

STANISŁAW SZAREK
Akademia Podlaska
Siedlce

MOŻLIWOŚCI WYNIKAJĄCE Z ZASTOSOWANIA EFEKTU HORMETYCZNEGO DO WYJAŚNIENIA PRAWA MALEJĄCEJ WYDAJNOŚCI W ROLNICTWIE

Wstęp

Celem pracy jest przedstawienie nowych aspektów zagadnienia transformacji nakładów na produkty finalne w rolnictwie w świetle prawa malejącej wydajności (malejącej efektywności nakładów). Aktualny stan wiedzy na temat tego prawa nie jest w stanie dać odpowiedzi na kluczowe pytanie stawiane ekonomice rolnictwa: Dlaczego intensywność produkcji nie zawsze idzie w parze z dochodowością produkcji?

Zagadnienia prezentowane w niniejszym opracowaniu wprowadzają do ekonomiki gospodarowania koncepcję efektu hormetycznego i są propozycją połączenia tego efektu z prawem malejącej wydajności. Efekt hormetyczny oznacza pozytywną odpowiedź organizmu na niskie dawki substancji, będących w wyższych stężeniach inhibitorami wzrostu. Prezentowane zagadnienia są pierwszym tego typu opracowaniem. W sposób zadowalający uzupełniają i wyjaśniają problematykę zagadnienia transformacji nakładów na produkty finalne.

Poznanie, możliwość ilościowego pomiaru oraz określenie siły oddziaływania na organizmy żywe substancji dotychczas pomijanych w określaniu efektywności gospodarowania, może stać się ważnym krokiem dla rozwoju rolnictwa. Umożliwi wejście na wyższy jakościowo i ilościowo poziom gospodarowania. Może w wydatny sposób przyczynić się do usunięcia ograniczeń blokujących zwiększanie się produktywności ziemi, a w efekcie – całej produkcji rolniczej. Otwiera też nowe, bardzo duże możliwości przed badaczami zajmującymi się rolnictwem. Należy zdać sobie sprawę, że będzie to pierwszy krok, jaki uczyniony zostanie w tym kierunku. Wytyczy on najważniejsze kierunki badań, jakie należy w najbliższym czasie podjąć, aby uporządkować zagadnienia intensyfikacji produkcji rolniczej.

Materiałem empirycznym były wyniki badań nad stymulującym działaniem na organizmy żywe niskich dawek substancji toksycznych, prowadzone na świecie od początku XX wieku.

Prawo malejącej wydajności

Prawo malejącej wydajności jest jednym z kamieni milowych ekonomii XVIII w. Każdy ekonomista i student kierunków ekonomicznych zetknął się z tym zagadnieniem będąc świadomym, że korzeni tego prawa należy poszukiwać w rolnictwie. Inspiracją do sformułowania tego prawa była obserwacja prawidłowości zachodzących w gospodarstwach rolnych. W 1765 roku francuski arystokrata i finansista A.J. Turgot – zaliczany przez współczesną ekonomię do nurtu fizjokratycznego – ogłosił, że dodatkowe nakłady pracy i kapitału na jednostkę powierzchni ziemi przynoszą coraz to mniejszy przychód, przy innych nakładach nie zmienionych. Kilka lat później, w 1777 roku, to samo zjawisko odkrył szkocki ekonomista Anderson, jednak w literaturze ekonomicznej pierwszeństwo w odkryciu prawa malejących przychodów przynajmniej się Turgotowi.

W 1817 roku prawo malejących przychodów zostało wykorzystane przez D. Ricardo do stworzenia teorii renty gruntowej w dziele pt.: *Principles of political economy and taxation* [45]. Ricardo jako pierwszy zastosował uproszczoną analizę marginalną, obrazującą działanie prawa malejącej wydajności w praktyce. Rozwinięcie i przeniesienie tego prawa do ekonomii, jako swoistego *uniwersum* we wszystkich dziedzinach gospodarowania człowieka, nastąpiło dzięki N.W. Seniorowi, J.S. Millowi, J.H. von Thünenowi, M.S. Longfieldowi, a w późniejszym okresie A. Marshallowi, W.S. Jevonsowi, C. Mengerowi i L. Walrasowi [10]. Ekonomisci wskazywali przy tym na błąd fizjokratów, którzy wiązali to prawo wyłącznie z ziemią, nie zauważając, że dotyczy ono ekonomiki jako całości [9, 14]. Przyjęto, że poprawną nazwą zaobserwowanego przez Turgota zjawiska powinno być „prawo zmiennej efektywności nakładów” lub „prawo malejącej wydajności”. Mimo różnic w nazwie, sedno zjawiska jest takie samo.

Oprócz zwolenników prawa malejącej wydajności była również grupa opozycjonistów, których głównymi przedstawicielami był Marks, Engels oraz Lenin [24, 27, 28]. Uważali oni, że prawo to jest wyłącznie wymysłem burżuazji i poddawali krytyce jego główne założenia [30]. Podstawowym argumentem był fakt, że postęp techniczny jest w stanie zlikwidować zmniejszanie się wydajności w rolnictwie, a tym samym ograniczyć skutki działania prawa malejącej wydajności. Założenie to jest słuszne, jeśli analizować jego działanie w długim okresie. Nie można natomiast negować przejawów jego oddziaływania w warunkach statycznych [3, 39, 44].

Zjawiska zachodzące w rolnictwie opisują przejawy działania prawa malejącej wydajności, choć natura zjawiska leżąca u jego podłoża nie została do końca wyjaśniona. Prawo minimum Liebiga i homeostaza nie dawały precyzyjnej odpowiedzi na mechanizm funkcjonowania tego prawa. Nie jest niczym niezwykłym, że prawo malejącej wydajności zostało odkryte, a nie poznano do końca jego źródła. Przykłady na poparcie tego stwierdzenia można by mnożyć.

Przejawy działania prawa malejącej wydajności widoczne są zwłaszcza w rolnictwie w krótkim okresie. Każdy następny nakład – w stosunku do poprzedniego daje coraz niższy przychód, a w konsekwencji – dochód. Celem gospodarującego jest ustalenie takiego poziomu nakładów, który zagwarantuje najwyższy poziom

dochodów. Takie postępowanie jest zgodne z zasadą racjonalnego gospodarowania, przedstawioną przez A. Smitha w „*An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*” (*Badania nad naturą i przyczynami bogactwa narodów*) w 1776 roku [44].

Do chwili obecnej nie ma spójnej koncepcji wyjaśniającej przejawy działania prawa malejącej wydajności w rolnictwie. Uważa się, że jest ono przejawem działania sił związanych z *pojemnością biologiczną* organizmów żywych. Pojemność ta nie pozwala na przekroczenie zakodowanego poziomu produkcji, w związku z czym mnożenie dodatkowych nakładów mija się z celem i nie jest zgodne z zasadami racjonalnego gospodarowania. W praktyce bywa tak, że producent ponosząc dodatkowe nakłady nie osiąga – choć nie przekroczył pojemności biologicznej hodowanych organizmów – założonego poziomu produkcji. Poznanie mechanizmu rządzącego prawem malejącej wydajności pozwoli spojrzeć na produkcję rolniczą bardziej racjonalnie.

