kapitału ludzkiego), poziom konsumpcji c , czym determinują pośrednio wielkość inwestycji w majątek

trwały, a także poziom wydobycia zasobów naturalnych r , co określa wielkość akumulacji kapitału fizycznego. Zmienne k , h oraz s są w zmiennymi stanu.

W następnym rozdziale przedstawimy rozwiązanie tak skonstruowanego modelu oraz dokonamy jego analizy.

3. Rozwiązanie modelu i analiza wyników

Hamiltonian dany jest wzorem

$$\begin{aligned} H &= (c, u, r, k, h, s, \theta_1, \theta_2, \theta_3) = \\ &= e^{-\rho t} \ln(c) + \theta_1 (\Omega r^\beta (Ak^\alpha (uh)^{1-\alpha} h_a^\gamma - c)^{1-\beta} h_a^\kappa - nk) + \\ &+ \theta_2 (h\delta(1-u)) + \theta_3 (-r - sn) \end{aligned}$$

Wykorzystując fakt, że $h_a = h$, warunki pierwszego rzędu zapisać można następująco:

$$\begin{aligned} e^{-\rho t} c^{-1} &= \theta_1 \Omega r^\beta (1-\beta) (Ak^\alpha u^{1-\alpha} h^{1-\alpha+\gamma} - c)^{-\beta} h^\kappa, \\ \theta_1 \Omega r^\beta (1-\beta) (Ak^\alpha u^{1-\alpha} h^{1-\alpha+\gamma} - c)^{-\beta} (1-\alpha) Ak^\alpha u^{-\alpha} h^{1-\alpha+\gamma+\kappa} &= \theta_2 h \delta, \\ \theta_1 \beta \Omega r^{\beta-1} (Ak^\alpha u^{1-\alpha} h^{1-\alpha+\gamma} - c)^{1-\beta} h^\kappa &= \theta_3, \\ -\dot{\theta}_1 &= \theta_1 \Omega r^\beta (1-\beta) (Ak^\alpha u^{1-\alpha} h^{1-\alpha+\gamma} - c)^{-\beta} \alpha Ak^{\alpha-1} u^{1-\alpha} h^{1-\alpha+\gamma+\kappa} - \theta_1 n, \\ -\dot{\theta}_2 &= \theta_1 \Omega r^\beta (1-\beta) (Ak^\alpha u^{1-\alpha} h^{1-\alpha+\gamma} - c)^{-\beta} (1-\alpha) Ak^\alpha u^{1-\alpha} h^{-\alpha+\gamma+\kappa} + \\ &+ \theta_2 \delta (1-u), \\ -\dot{\theta}_3 &= -\theta_3 n. \end{aligned}$$

Definiujemy stan równowagi jako sytuację, w której wszystkie zmienne rosną według stałych stóp wzrostu. Implikuje to, że gospodarstwa domowe poświęcają na pracę stały udział swojego czasu. Uzyskany układ równań, wraz z uprzednio omówionymi równaniami ruchu dla zmiennych stanu (czyli dla k , h , s) daje rozwiązanie następujące¹⁷:

$$\begin{aligned} u^* &= \frac{\rho}{\delta} \in (0,1), \\ g_h^* &= \delta - \rho > 0, \end{aligned}$$

¹⁷ Uzyskanie tegoż rozwiązania wymaga dość skomplikowanych obliczeń, które dla wygody w niniejszej pracy pomijamy. Obliczenia są jednak dostępne u autora niniejszej pracy na życzenie.

$$g_r^* = -(\rho + n) < 0,$$

$$g_y^* = g_c^* = g_i^* = -\rho - \frac{\beta n \alpha - (\gamma + \alpha \kappa)(-\rho + \delta) - \delta(1 - \alpha)}{1 + \beta \alpha - \alpha},$$

$$g_k^* = -\rho + \delta - \frac{\beta(n + \delta) - \gamma(1 - \beta)(-\rho + \delta) - \kappa(-\rho + \delta)}{1 + \beta \alpha - \alpha},$$

