



Napromieniowanie żywności – aspekt prawny, handlowy i toksykologiczny

Food irradiation – legal, commercial and toxicological aspects

Marta Buczkowska^{1,A,C-F}, Marzena Jabczyk^{2,B,D}, Michał Górski^{3,B,E}, Jagoda Garbicz^{3,C-D}, Klaudia Trela^{2,B,D}

¹ Zakład Toksykologii i Ochrony Zdrowia w Środowisku Pracy, Katedra Toksykologii i Uzależnień, Wydział Nauk o Zdrowiu w Bytomiu, Śląski Uniwersytet Medyczny, Polska

² Drugie Koło Naukowe przy Zakładzie Toksykologii i Ochrony Zdrowia w Środowisku Pracy, Katedra Toksykologii i Uzależnień, Wydział Nauk o Zdrowiu w Bytomiu, Śląski Uniwersytet Medyczny, Polska

³ Szkoła Doktorska Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w Katowicach, Wydział Nauk o Zdrowiu w Bytomiu, Śląski Uniwersytet Medyczny, Polska

A – Koncepcja i projekt badania, B – Gromadzenie i/lub zestawianie danych, C – Analiza i interpretacja danych, D – Napisanie artykułu, E – Krytyczne zrecenzowanie artykułu, F – Zatwierdzenie ostatecznej wersji artykułu

Buczkowska M, Jabczyk M, Górski M, Garbicz J, Trela K. Napromieniowanie żywności – aspekt prawny, handlowy i toksykologiczny. Med Og Nauk Zdr. 2020; 26(2): 106–117. doi: 10.26444/monz/121994

■ Streszczenie

Wprowadzenie i cel pracy. Napromieniowanie żywności to technika konserwacji żywności, której głównym celem jest przedłużenie przydatności do spożycia artykułów żywnościowych dzięki zastosowaniu promieniowania jonizującego. Technologia napromieniania żywności jest obecnie stosowana na całym świecie. Celem pracy jest omówienie procesu radiacji żywności, przede wszystkim w aspekcie bezpieczeństwa utrwalonych w ten sposób produktów oraz przepisów prawnych regulujących ten proces w Polsce i na świecie.

Skrócony opis stanu wiedzy. Proces napromieniowania żywności podlega licznym regulacjom prawnym, dotyczącym m.in. poziomów stosowanych dawek, celów napromieniowania czy oznakowania napromieniowanych produktów. Obecnie ponad 50 krajów na świecie dopuszcza stosowanie promieniowania jonizującego w stosunku do żywności, w tym 7 krajów Unii Europejskiej łącznie z Polską. Bezpieczeństwo radiacyjnie utrwalonych artykułów spożywczych zostało potwierdzone przez kluczowe organizacje międzynarodowe i krajowe, jednak nie brakuje doniesień na temat jej potencjalnej szkodliwości dla zdrowia, np. w następstwie występowania 2-alkilocyklobutanonów czy wolnych rodników. Wiele osób zwraca również uwagę na możliwość pogorszenia się jakości żywności, zwłaszcza za sprawą zmniejszenia ilości lub utraty niektórych składników odżywczych czy zmiany właściwości fizycznego produktu.

Podsumowanie. Napromieniowanie żywności to w dalszym ciągu dość kontrowersyjna metoda konserwacji. Wydaje się, że zmiany opinii publicznej w tej kwestii można dokonać dzięki lepszemu uświadomieniu przeciętnego konsumenta o potencjalnej roli, jaką napromieniowanie żywności może odgrywać w kontrolowaniu, a nawet eliminowaniu chorób przenoszonych przez żywność czy w ograniczeniu strat finansowych związanych z jej psuciem.

Słowa kluczowe

wolne rodniki, napromieniowanie żywności, 2-alkilocyklobutanony (2-ACBs), leukoencefalomielopatia (LEM)

■ Abstract

Introduction and objective. Food irradiation is a preservation technique, the main purpose of which is to extend shelf life of food products by using ionizing radiation. Today, food irradiation technology is used worldwide. The aim of this study is to discuss the process of food irradiation, especially from the aspect of safety of irradiated products and legal regulations applicable to this process in Poland and worldwide.