Z prawem malejącej wydajności ściśle związane są zagadnienia wyboru poziomu intensywności produkcji. Problematyka ta i jej wpływ na dochodowość produkcji jest zagadnieniem niedostatecznie opracowanym. Wybór poziomu intensywności powinien sprowadzać się do prostej zależności przyczynowo skutkowej, jednak w praktyce tak nie jest [34, 39, 40, 41]. Tradycyjne mierniki poziomu intensywności, takie jak wysokość nawożenia mineralnego [50], czy wysokość nakładów na jednostkę powierzchni nie wyjaśniają w sposób zadowalający kształtowania się efektywności produkcji i osiąganego dochodu w rolnictwie. Co więcej, ich związek z dochodowością produkcji jest bardzo mały, więc tematyka ta nie jest przedmiotem wnikliwych badań ekonomicznych i bywa marginalizowana. A przecież dla gospodarującego pytanie „Jak racjonalnie gospodarować?” jest jedną z najistotniejszych kwestii, zważywszy na fakt, że dysponuje on ograniczonymi zasobami, z których chce „wycisnąć” jak najwięcej.

Dostępne dane wskazują, że wzrostu produktywności rolnictwa należy poszukiwać w produkcji roślinnej, a w konsekwencji – w glebie. To właśnie ona jest odpowiedzialna za niepowodzenia we wzroście poziomu produkcji. Potencjalne możliwości produkcyjne roślin są bardzo duże. Wiadomo, że w dobrych warunkach kukurydza może dać plon ziarna w wysokości $19,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, pszenica $14,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, a ziemniaki nawet $94,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Jednak średnie plony tych roślin wynoszą w świecie odpowiednio: $4,6$, $1,9$, $28,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, co oznacza wykorzystanie potencjału produkcyjnego w 20-30 procentach. Za tak dużą różnicę w 17% odpowiedzialne są 3 czynniki łącznie: choroby, szkodniki i chwasty. W pozostałych 83% winę za tak niskie plonowanie roślin ponoszą właściwości fizykochemiczne gleb [13]. Nie ma więc wątpliwości, że efektywność i dochodowość produkcji rolniczej uwarunkowana jest produktywnością ziemi, na co wskazują pośrednio wyniki nielicznych badań [40, 41].

Proces produkcyjny w rolnictwie jest nieodłącznie związany z ziemią, a efekty produkcyjne zależą w dużej mierze od jakości tej ziemi. Na glebach najlepszych kompleksów plony roślin uprawnych [21] są ponad dwukrotnie wyższe niż na glebach najłagodniejszych kompleksów. Podobną sytuację obserwuje się, biorąc pod

uwagę klasę bonitacyjną gleby oraz jej odczyn [49]. Jednak to nie jakość gleby ma decydujący wpływ na plony uprawianych roślin. Doświadczenia przeprowadzone na terenie całej Polski pozwalają na wyciągnięcie wniosku, że nawet na glebach tej samej klasy bonitacyjnej i tego samego pochodzenia, przy zastosowaniu tych samych metod i środków produkcji efekty produkcyjne są zróżnicowane. Najbardziej przekonującym przykładem jest przedział zmienności plonów buraka cukrowego w doświadczeniach polowych, który wyniósł na czarnych ziemiach 185 dt/ha, 193 dt/ha na madach i 305 dt/ha na glebach brunatnych [22, 23]. Tak duże różnice tłumaczone są najczęściej zmiennością warunków pogodowych, a przede wszystkim ilością opadów. Poznanie i zrozumienia mechanizmu hormezy pozwala spojrzeć na te wyniki z innej strony i uzależnić je od przejawów działania efektu hormetycznego.

Efekt hormetyczny w badaniach naukowych

Ekonomika produkcji rolniczej zawęża proces gospodarowania w rolnictwie do czynnika ziemi, pracy i kapitału, przy czym dąży się do zmniejszenia znaczenia czynnika ziemi oraz czynników przyrodniczych. Takie uproszczenie już na samym starcie eliminuje prawo, które z żelazną konsekwencją manifestuje swą obecność.

W tej części opracowania zwrócono uwagę na fenomen hormezy, przez który rozumie się stymulujące działanie na organizmy żywe niskich dawek substancji, które w wyższych dawkach są dla tych organizmów inhibitorami wzrostu i rozwoju. Pokazano, jaki jest wpływ substancji uznawanych za toksyczne na wzrost i rozwój roślin uprawnych. Czynniki te w naukach rolniczych dotychczas nie były uwzględniane. Jak pokazują wyniki badań, należy on do istotnych czynników stymulujących plonowanie roślin uprawnych, mających wpływ na efektywność produkcji. Pokazano też, że prawo malejącej wydajności jest pochodną efektu hormetycznego. Opisano również, w jaki sposób te dwa zagadnienia są ze sobą powiązane oraz jakie są wynikające z ich przyjęcia konsekwencje dla praktyki rolniczej.

W związku z tym, że w krajowej literaturze naukowej nie ma pojęć opisujących efekt hormetyczny, na wstępie przedstawiono zestaw niezbędnych terminów, aby móc bez przeszkód poruszać się po zagadnieniach prezentowanych w niniejszej pracy [42]:

- efekt hormetyczny (hormesis phenomenon) – pozytywna odpowiedź organizmów żywych, wyrażająca się w podwyższeniu tempa wzrostu i rozwoju, obniżeniu zapadalności na choroby i w efekcie wroście plonowania pod wpływem niskich dawek substancji, które w wyższych dawkach są toksyczne dla tych organizmów;
- hormetyzator (hormetization factor) – substancja wywołująca efekt hormetyczny;
- próg produkcyjny hormezy (production threshold of hormesis) – punkt, w którym dalsze zwiększanie ilości hormetyzatora powoduje zahamowanie wzrostu, plonowania i wydajności rośliny lub hodowanego zwierzęcia;
- próg ekonomiczny hormezy (economic threshold of hormesis) – punkt, w którym dodatkowe nakłady na zwiększenie produkcji są równe dodatkowym nakładom poniesionym na jej uzyskanie. W ekonomice rolnictwa punkt ten określany jest jako koszt graniczny;

- dawka progowa (threshold dose) – ilość hormetyzatora, która powoduje wystąpienie progu produkcyjnego lub ekonomicznego;
- strefa hormetyczna (hormetic zone) – obszar pomiędzy punktami krzywej hormetycznej, obrazujący pozytywne działanie hormetyzatora.

Podstawy teoretyczne efektu hormetycznego stworzone zostały w 1902 roku przez angielskich fizjologów E. Starlinga i W. Baylissa, którzy odkryli sekretynę – substancję pobudzającą wydzielanie trzustki. Substancje o takim działaniu, wydzielane w małych ilościach, nazwane zostały hormonami. Pojęcie „hormon” ma etymologię w greckim słowie *hormán*, oznaczającego pobudzać, a wywodzi się ono bezpośrednio od słowa *hormē*, oznaczającego impuls, atak, napaść.