gdzie g_x^* jest stopą wzrostu zmiennej x w stanie równowagi. Jak nietrudno zauważyć, oznacza to, że startowa wielkość wydobycia zasobów naturalnych określona tak, by w nieskończoności wyczerpać całość złóż, wynosi $R_0 = S_0 \rho$. Zauważmy, że powyższe wzory mają dość oczywistą interpretację. Dla przykładu, nietrudno zauważyć, że r porusza się zgodnie z regułą Hotellinga¹⁸. Kapitał ludzki natomiast zmienia się w zależności od wzajemnej relacji parametru efektywności procesu akumulacji h oraz stopy dyskonta konsumpcji, reprezentującej niecierpliwość konsumenta. Nie będzie on zatem inwestował w kapitał ludzki, z którego zwrot otrzyma dopiero po pewnym czasie, jeśli efektywność tej inwestycji nie pozwala mu uzyskać wyższego zdyskontowanego poziomu konsumpcji w przyszłości niż otrzymany byłby obecnie przy większym zaangażowaniu dostępnego czasu w produkcję.

Rozwiązanie analityczne układu równań różniczkowych, składającego się z równań ruchu zmiennych stanu oraz z warunków pierwszego rzędu nie jest proste, a być może nawet niewykonalne. Perez-Barahona dokonał tego dla trochę mniejszego układu przy przyjęciu kilku upraszczających założeń.¹⁹ Niewykluczone jest dokonanie tych obliczeń w przyszłych badaniach, na chwilę obecną jednak niemożliwe jest otrzymanie rozwiązań analitycznych, a co za tym idzie – szczegółowa analiza dynamiki przejściowej badanego układu nie jest możliwa. Można natomiast zauważyć, że z warunków pierwszego rzędu wynika dla stanu równowagi następująca zależność:

$$Ak^\alpha u^{*1-\alpha} h^{1-\alpha+\gamma} - Brk^{\frac{\alpha-1}{\beta}} h^{\frac{1-\alpha+\gamma+\kappa}{\beta}} = c,$$

¹⁸ Reguła ta mówi, że wydobycie zasobu naturalnego powinno postępować w takim tempie, by tempo zmiany jego ceny było równe długookresowej stopie procentowej. Odpowiada to możliwości wyboru jednej z dwóch opcji – wydobycie zasobu i jego sprzedanie oraz inwestowanie ze stopą zwrotu równej stopie procentowej lub zatrzymanie zasobu w ziemi i sprzedanie go później po nowszej, wyższej cenie. Rolę stopy procentowej w naszym modelu odgrywa parametr ρ , w długim okresie cena zmienia się proporcjonalnie do podaży zasobów naturalnych. Patrz H. Hotelling, *The Economics of Exhaustible Resources*, "The Journal of Political Economy", vol. 39, no. 2, Apr. 1931.

¹⁹ A. Pérez-Barahona, *Non-renewable energy...*, *op. cit.*

gdzie

$$B = \left(\frac{(1 - \beta)\alpha A \Omega}{g_c^* + \beta(g_r^* - g_i^*) + n + \rho} \right)^{\frac{1}{\beta}},$$

jest pewną stałą. W momencie, w którym gospodarstwo domowe ustala udział czasu poświęcany na działalność produkcyjną, jednoznacznie ustala też stopę wzrostu kapitału ludzkiego oraz stopę ubytku zasobów naturalnych. To natomiast, jak wynika z powyższej relacji, wyznacza stopę wzrostu technicznego uzbrojenia pracy, a tym samym stopę wzrostu konsumpcji. Jeżeli zatem mamy dwie znajdujące się w stanie równowagi gospodarki o identycznych parametrach oraz o jednakowym wyposażeniu w zasoby naturalne i kapitał ludzki, lecz z odmienną ilością kapitału fizycznego, to ta z nich, która jest lepiej w ten kapitał wyposażona, osiągnie wyższą wartość wydajności pracy, tym samym – konsumpcji na jednostkę pracy, czyli także wyższą łączną użyteczność. Rozwijać się jednak obie będą w takim samym tempie, co uniemożliwia gospodarce „biedniejszej” (gorzej wyposażonej w k) dogonienie gospodarki „bogatszej”. Analogiczny wniosek wypływa z sytuacji dwóch gospodarek, różniących się jedynie zasobem kapitału ludzkiego bądź wielkością złóż zasobów naturalnych – gospodarka lepiej wyposażona w którykolwiek z tych zasobów osiągać będzie wyższą wielkość konsumpcji przypadającej na jednostkę pracy, lecz obie rozwijać się będą w tym samym tempie, z identyczną stopą wzrostu gospodarczego. Jest to zgodne z podstawowymi wynikami dla standardowego modelu Lucasa.

Tabela 1.