Brief description of the state of knowledge. The food irradiation process is subject to numerous legal regulations, including the dose levels used, irradiation purposes, or labelling of irradiated products. Currently, more than 50 countries worldwide allow the use of ionizing radiation in relation to food, 7 in the countries of the European Union, including Poland. The safety of irradiated products has been confirmed by key international and national organizations; however, there are also reports concerning their potential hazardous effect on health, e.g. as a result of the occurrence of 2-alkylcyclobutanones or free radicals. Much attention has been paid to the possibility of deterioration of food quality, especially by reducing the amount or loss of some nutrients, or changing the physical properties of the product.

Conclusions. Irradiation still remains a relatively controversial method of food preservation. It seems that the key to changing this opinion is making the average consumer more aware of the potential role, that food irradiation can play a part in controlling and even eliminating food-borne diseases, or reducing financial losses associated with its spoilage.

Key words

free radicals, food irradiation, 2-alkylcyclobutanones (2-ACBs), leukoencephalomyelopathy (LEM)

Adres do korespondencji: Marta Buczkowska, Zakład Toksykologii i Ochrony Zdrowia w Środowisku Pracy, Katedra Toksykologii i Uzależnień, Wydział Nauk o Zdrowiu w Bytomiu, Śląski Uniwersytet Medyczny, Polska

E-mail: mbuczkowska@sum.edu.pl

Nadesłano: 27.03.2020; zaakceptowano do publikacji: 03.05.2020; publikacja online: 28.05.2020

WPROWADZENIE

Napromieniowanie żywności to technika konserwacji, której głównym celem jest przedłużenie przydatności do spożycia artykułów żywnościowych, dzięki zastosowaniu promieniowania jonizującego. Początki tej techniki sięgają końca XIX wieku, kiedy to zaobserwowano letalne działanie promieni Roentgena w stosunku do bakterii. Od tego czasu podejmowano próby wykorzystania zjawiska jonizacji w konserwacji produktów żywnościowych, m.in. proponując dodawanie do żywności pierwiastków radioaktywnych (Lieber, 1905 rok) [1]. Pomysł ten nie został wykorzystany w produkcji żywności, ale rok później w Wielkiej Brytanii przyznano pierwszy patent w zakresie napromieniowania artykułów spożywczych (ziarna zbóż), który zakładał zastosowanie promieniotwórczych izotopów radu jako zewnętrznego źródła promieniowania jonizującego (Appleby i Banks, 1906 rok) [1]. W kolejnych latach zatwierdzono jeszcze kilka patentów bazujących na biobójczym działaniu promieniowania jonizującego, np. w odniesieniu do *Trichinella spiralis* w wieprzowinie (USA, 1921 rok) [1] czy w celu uzyskania żywności w puszkach o długim terminie przydatności do spożycia (Francja, 1930 rok) [1]. Jednak ograniczenia w dostępności źródeł promieniowania jonizującego i ich wysoka cena nie pozwalały na pełne poznanie i wykorzystanie techniki napromieniowania [1, 2]. Dopiero stworzenie broni atomowej, a następnie reaktorów atomowych, doprowadziło do pojawienia się znacznej ilości materiałów radioaktywnych, a wraz z nimi nowych źródeł promieniowania [1, 3]. Punktem zwrotnym dla napromieniowania żywności było rozpoczęcie w 1953 roku programu Eisenhowera pod nazwą „Atomy dla pokoju” („Atoms for Peace”), który miał na celu zachęcić amerykańskie i międzynarodowe instytucje naukowe do rozszerzania badań nad promieniowaniem poza zastosowania wojskowe. Konsekwencją tego było pierwsze komercyjne napromieniowanie żywności (przypraw) przy użyciu akceleratora elektronów w Niemczech w 1958 roku. W tym samym czasie armia amerykańska prowadziła badania nad radiacyjnym utrwalaniem produktów mięsnych, z kolei w Kanadzie izotopy kobaltu były wykorzystywane do hamowania kiełkowania ziemniaków. Ponadto zaobserwowano, że łączenie napromieniowania z innymi metodami obróbki żywności, głównie z działaniem niskiej i umiarkowanej wysokiej temperatury, może mieć korzystny wpływ na trwałość produktu końcowego – opatentowano napromienianie uprzednio zamrożonych żabich udek i podgrzanego jedzenia szpitalnego [1, 4].