W 1926 roku C. Southam i J. Ehrlich zaobserwowali, że użyty do doświadczeń ekstrakt z twardego drewna cedrowego ma działanie hamujące wzrost grzybów. Jednocześnie ten sam ekstrakt – ale w małych dawkach – te same grzyby pobudzał do wzrostu. Opublikowane wyniki ich badań zawierały zmodyfikowane słowo Starlinga – „*hormesis*”, oznaczające stymulujące działanie na organizmy żywe małych dawek substancji, które w większych dawkach są inhibitorami wzrostu i rozwoju [35].

Choć Southam i Erlich jako pierwsi użyli słowa *hormeza*, nie oznacza to, że jako pierwsi zapoczątkowali badania w tym zakresie. Już na początku ubiegłego stulecia zaobserwowano stymulujące działanie toksycznego arsenu na rozwój ziemniaków [37], arsenianu sodu na wzrost i przyrosty świeżej masy owsa [11]. W okresie międzywojennym zaobserwowano stymulujące działanie niskich dawek związków glinu na wzrost i plonowanie roślin. [26, 33].

Od tego czasu w bazach danych na świecie pojawiło się wiele prac opisujących występowanie efektu hormetycznego [7]. Pod koniec ubiegłego wieku pojęcie *hormeza* nabrało nowego znaczenia dzięki pracom toksykologa E. Calabrese, który dokonał syntezy prac badawczych nad przejawami działania efektu hormetycznego w świecie istot żywych – roślin i zwierząt. Jego prace, jak również prace uczonych zajmujących się zagadnieniem wpływu promieniowania jonizującego na organizm doprowadziły do tego, że w 1994 roku UNSCEAR zaakceptował zjawisko *hormezy*¹ [48].

Wszelkie organizmy otaczają szkodliwe substancje – metale ciężkie, toksyczne gazy. Ponadto organizmy te są ciągle wystawione na różnego rodzaju, działające z różnym natężeniem, promieniowanie jonizujące oraz promieniowanie UV. Te same gatunki roślin bytują w środowiskach, gdzie zawartość w glebie metali ciężkich jest bardzo niska [46] lub też poziom promieniowania jonizującego jest bardzo mały [31]. Inne zaś za środowisko życia i rozwoju obrały sobie – lub świadomie zrobił to człowiek – miejsca, gdzie koncentracja szkodliwych pierwiastków, gazów lub poziom promieniowania jest relatywnie wysoki, a nawet bardzo wysoki. To, że organizmy te żyją i rozmnażają się w tak różnych warunkach jest zasługą homeostazy, natomiast wpływ określonych dawek tych substancji na organizmy żywe można wyjaśnić jedynie przy zastosowaniu *hormezy*.

¹ Z inicjatywy polskiej delegacji.

Koncepcja hormezy zakłada, że każda substancja – nawet bardzo toksyczna – wywiera stymulujący wpływ na organizmy istot żywych, przejawiający się we wzroście, zdrowotności, odporności na choroby i zdolności do rozmnażania [36]. Wybrane przykłady dowodzą występowania przejawów efektu hormetycznego w świecie roślin.

Toksyczny dla organizmów żywych chlorek kadmu (CdCl_2) w dawce do 10 ppm wyraźnie zwiększał wysokość roślin oraz plon suchej masy soi [25]. Zwiększenie dawki do 20 ppm CdCl_2 prowadziło do śmierci roślin². Kadm stymulował również w niskich dawkach wzrost siewek dębu, klonu i soi. [8, 51]. Obserwowano również stymulujące działanie na kukurydzę, ryż i rośliny korzeniowe niskich dawek glinu [4, 5, 19], soli arsenu na wzrost i rozwój grochu, rzodkwi, pszenicy i ziemniaków [2, 11, 47]. Chrom, kobalt i miedź w niskich stężeniach miał również stymulujący wpływ na wzrost i rozwój roślin [12, 29].

Postrzegane jako pierwiastki bardzo toksyczne i niebezpieczne dla zdrowia człowieka związki ołowiu, litu i niklu również działały stymulująco na wzrost roślin [1, 16]. Pozytywna odpowiedź roślin na zastosowane w tych doświadczeniach czynniki hormetyzujące przekraczała poziom – w porównaniu do prób, gdzie hormetyzatora nie stosowano – nawet o kilkadziesiąt punktów procentowych.

Pozostaje jeszcze do zweryfikowania kwestia, czy substancje używane w rolnictwie wywołują efekt hormetyczny, bo przecież stosowane są w dość dużych dawkach, dochodzących do kilkuset kilogramów, a w przypadku nawozów organicznych – kilkudziesięciu ton na jednostkę powierzchni uprawy danej rośliny. Jeśli przyjąć, że rośliny uprawne wykorzystują składniki pokarmowe z 30 cm warstwy gleby, to na 1 kg gleby – przy dawce nawozu wynoszącej 100 kg czystego składnika – przypada około 18 mg (18 ppm) czystej substancji chemicznej (przyjmując, że ciężar właściwy gleby wynosi $1,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Nawozy stosuje się najczęściej w kilku podzielonych dawkach, a rośliny wykorzystują te substancje przez cały okres wegetacji, trwający od 150 do 320 dni. Taką ilość substancji czynnej bez wątpienia można sklasyfikować jako przejaw działania efektu hormetycznego.

Wniosek taki jest uzasadniony, jeśli przeanalizować dawki toksycznych substancji stosowane w doświadczeniach, gdzie bada się ich wpływ na rośliny. Dawki te można zakwalifikować jako niskie, nie przekraczające 20 ppm [25], średnie – nie przekraczające 100 ppm [15, 20] lub duże – rzędu nawet 500-1000 ppm [18, 38].

Dawki te w przeliczeniu na 1 ha powierzchni wynoszą odpowiednio 110 kg w przypadku dawek niskich, $550 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ w przypadku dawek średnich oraz $2750\text{-}5500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ w przypadku dawek wysokich. Gdyby rolnik chciał nawozić swoje użytki dawką 200 kg chlorku kadmu czy też dawką 150 kg arsenianu sodu, należało by uznać to za przejaw skrajnie nieracjonalnego działania, choć uzyskany dzięki temu efekt plonotwórczy byłby równoważny zastosowaniu 80 kg saletry amonowej lub mocznika.

² 1 ppm odpowiada dawce $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Porównując te wyniki do dawek, jakie stosuje się na co dzień w rolnictwie (tabela 1) można jednoznacznie stwierdzić, że efekt hormetyczny w rolnictwie wywoływany jest przez dawki niskie, często niższe niż stosowane w doświadczeniach nad wpływem substancji toksycznych na rośliny. Substancje czynne stosowane w nawozach mineralnych są częściowo pobierane przez rośliny, częściowo przez mikroorganizmy glebowe, a pewne ich ilości są wymywane z warstwy ornej w głąb gleby przez wody opadowe, a więc dla roślin tracone bezpowrotnie. W tej sytuacji dawka skuteczna, docierająca bezpośrednio do rośliny jest jeszcze niższa.