Znaki odpowiednich pochodnych

	$x = \rho$	$x = \delta$	$x = \beta$	$x = \kappa$	$x = \gamma$
$\frac{\partial u^*}{\partial x}$	>0	<0	=0	=0	=0
$\frac{\partial g_h^*}{\partial x}$	<0	>0	=0	=0	=0
$\frac{\partial g_r^*}{\partial x}$	<0	=0	=0	=0	=0
$\frac{\partial g_y^*}{\partial x}$	<0	>0	<0	>0	>0
$\frac{\partial g_k^*}{\partial x}$	<0	>0	<0	>0	>0

Źródło: Obliczenia własne.

Dość łatwo jest przedstawić znaki pochodnych poszczególnych stóp wzrostu oraz wielkości u względem parametrów $\rho, \beta, \delta, \kappa, \gamma$. Znaki tych pochodnych przedstawione są w tabeli 1.

Z analizy powyższej tabeli, a tym samym wpływu zmian wartości poszczególnych parametrów na główne zmienne modelowanej gospodarki, wysnuć można kilka wniosków:

1. Wydobycie zasobów naturalnych odbywa się zgodnie z regułą Hotellinga, niezależnie od innych uwarunkowań gospodarki. Zmiany makrowarunków nie mają wpływu na modyfikację upodobań gospodarstw domowych odnośnie tempa wyczerpywania złóż, będących źródłami energii.
2. W szczególności zmiany technologiczne nie mają wpływu na tempo wydobycia zasobów naturalnych. Ani poprawienie efektywności procesu akumulacji kapitału ludzkiego, ani zmiana TFP bądź jego odpowiednika w akumulacji kapitału fizycznego nie mają żadnego wpływu na wydobycie R . Jedynym decydującym czynnikiem są tutaj preferencje konsumentów.
3. Wzrost β (elastyczności akumulacji kapitału względem zużycia zasobów naturalnych) powoduje zachętę do zmniejszenia tempa wzrostu produkcji. Staje się tak poprzez zwiększenie efektywności zużycia zasobów naturalnych, a tym samym zmniejszenie efektywności wykorzystania inwestycji w akumulacji kapitału. Tempo wyczerpywania się R pozostaje takie samo, zatem możliwa jest przyrost takiej samej ilości kapitału przy mniejszym nakładzie inwestycji. Prowadzi to zatem do zmniejszenia tempa wzrostu inwestycji, co przekłada się na obniżenie tempa wzrostu produkcji. Zmniejsza to także tempo akumulacji kapitału fizycznego.
4. Podniesienie efektywności procesu akumulacji kapitału ludzkiego (δ) zachęca do jego gromadzenia. Owocuje to zmniejszeniem się udziału czasu przeznaczanego na partycypację w procesie produkcyjnym (spadek u^*), co prowadzi do zwiększenia tempa wzrostu h i pośrednio przez to $-y$ i k .
5. Zmiany stopnia wpływu nowej wiedzy na proces produkcyjny oraz na proces akumulacji kapitału fizycznego, obrazowane przez wzrost wartości parametrów γ i κ , pozytywnie oddziałują na długookresowe stopy wzrostu tych zmiennych. Abstrahując od zmiany stóp wzrostu poszczególnych czynników produkcji, większa chłonność wiedzy w danej gospodarce owocuje dodatkowym, pozytywnym wpływem akumulacji kapitału ludzkiego na wielkość produkcji oraz wielkość kapitału fizycznego.

4. Podsumowanie i wnioski

Skonstruowany model, oparty na klasycznym modelu Lucasa, uwzględnia odmienną energochłonność procesów akumulacji kapitału fizycznego w stosunku do energochłonności produkcji dóbr konsumpcyjnych. Uwzględnienie endogenicznego wzrostu gospodarczego w takim modelu ma dodatkowe konsekwencje – proces zwiększania się zaawansowania technologicznego danej gospodarki pozwala uzyskać wyższe stopy wzrostu produkcji *per capita* oraz technicznego uzbrojenia pracy. Postęp techniczny zobrazowany jest tu jako zwiększanie się przeciętnego zasobu kapitału ludzkiego. Ponieważ jednak w modelowanej gospodarce gospodarstwom domowym nie zależy na utrzymaniu jakichkolwiek zasobów naturalnych (nie czerpią one z faktu istnienia zasobów naturalnych żadnej użyteczności ani żadnej dysużyteczności z tytułu ich zużywania się), nie dążą one do zachowania zasobów naturalnych dla przyszłych pokoleń. Tempo zużycia złóż, będących źródłem energii w danej gospodarce, pozostaje niezmiennie mimo rosnącego zaawansowania technologicznego gospodarki.