Programy badawcze związane z zastosowaniem i bezpieczeństwem żywności poddawanej radiacji były prowadzone w wielu krajach, w tym w Polsce, jednak problemem pozostawał aspekt prawny związany z napromieniowaniem produktów. Przełomem okazał się rok 1970, kiedy to grupa 24 krajów utworzyła Międzynarodowy Projekt Żywności Napromieniowanej (IFIP, ang. International Project in the Field of Food Irradiation), finansowany i koordynowany przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (IAEA, ang. International Atomic Energy Agency), Organizację Narodów Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (FAO, ang. Food and Agriculture Organization of the United Nations) i Światową Organizację Zdrowia (WHO, ang. World Health Organization). Celem programu było sprawdzenie jakości żywienia i zdrowotnej oraz bezpieczeństwa mikrobiologicznego napromieniowanej żywności. Ostatecznie w 1981

roku Komitet Ekspertów FAO/IAEA/WHO ds. napromieniowania żywności (JECFI, ang. Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee on the Wholesomeness of Irradiated Food) na podstawie przeprowadzonych badań naukowych wydał zalecenia, przestrzegane do dnia dzisiejszego. Stwierdzono, że napromieniowanie dowolnego produktu spożywczego średnią dawką promieniowania jonizującego < 10 kGy: 1) nie stwarza zagrożenia toksykologicznego, w związku z tym testowanie żywności poddanej takiej obróbce nie jest już konieczne oraz 2) nie wprowadza zmian w składnikach odżywczych i nie stwarza problemów mikrobiologicznych [5].

Obecnie technologia napromieniowania żywności jest stosowana na całym świecie. Zakłada się, że rynek napromieniowanych surowców i produktów żywnościowych może osiągnąć wartość 4,8 mld USD do końca 2020 roku i nawet 10,9 mld USD do roku 2030 [6].

Celem niniejszej pracy jest omówienie procesu napromieniowania żywności, przede wszystkim w aspekcie bezpieczeństwa radiacyjnie utrwalonych produktów oraz regulacji prawnych obowiązujących dla tego procesu w Polsce i na świecie.

OPIS STANU WIEDZY

Podstawy procesu napromieniowania żywności

Możliwość wykorzystania promieniowania jonizującego w konserwacji artykułów spożywczych związana jest z jego bezpośrednim i pośrednim działaniem na składniki produktu. Bezpośrednie działanie promieniowania wynika z jego zdolności do przekazywania energii wysokoenergetycznych cząstek lub fotonów do układu elektronowego chemicznych składników komórek, co skutkuje ich jonizacją lub wzbudzeniem. Natomiast pośrednie działanie obejmuje wszelkie interakcje, w jakie wchodzi zjonizowane lub wzbudzone cząstki.

Kluczową rolę w pośrednim mechanizmie odgrywają najczęściej wolne rodniki, powstające w wyniku rozpadu (radiolizy) wcześniej zjonizowanych związków chemicznych, głównie wody, ponieważ stanowi ona aż 70% objętości komórki. W przypadku żywności stosowane dawki promieniowania są zwykle na tyle niskie, że dominujący jest mechanizm działania bezpośredniego [7–9].