Tabela 1

Zawartość działającej substancji czynnej w 30 cm warstwie gleby w uprawie wybranych roślin przy doglebowym stosowaniu nawozu.

Roślina	Nazwa substancji czynnej	Dawka nawozu (kg·ha ⁻¹)	Zawartość substancji czynnej w glebie (mg·kg ⁻¹)
Pszenica	NH ₄ NO ₃	100	18
Ziemniaki	K ₂ O	80	14,4
Jęczmień	P ₂ O ₅	60	10,8
Bobik	Mo	1,0	0,18

Źródło: Opracowanie własne.

Wszystkie nawozy i środki ochrony roślin są w świetle hormezy substancjami mniej lub bardziej toksycznymi. Stosowanie ich obwarowane jest konkretnymi środkami ostrożności, a każdy nawóz sztuczny ma podaną dawkę LD₅₀. Dla przykładu, jeden z bardziej toksycznych nawozów – pentatlenek fosforu (P₂O₅) może powodować u człowieka:

- przy kontakcie ze skórą: oparzenia, powstanie trudno gojących się ran;
- przy spożyciu: oparzenia przełyku i żołądka, ryzyko perforacji przełyku i żołądka;
- przy wdychaniu pyłów: uszkodzenie dróg oddechowych, objawy – bronchitis, pneumonia;
- przy kontakcie z oczami: oparzenia, ryzyko zmętnienia rogówki i utraty wzroku.

Efekt hormetyczny można opisać graficznie za pomocą funkcji przedstawionych na rysunku 1 i 2. W obu wypadkach mamy do czynienia z modelem funkcji kwadratowej, opisanej równaniem [17]:

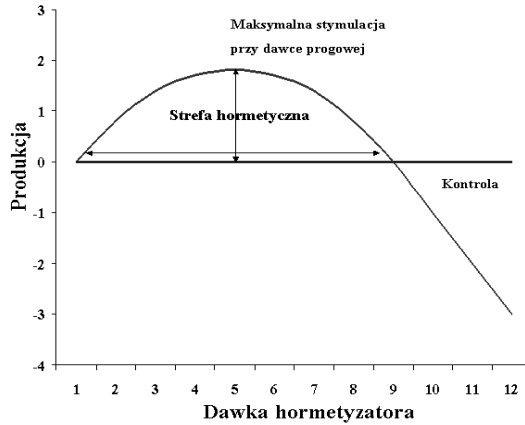
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \varepsilon$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X - \beta_2 X^2 + \varepsilon$$

gdzie $\beta_0; \beta_1; \beta_2 > 0$

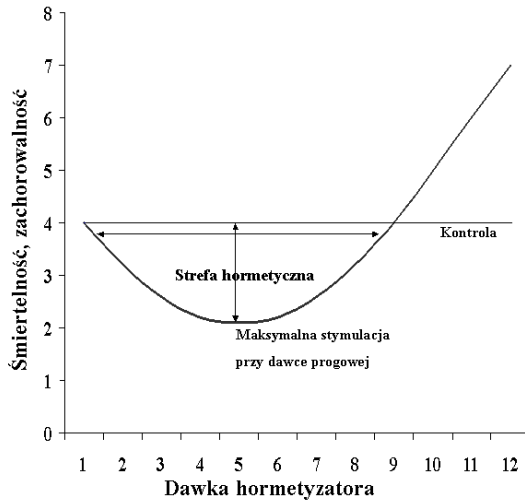
gdzie przez Y oznaczono zmienną zależną, przez X – zmienną niezależną, zaś przez β – współczynniki regresji.

Efekt hormetyczny występuje również w przypadku, gdy jego przebieg można opisać przy zastosowaniu funkcji Gompertza lub funkcji logistycznej. W niniejszym opracowaniu przedstawiono najczęściej występujące funkcje kwadratowe [12].



Rys. 1. Krzywa typu β efektu hormetycznego wynikająca ze wzrostu produktywności przy zastosowaniu odpowiedniej dawki hormetyzatora.

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 2. Krzywa typu U efektu hormetycznego wynikająca z poprawy zdrowotności przy zastosowaniu odpowiedniej dawki hormetyzatora.

Źródło: Opracowanie własne.

Dane eksperymentalne, które można sklasyfikować jako efekt hormetyczny, winny spełniać następujące warunki [43]:

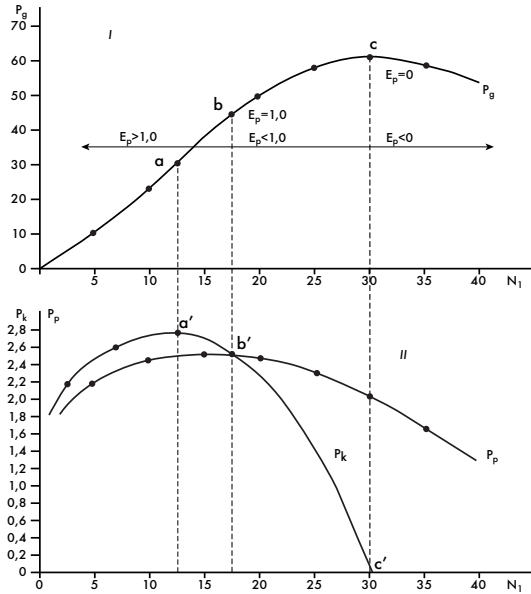
- a) substancje wywołujące efekt hormetyczny powinny być potencjalnie toksyczne a nawet bardzo toksyczne;
- b) najlepsze wyniki uzyskuje się, jeśli badane obiekty poddać działaniu hormetyzatora w co najmniej 6 różnych dawkach;
- c) doświadczenie winno zawierać próbę kontrolną, w której nie stosowano hormetyzatora;
- d) konieczne jest osiągnięcie maksymalnej, pozytywnej odpowiedzi organizmu, która jest wyższa od próby kontrolnej. Maksymalna stymulacja przejawia się osiągnięciem progu produkcyjnego hormonezy. Wzrost ten może być nieznaczny, jednak nie jest niczym niezwykłym, jeśli w stosunku do kontroli wyniesie on kilkadziesiąt lub nawet kilkaset procent;
- e) po osiągnięciu progu produkcyjnego hormonezy dalsze zwiększenie ilości hormetyzatora powoduje obniżenie pozytywnej odpowiedzi organizmu. W zależności od stopnia szkodliwości substancji, spadek ten może być powolny lub gwałtowny.

Tak opisany efekt hormetyczny nie różni się niczym od przedstawianej w wielu pracach z zakresu rolnictwa krzywej nawozowej, obrazującej działanie zwiększających się dawek nawozów mineralnych na wzrost, rozwój i plonowanie roślin uprawnych.