Zauważmy, że w tak skonstruowanym modelu nie występuje zjawisko konwergencji dla gospodarek znajdujących się w stanie równowagi – tempo ich rozwoju jest niezależne od początkowego wyposażenia w poszczególne zasoby. Wyższa wartość zmiennych k , h , s w momencie startowym implikuje jedynie wyższą wartość produkcji i tym samym konsumpcji, stopa wzrostu gospodarczego pozostaje jednak w każdym przypadku taka sama. Konkluzja płynąca z tego jest następująca – zrównanie poziomu rozwoju gospodarki biedniejszej z gospodarką bogatszą może nastąpić w drodze odpowiedniego zwiększenia jej wyposażenia w kapitał fizyczny lub ludzki. Jeżeli obie gospodarki osiągają identyczne stopy wzrostu, to względny poziom rozwoju pozostaje dokładnie taki sam przez cały czas pomimo tego, że bezwzględnie obie gospodarki rozwijają się. Różnica parametrów pomiędzy gospodarkami prowadzi do zróżnicowania stóp wzrostu, co z kolei powoduje zwiększanie się dystansu w ich poziomie rozwoju gospodarczego, bądź ewentualnie jego szybkiego zmniejszania się.

Dalsze badania powinny koncentrować się, zdaniem autora, na jednej z kilku możliwości rozszerzenia modelu. Możliwe jest zbadanie konsekwencji uwzględnienia formuły typu CES w procesie akumulacji kapitału fizycznego. Wskazane byłoby także dokonanie analizy w przypadku, gdy wydobycie zasobów naturalnych ma znaczenie dla łącznej użyteczności gospodarki. Może się to odbyć albo poprzez zmniejszającą się użyteczność płynącą z wydobywania zasobów bądź przez dysużyteczność płynącą z zanieczyszczeń generowanych w procesie wytwarzania energii. Kolejnym kierunkiem dalszych badań może być próba wyznaczenia rozwiązania analitycznego badanego

modelu celem analizy dynamiki przejściowej. Trzeba jednak obiektywnie stwierdzić, że będzie to próba niełatwa, a być może w ogóle niewykonalna. Możliwe jest także uwzględnienie zużycia energii w procesie produkcyjnym, lecz oczywiście z mniejszą energochłonnością niż przypadku procesów akumulacji K , a także modelowanie samego procesu produkcji energii.

Bibliografia

- Aghion P., Howitt P.**, *Endogenous Growth Theory*, The MIT Press, Cambridge 1998.
- Azomahou T., Boucekkine R., Nguyen Van P.**, *Energy consumption and vintage effect: a sectoral analysis*, Mimeo 2006.
- Becker G.**, *Human capital*, Columbia University Press for the National Bureau of Economic Research, New York 1964.
- Dasgupta P.**, *Natural Resources in the age of substitutability*, [in:] *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, **A. V. Kneese, J. L. Sweeney** (eds.), ESP B. V., 1993.
- Dasgupta P., Heal G.**, *The Optimal Depletion of Exhaustible Resources*, Review of Economic Studies, (Symposium volume), 1974.
- Grimaud A., Rouge L.**, *Non-Renewable Resources and Growth with Vertical Innovations: Optimum, Equilibrium and Economic Policies*, "Journal of Environmental Economics and Management", 2003.
- Grimaud A., Rouge L.**, *Polluting Non-Renewable Resources, Innovation and Growth: Welfare and Environmental Policy*, "Resource and Energy Economics", no. 27(2), 2005.
- Grimaud A., Rougé L.**, *Environment, Directed Technical Change and Economic Policy*, "Environmental and Resource Economics", no. 41, 2008.
- Gylfason, T.**, *Natural resources, education and economic development*, European Economic Review, vol. 45, 2001.
- Hotelling H.**, *The Economics of Exhaustible Resources*, "The Journal of Political Economy", vol. 39, no. 2, Apr. 1931.
- Lucas R.**, *On the Mechanics of Economic Development*, "Journal of Monetary Economics", vol. 22, no.1, July 1988.
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens W. W.**, *Granice Wzrostu*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1973.