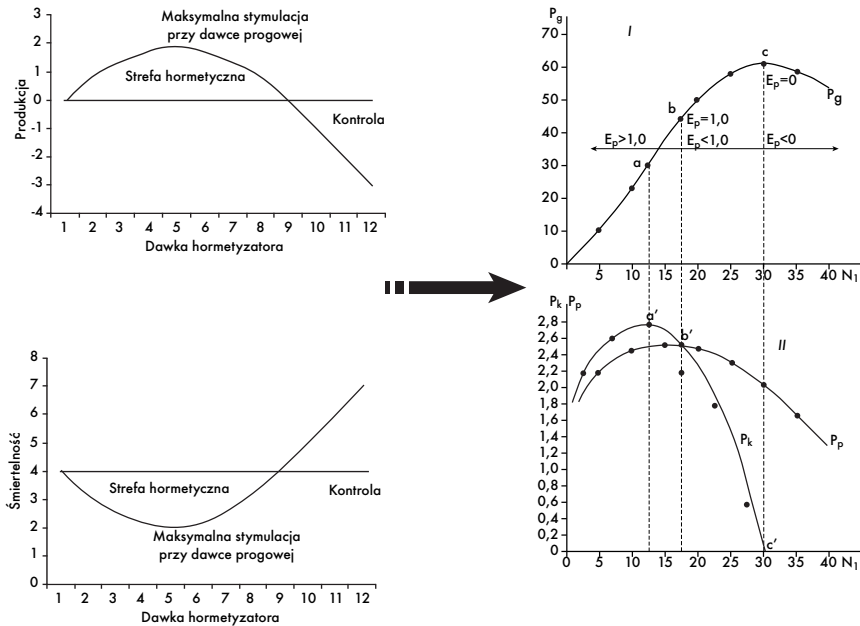
Powiązanie prawa malejącej wydajności z efektem hormetycznym

Ekonomia rozwinęła prawo malejącej wydajności, wzbogacając je dodatkowo o zagadnienie produktu krańcowego i przeciętnego (rys. 3). Określono na tej podstawie strefy racjonalnej i nieracjonalnej produkcji. Zasada racjonalnego gospodarowania wymaga, aby produkcja uzyskana dzięki dodatkowym nakładom była wyższa od dodatkowo poniesionych na nią nakładów. Jak wyraźnie pokazuje to rysunek 3, krzywa Pg jest dokładnym odwzorowaniem krzywej efektu hormetycznego opisanego na rysunku 1. Krzywe te są identyczne, a różnica sprowadza się do tego, że krzywa produkcji ma najczęściej wyraz wartościowy (pieniężny) zaś krzywa hormetyczna jest odwzorowana za pomocą wartości naturalnych (kg, dt, t). Nie zmienia to jednak postaci rzeczy.

W przypadku odpowiedzi organizmu zobrazowanego na rysunku 2, krzywa w postaci litery U nie jest ekonomicznym odwzorowaniem dodatkowych nakładów. W tym wypadku nastąpi transformacja efektu wyrażonego w jednostkach naturalnych na jednostki pieniężne, co przedstawiono na rysunku 4. Nie ma zatem znaczenia, czy efekt hormetyczny odwzorowuje się w postaci krzywej typu β , czy też krzywej w kształcie litery U . Uzyskane efekty transformowane są w prosty sposób na poprawę produktywności (rys. 4), a dla gospodarującego jest istotne, że nastąpi wzrost produkcji. Efektem będzie obniżenie jednostkowych kosztów produkcji, poprawi się intensywność produkcji, wzrośnie efektywność i dochodowość gospodarowania.



Rys. 3. Zależności pomiędzy nakładem (N) a produktem całkowitym (P_g) krańcowym (P_k) i przeciętnym (P_p).



Rys. 4. Transformacja efektu hormetycznego w przypadku odwzorowania efektów produkcyjnych na jednostki pieniężne.

Źródło: Opracowanie własne.

Należy zdać sobie sprawę, że nie można wyznaczać poziomu nakładów, a tym samym i poziomu intensywności produkcji na podstawie wielkości proggu produkcyjnego hormezy, przedstawionych na rysunku 1 i 2. Zależności pomiędzy dodatkowym nakładem a dodatkową produkcją przedstawiono na rysunku 5. Próg produkcyjny występuje w tym przypadku przy nakładzie $N7$. Jeśli przyjmiemy, że krzywa P obrazuje wielkość produkcji uzyskaną dzięki zastosowaniu dodatkowej dawki hormetyzatora, to granicą racjonalnej produkcji będzie nie nakład $N4$, lecz nakład $N3$. Aby to wyjaśnić należy przeanalizować dane zamieszczone na rysunku 5. Jeśli przyjąć, że poziom nakładów i produkcji są wielkością wektorową, to z rysunku wyraźnie wynika, że przy wzroście nakładów z poziomu $N1$ do poziomu $N2$:

$$\Delta n1 < \Delta p1$$

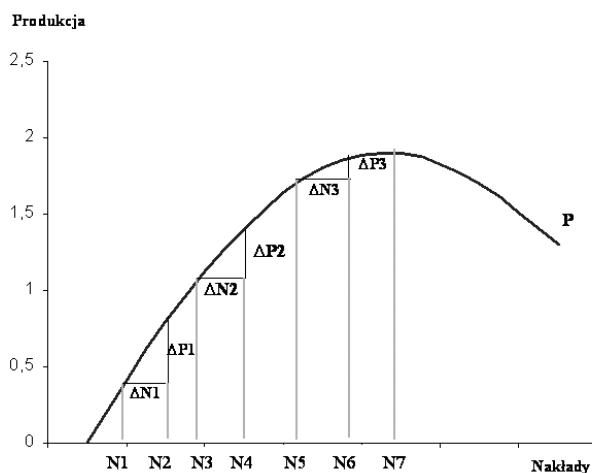
Dalszy wzrost nakładów z poziomu $N3$ do $N4$ spowoduje, że

$$\Delta n2 = \Delta p2$$

Dalsze zwiększanie nakładów mijają się z celem, bowiem po przekroczeniu tego punktu

$$\Delta n3 > \Delta p3$$

Oznacza to, że wartość nakładów użytych na dodatkową produkcję jest wyższa niż uzyskana produkcja.

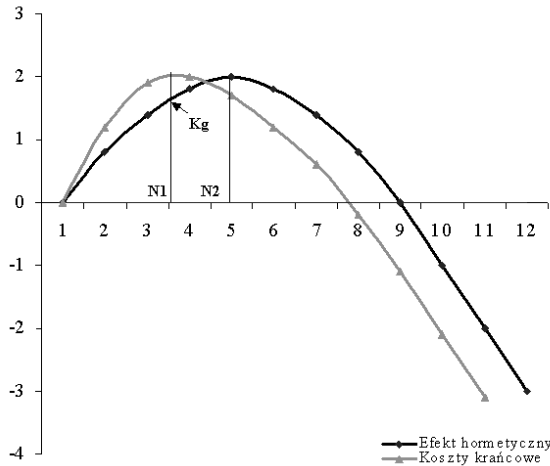


Rys. 5. Punkt wystąpienia kosztu granicznego przy stosowaniu dodatkowych nakładów (Δn) na uzyskanie dodatkowej produkcji (Δp).

Źródło: Opracowanie własne.

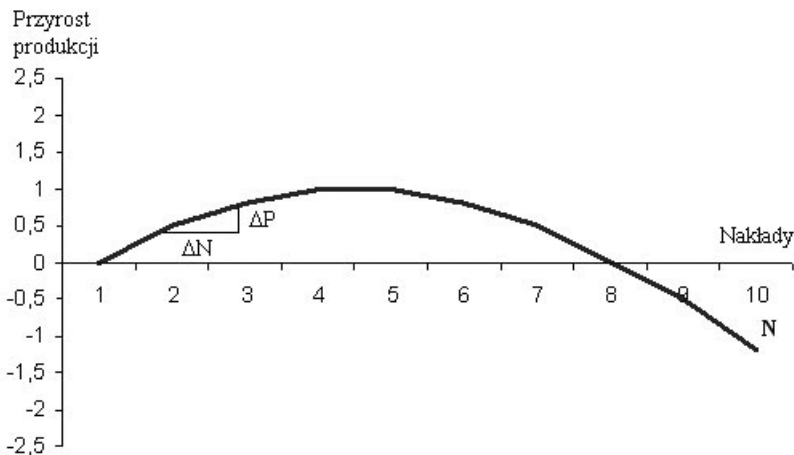
W tym przypadku występuje przesunięcie krzywej hormetycznej do krzywej kosztów krańcowych. Krzywa kosztów krańcowych przesunięta jest w stosunku do krzywej hormetycznej w lewo (rysunek 6). Wielkość przesunięcia jest uwarunkowana kształtem krzywej hormetycznej. Im bardziej krzywa ta jest spłaszczona, tym bardziej krzywa kosztów krańcowych będzie przesunięta w lewo. W niektórych wypadkach

wystąpienie efektu hormetycznego jest na tyle słabe, że fakt ten nie będzie miał przełożenia na efekt ekonomiczny (rysunek 7). W takiej sytuacji, pomimo wystąpienia efektu hormetycznego, wzrost produkcji uzyskany dzięki zastosowaniu hormetyzatora będzie tak słaby, że zastosowanie go w praktyce gospodarczej mija się z celem. Poniesienie w tym wypadku dodatkowych nakładów na uzyskanie niewielkiego wzrostu dodatkowej produkcji jest ekonomicznie nieuzasadnione, ponieważ $\Delta N > \Delta P$.



Rys. 6. Przesunięcie krzywej kosztu krańcowego i krzywej hormetycznej. Próg produkcyjny występuje w tym wypadku przy dawce $N2$, zaś próg ekonomiczny przy dawce $N1$.

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 7. Wpływ kształtu krzywej hormetycznej na efektywność dodatkowych nakładów produkcyjnych.

Źródło: Opracowanie własne.

Taka sytuacja jest spotykana w praktyce gospodarczej. W doświadczeniach nawozowych zastosowanie dodatkowego składnika nawozowego – na przykład zwiększenie ilości nawozów potasowych przy stałej dawce nawożenia azotowego i fosforowego – daje niewielki wzrost plonu w stosunku do obiektu kontrolnego, w którym nawożenia nie stosowano.

Nowe aspekty wynikające z zastosowania efektu hormetycznego w ekonomicznym rolnictwie

O ile przedstawiane wcześniej zagadnienia są znane i opisywane w literaturze, to koncepcja hormezy wprowadza nowe elementy poznawcze do nauk rolniczych i ekonomicznych.

Analizując wyniki badań nad zawartością pierwiastków śladowych w glebach zauważa się, że gleby Polski charakteryzują się zróżnicowaną ich zawartością. Badania IUNG przeprowadzone na zlecenie Ministerstwa Rolnictwa w latach 1992-1997 na użytkach rolnych całej Polski pozwoliły ustalić zawartość pierwiastków śladowych w glebach [46]:

Cd	0,01	– 49,7 mg·kg ⁻¹
Cu	0,2	– 725 mg·kg ⁻¹
Ni	0,1	– 328,3 mg·kg ⁻¹
Pb	0,1	– 5000 mg·kg ⁻¹
Zn	0,5	– 5754 mg·kg ⁻¹

Tabela 2

Zawartość pierwiastków śladowych w glebach użytków rolnych poszczególnych województw w Polsce (mg·kg⁻¹)

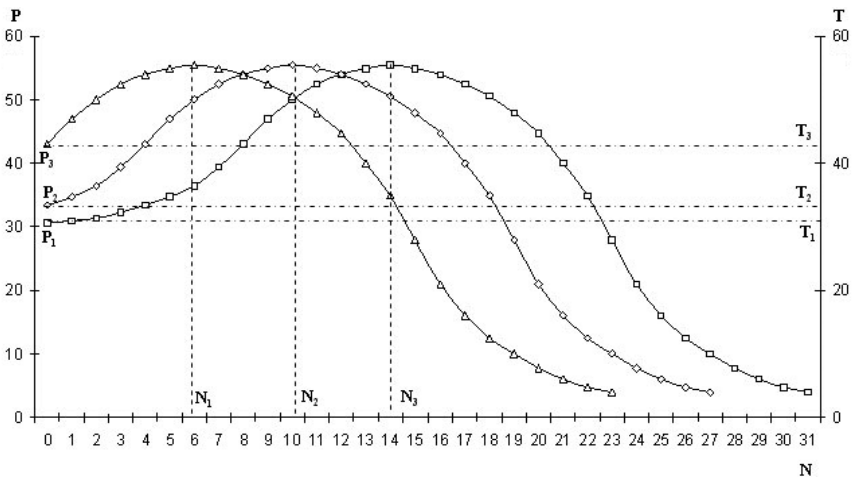
Województwo	Kadm	Miedź	Nikiel	Ołów	Cynk	Metale-rm
Dolnośląskie	0,23	15,4	8,3	20,6	54,9	118,85
Kujawsko-pomorskie	0,19	4,7	6,1	11,7	23,3	68,29
Lubelskie	0,17	4,8	6,3	10,8	23,6	68,77
Lubuskie	0,12	6,0	4,9	9,9	31,7	81,73
Łódzkie	0,20	4,8	4,6	13,9	25,1	71,17
Małopolskie	0,57	13,4	15,3	29,1	79,2	157,73
Mazowieckie	0,15	3,7	3,1	9,3	22,4	66,85
Opolskie	0,33	9,0	9,4	20,9	43,6	100,77
Podkarpackie	0,28	9,6	13,5	17,5	40,1	95,17
Podlaskie	0,21	5,6	5,3	10,2	19,5	62,21
Pomorskie	0,22	6,7	7,2	12,2	36,7	89,73
Śląskie	0,87	11,1	12,9	39,8	90,6	175,97
Świętokrzyskie	0,28	5,9	7,2	13,8	39,1	93,57
Warmińsko-mazurskie	0,15	6,1	7,9	12,2	29,4	78,05
Wielkopolskie	0,14	4,9	3,1	10,1	25,3	71,49
Zachodniopomorskie	0,20	9,2	5,6	12,6	36,6	89,57

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [46].