- Pérez-Barahona A.**, *The problem of exhaustible energy resources in the production of capital*, "CORE Discussion Papers", no. 2007/8, 2007.
- Pérez-Barahona A.**, *Capital accumulation and exhaustible energy resources: a Special Functions case*, "CORE Discussion Papers", no. 2007/9, 2007.
- Pérez-Barahona A.**, *Economic growth and the use of non-renewable energy resources*. CORE, Ph. D. Thesis 2010.
- Pérez-Barahona A.**, *Non-renewable energy resources as input for physical capital accumulation: A new approach*, "Macroeconomic Dynamics", 15(1), 2011.
- Romer P.**, *Endogenous technological change*, "Journal of Political Economy", vol. 98, no. 5, 1990.
- Rosen S.**, *A theory of life earnings*, "Journal of Political Economy", no. 84, 1976.
- Sachs J., Warner A.**, *Natural resource Abundance and Economic Growth*, NBER, "Working Paper", no. 5398, 1995.
- Sachs, J., Warner, A.**, *Sources of Slow Growth in African Economies*, "Journal of African Economies", vol. 6, no. 3, 1997.
- Solow R.**, *Intergenerational Equity and Exhaustible Resources*, "Review of Economic Studies", (Symposium volume), 1974.
- Stiglitz J.**, *Growth with Exhaustible Resources: Efficient and Optimal Growth Paths*, "Review of Economic Studies", (Symposium volume), 1974.
- Stijns J. P. C.**, *Natural Resource Abundance and Human Capital Accumulation*, "World Development", vol. 34, 2006.
- Uzawa H.**, *Optimum technological change in an aggregative model of economic growth*, "International Economic Review", no. 6, 1965.

POSTĘP TECHNICZNY, ZUŻYCIE ZASOBÓW NATURALNYCH A ENERGOCHŁONNOŚĆ AKUMULACJI KAPITAŁU I WZROST GOSPODARCZY

Streszczenie

Kierunek i siła zależności pomiędzy wyposażeniem gospodarki w zasoby naturalne a stopniem rozwoju gospodarczego nie są jednoznaczne. Oprócz tego, następuje stopniowe wyczerpywanie się zasobów naturalnych takich jak ropa naftowa czy węgiel kamienny. Związane jest to z jednej strony z rozwojem gospodarczym świata

i zapotrzebowaniem na energię w procesach produkcyjnych, z drugiej – z brakiem dostatecznie dobrych substytutów, które pomogłyby zmniejszyć zużycie zasobów nieodnawialnych w procesach produkcyjnych. Badania empiryczne wskazują dodatkowo na odmienną energochłonność procesów produkcyjnych i akumulacji kapitału fizycznego. Dotychczasowe badania teoretyczne nie dokonują jednak zbyt często rozróżnienia tych dwóch procesów.

Celem pracy jest próba odpowiedzi na pytania o teoretyczne zależności pomiędzy długookresowym wzrostem gospodarczym, postępem technicznym a zużyciem zasobów naturalnych, uwzględniające postulat zróżnicowania energochłonności w akumulacji kapitału fizycznego i produkcji dóbr konsumpcyjnych. Narzędziem badania jest skonstruowany w oparciu o teoretyczne przesłanki model wzrostu gospodarczego. W pracy przedstawione zostanie jego rozwiązanie oraz analiza płynących z niego wniosków.

TECHNOLOGICAL PROGRESS, NATURAL RESOURCES EXHAUSTION, USE OF ENERGY IN CAPITAL ACCUMULATION AND ECONOMIC GROWTH

Abstract

The direction and strength of the relationship between natural resources abundance and the level of economic development are ambiguous. In addition to this, we can observe gradual depletion of natural resources such as petroleum or coal. This is on the one hand due to economic development of the world and demand for energy in production processes, on the other – to the fact of absence of sufficiently good substitutes, which would help to reduce the consumption of non-renewable resources. Empirical studies indicate that energy consumption of production processes and the accumulation of capital differs. Previous theoretical studies do not, however, distinguish between these two processes too often in this matter.

The purpose of this paper is to answer questions about theoretical relationship between long term economic growth, technological progress and consumption of natural resources, taking into consideration the idea of diversity in use of energy in the accumulation of physical capital and production of consumer goods. A model of economic growth is constructed based on theoretical considerations. Solution and analysis of its applications is presented.