W naszym kraju występuje również duże zróżnicowanie zawartości pierwiastków śladowych w glebach poszczególnych województw (tabela 2). Najwyższą zawartością pierwiastków śladowych charakteryzują się gleby Śląska, zaś najniższą ich ilość zanotowano w województwie podlaskim.

Dane te pokazują, że można spodziewać się wystąpienia efektu hormetycznego w przypadku uprawy roślin na glebach Polski. Efekt ten polegać będzie na tym, że określone stężenie pierwiastków śladowych w glebie będzie mieć korzystny wpływ na wzrost i plonowanie roślin. Przekroczenie tego poziomu skutkować będzie obniżeniem plonowania i wydatnym pogorszeniem jakości produkowanej żywności.

Dla gospodarującego duże znaczenie będzie mieć fakt, że produkcja roślin na glebach zawierających zwiększoną zawartość pierwiastków śladowych będzie mniej nakładochłonna (rysunek 8). Producent dla uzyskania tej samej produkcji – w porównaniu do gleb zawierających niższe ilości pierwiastków śladowych – zużyje mniej nawozów mineralnych i środków ochrony roślin, co wydatnie przyczyni się do obniżenia kosztów produkcji a tym samym do poprawienia efektywności produkcji. W tym wypadku mieć będzie miejsce kompensacja dodatnich efektów, wynikająca z plonotwórczego działania hormetyzatora (np. nawozu mineralnego) i plonotwórczego działania zwiększonej zawartości pierwiastków śladowych w glebie.



Rys. 8. Relacja pomiędzy wielkością produkcji (P) a ilością czynnika hormetyzującego (N) w zależności od zawartości pierwiastków śladowych w glebie (T).

Źródło: Opracowanie własne.

W takiej sytuacji efekt hormetyczny zmienia przebieg i kształt krzywej kosztów marginalnych, a tym samym działanie prawa malejącej wydajności. Dla osiągnięcia maksymalnej wartości przyrostu produkcji (P), przy wyższej zawartości pierwiastków śladowych w glebie (T), wystarczy niższa dawka dodatkowego hormetyzatora (N) niż na glebie o niższej zawartości tych pierwiastków. Dlatego na glebach o naturalnie wyższej zawartości pierwiastków śladowych można łatwo przekro-

czyć próg produkcyjny hormonezy, co skutkować może obniżeniem plonowania i zanieczyszczeniem wód opadowych przez nawozy sztuczne. Wymagane jest więc przeprowadzenie szczegółowych badań nad reakcją poszczególnych roślin uprawnych na nawożenie mineralne na glebach o zróżnicowanej zawartości pierwiastków śladowych.

Podsumowanie

Przedstawione dane nie pozostawiają wątpliwości, że prawo malejącej wydajności jest pochodną efektu hormetycznego. O ile prawo to wyjaśnia zagadnienia transformacji nakładów na produkty finalne, to zjawisko hormonezy wyjaśnia, dlaczego w praktyce rolniczej mamy do czynienia z występującymi tam anomaliami. Uwzględnienie czynników hormetyzujących w przypadku prawa malejącej wydajności z jednej strony, oraz wzbogacenie prawa hormonezy elementami ekonomiki z drugiej umożliwi skuteczne zastosowanie ich w praktyce. Stworzy podstawę do precyzyjnego wyznaczenia dawek substancji hormetyzujących, gwarantujących uzyskanie maksymalnej produkcji.

Analiza wyników doświadczeń pozwala na stwierdzenie, że zawarte w glebie pierwiastki metali ciężkich w istotny sposób mogą wpływać na plonowanie roślin uprawnych. Czynnikiem ten jest elementem, który należy uwzględnić w badaniach chemiczno rolniczych. Dotychczasowa klasyfikacja gleb winna być wzbogacona o zawartość pierwiastków metali ciężkich w poszczególnych glebach. Ponadto w glebach uprawnych mogą istnieć substancje swoiste dla danego rodzaju gleby, inne niż dotychczas oznaczane, a wywołujące efekt hormetyczny. Zachodzi więc konieczność rozszerzenia analizy gleby o zawartość w niej pierwiastków śladowych jako istotnego czynnika plonotwórczego.

Stwierdzenie dobroczynnego wpływu na organizmy żywe substancji, które dotychczas uważano za toksyczne, jest trudnym do zaakceptowania faktem. Jednak nie można negować jego istnienia, tym bardziej, że takie postawienie sprawy wyjaśnia wiele kwestii dotychczas pomijanych w rolnictwie i ekonomice gospodarowania.

Literatura:

1. Allender W.J., Cresswell G.C., Kaldor J., Kennedy I.R. (1997): Effect of lithium and lanthanum on herbicide induced hormesis in hydroponically growth cotton and corn. *J. Plant Nutr.*, 20: 1-95.
2. Audus L.J. (1952): The time factor in studies of growth inhibition in excised organ sections. *J. Exper. Bot.*, 3: 375-392.
3. Benham F. (1948): *Economics*. Trzaska Ewert i Michalski, Warszawa, s. 365-369.
4. Bennet R.J. and Breen C.M. (1991): The recovery of the roots of *Zea mays* L. from various aluminum treatments: toward elucidating the regulatory processes that underlie root growth control. *Environ. Exper. Botany*, 31: 153-163.
5. Bennet R.J., Breen C.M., and Fey M.V. (1987): The effects of aluminum on root cap function and root development in *Zea mays* L. *Environ. Exper. Botany*, 27: 91-104.
6. Budzyński F. (1990): Zróżnicowanie nakładów a produktywność ziemi w Polsce i wybranych krajach europejskich. *Rozprawy naukowe i monografie*. SGGW Warszawa.

7. Calabrese E.J., Baldwin L.A. (1997): The Dose determines the Stimulation (and Poison): Development of a Chemical Hormesis Database. *Int. J. of Toxic.* 16: 545-559.
8. Chandra P., Tripathi R.D., Rai U.N., Sinha S., and Garg P. (1993): Biomonitoring and amelioration of nonpoint source pollution in some aquatic bodies. *Wat. Sci. Technol.*, 28: 323-326.
9. Clark J.M. (1949): Diminshing returns of Encyclopaedia of the Social Sciences. New York, t. V, s. 149.
10. Colander L. (1996): *Historia myśli ekonomicznej*. PWN Warszawa.
11. Crafts A.S. and Rosenfels R.S. (1939): Toxicity studies with arsenic in 80 California soils. *Hilgardia*, 12: 177-200.
12. Deng Ch., Graham R., Shukla R. (2001): Detecting and estimating hormesis using a model-based approach. *Hum. Ecol. Risk Asses.* Vol. 7, No 4: 849-866.
13. Domachowski R. (1992): Wybrane problemy gospodarcze świata /w:/ *Zadania geograficzne*. Koris, Warszawa, s. 133.
14. George H. (1904): *Nauka ekonomii politycznej*. Nakład Z. Słupskiego, Poznań; s. 296-314.
15. Grothe D.R. Dickson K.L. Red-Judkins D.K. (Eds) (1995): Whole effluent toxicity testing: An evaluation of methods and prediction of receiving system impacts. Society of Environmental Toxicology and Chemistry.
16. Harmet K.H. (1979): Rapid growth responses of *Avena coleoptile* segments to lanthanum and other cations. *Plant Physiol.*, 64: 1094.
17. Hickey R.J., Bowers E.J., Clelland R.C. (1983): Radiation hormesis, public health and public policy: A Commentary. *Health Phys.* 44: 207-219.
18. Hirt H., Casari G., Barta A. (1989): Cadmium-enhanced gene expression in suspension-culture cells of tobacco. *Planta*, 179: 414-420.
19. Hutchinson G.E. (1945): Aluminum in soils, plants, and animals. *Soil Sci.*, 60: 29-40.
20. Klemm D.J. et all (1994): Short term methods for estimating the chronic toxicity of effluent and receiving waters to marine and estuarine organisms. 2nd edition. EPA /600/4-91/003.
21. Krzymuski J. (1984): Czynniki plonowania zbóż. *Zeszyty Problemowe PNR* z. 305: 38-50.
22. Łachowski J. (1960): Wpływ różnych dawek siarczanu cynku na plony buraków cukrowych w Polsce. *Rocz. Nauk Rol.* T. 83-A-1, s. 158.
23. Łachowski J. (1962): Wpływ siarczanu magnezu na plony buraków cukrowych w Polsce. *Rocz. Nauk Rol.* T. 85-A-4, s. 674.
24. Lenin W. (1954): *Dzieła*. t. 13, Książka i Wiedza, Warszawa, s. 173.
25. Levings M.K. (1977): Effects of cadmium chloride on growth and pigments in *Glycine max L.*, *Quercus rubra L.*, *Acer saccharinum L.*, and *Cucumis stauvus L.* *Masters Environ. Safety*, 48: 51-55.
26. Lipman C.B. (1938): Importance of silicon, aluminum, and chlorine for higher plants. *Soil Sci.*, 45: 189-198.
27. Marks K. (1925): *Teorie wartości dodatkowej*. Na podstawie *Histoire des doctrines economiques*. t. IV, Paryż, s. 69.
28. Marks K., Engels F. (1955): *Socinienija*. t. 1, Moskwa s. 563.

29. Monsees T.K., Winterstein U., Hayatpour J., Schill W-B., Miska W. (1998): Effect of heavy metals on the secretory function of testicular cells in culture. *J. Trace Microprobe Technol.*, 16: 427-435.
30. Napoleoni C. (1964): *Myśl ekonomiczna XX wieku*. PWN Warszawa; s. 146-147.
31. Radiologiczny atlas Polski (1998). J. Jagielak, Agencja Wydawnicza ARIES, Warszawa.
32. Royle A., Rai T. i inni (1995): Cadmium regulated nitrate reductase activity in *Hydrilla verticillata*. *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 106, s. 174.
33. Sommer, A.L. (1926): Studies concerning the essential nature of aluminum and silicon for plant growth. *Univ. Calif. Pubs. Agric. Sci.*, 5: 57-81.
34. Sondel J. (1961): Zagadnienie kosztów przeciętnych i krańcowych w produkcji rolniczej. *Roczniki Nauk Rolniczych*, T. 76-G-2; s. 273-313.
35. Southam C.M., Ehrlich J. (1943): Effects of extract of western red cedar heartwood on certain wood-decaying fungi in culture. *Phytopathology* 33; 517-524.
36. Stebbing A.R.D. (1982): Hormesis – the stimulation of growth by low level of inhibitors. *Total Environment* 22: 213-234.
37. Stewart J. and Smith E.S. (1922): Some relations of arsenic to plant growth: Part 2. *Soil Science*, 14: 119-126.
38. Stigler G.J. (1949): *The theory of price*. University of Minnesota, New York s. 121.
39. Szarek S. (2000): Wpływ poziomu produktywności na opłacalność produkcji żywca wieprzowego /w:/ *Możliwości poprawy konkurencyjności Agrobiznesu*. Wyd. AR Lublin.
40. Szarek S., Kałuża H. (2003): Intensywność organizacji gospodarstwa a dochodowość produkcji rolniczej /w:/ *Działalność rolnicza oraz jej uwarunkowania a aspekcie integracji z Unią Europejską*. Wydawnictwo Akademii Podlaskiej, Siedlce.
41. Szarek S., Kałuża H. (2004): Wpływ intensywności gospodarowania na dochodowość produkcji rolniczej. *Zeszyty naukowe SGGW, Seria Monografie*, Warszawa.
42. Szarek S. (2005): Deficiencies in the law of diminishing returns. Part I *EJPAU, Series Economics*, Volume 8, iss. 3.
43. Szarek S. (2005): Use of concept of hormesis phenomenon to explain the law of diminishing returns. Part II. *EJPAU, Series Economics*, Volume 8, iss. 4.
44. Taylor E. (1947): *Teoria produkcji*. Wydawnictwo Kazimierza Rutkiego, Warszawa – Łódź; s. 184-245.
45. Taylor E. (1957): *Historia rozwoju ekonomiki*. PWN Poznań; s. 54-155.
46. Terelak H., Motowicka-Terelak T., Stuczyński T. Pietruch C. (2000): Pierwiastki śladowe (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) w glebach użytków rolnych Polski. *Biblioteka Monitoringu Środowiska*, Warszawa.
47. Thimann K.V. and Bonner W.D. Jr. (1949): Experiments on the growth and inhibition of isolated plant. Part II: The action of several enzyme inhibitors on the growth of the *Avena coleoptile* and on *Pisum internodes*. *J. Exp. Bot.*, 36: 214-221.
48. UNSCEAR (1994): *Sources and Effect of Ionizing Radiation*. United Nations Scientific Committee of Atomic Radiation, New York p. 272.
49. Witek T. (1979): Wpływ jakości gleby na plonowanie roślin uprawnych. *Zeszyty Problemowe PNR z. 224*, s. 35-43.

50. Woś A. (2005): Społeczne funkcje rolnictwa i nowa równowaga. Zagadnienia Ekonomiki Rolnej nr 1/2005, s. 3-16.
51. Xiong X-T. and Peng Y-H. (2001): Response of pollen germination and tube growth to cadmium with special reference to low concentration exposure. Ecotoxicol. Degree, Purdue University, Indiana, pp. 73.

STANISŁAW SZAREK

Podlaska Academy
Siedlce

OPPORTUNITIES RESULTING FROM USING HORMETIC EFFECT FOR EXPLAINING THE LAW OF DIMINISHING EFFICIENCY IN AGRICULTURE

Summary

The new aspects of functioning of the law of diminishing efficiency in agriculture have been presented in the elaboration. It has been shown that the law origins in the hormetic effect understood as a positive impact of low dose of substances which used in higher doses serve as growth inhibitors. It has been also shown that making use of this hormetic effect allows to combine problem of maximal increase in economic intensity for growing effectiveness and incomes in farming with protection of natural environment.