Skutki działania promieniowania na chemiczne składniki komórek zależą od roli danego składnika w życiu i funkcjonowaniu komórki. Z tego względu największe zagrożenie stanowią uszkodzenia DNA, obejmujące uszkodzenie zasad azotowych, powstawanie wiązań krzyżowych czy pęknięcia: jedno- i – najgroźniejsze – dwuniciowe. Uszkodzenia popromienne, przede wszystkim te będące efektem stosowania wyższych dawek, mogą obejmować również białka i tłuszcze.

Ze względu na ryzyko, jakie niesie stosowanie promieniowania jonizującego w odniesieniu do składników żywności, w przemyśle spożywczym stosuje się najczęściej niskie dawki, nieprzekraczające 10 kGy. Takie poziomy dawek umożliwiają zniszczenie komórek organizmów zanieczyszczających żywność, w tym bakterii, grzybów, pasożytów itp. W efekcie uszkodzeń możemy obserwować przejściowe i trwałe zmiany czynnościowe i morfologiczne komórek, natomiast gdy uszkodzenia są poważne, dochodzi do śmierci komórek na drodze apoptozy czy też nekrozy. Dzięki obniżeniu poziomu zanieczyszczeń biologicznych możliwe jest wydłużenie okresu przydatności do spożycia napromieniowanej żywności,

Tabela 1. Wartości dawek promieniowania jonizującego stosowanych w stosunku do różnych organizmów

Organizmy	Dawka promieniowania [kGy]
Formy wegetatywne	0,03–1,0 (D₁₀)
<i>Bacillus cereus</i>	0,17
<i>Escherichia coli</i> (w tym O157:H7)	0,28–0,44
<i>Lactobacillus</i> spp.	0,3–0,9
<i>Listeria monocytogenes</i>	0,27–1,0
<i>Salmonella</i> spp.	0,3–0,8
<i>Streptococcus faecalis</i>	0,65–1,0
<i>Staphylococcus aureus</i>	0,26–0,6
<i>Yersinia enterocolitica</i>	0,04–0,21
Formy przetrwalnikowe	1,0–3,6 (D₁₀)
<i>Clostridium botulinum</i> typ A i B	1,0–3,6
<i>Clostridium botulinum</i> typ E	1,25–1,4
<i>Clostridium sporogenes</i>	1,5–2,2
Wirusy	2,4–6,8 (D₁₀)
Rotawirusy	2,4
Wirus Coxsackie	6,8
Grzyby pleśniowe i drożdżaki	0,32–8,0 (D₁₀)
<i>Penicillium expansum</i>	0,32
<i>Candida zeylanoides</i>	0,68
<i>Fusarium culmorum</i>	8,0
Pasożyty	0,15–0,7 (dawka zapobiegawcza)
<i>Trichinella spiralis</i>	0,15–0,7
<i>Toxoplasma gondii</i>	0,3–0,7
Insekty	0,165–0,23 (dawka letalna)
<i>Bactrocera cucurbitae</i>	0,21
<i>Ceratitis capitata</i>	0,225
<i>Cylas formicarius elegantulus</i>	0,165

Źródło: [8, 10, zmodyfikowane przez Autorów].

przy jednoczesnym braku lub niewielkim wpływie promieniowania na składniki odżywcze produktu [7–9].

Ze względu na różnice gatunkowe we wrażliwości na promieniowanie, wynikające m.in. z różnic w budowie czy zdolności regeneracyjnych poszczególnych organizmów, podczas konserwacji żywności stosuje się różne dawki promieniowania jonizującego. Wyznacznikiem skuteczności procesu napromieniowania dla mikroorganizmów jest dobranie dawki zapewniającej 10-krotną redukcję populacji (D₁₀). Wśród mikroorganizmów najbardziej wrażliwe na działanie promieniowania są formy wegetatywne bakterii Gram-ujemnych, następnie Gram-dodatnich. Zdecydowanie większa oporność cechuje grzyby pleśniowe i drożdże, a także wirusy i formy przetrwalnikowe bakterii. Wraz z rozwojem ewolucyjnym zwiększała się wrażliwość organizmów na promieniowanie jonizujące, dlatego w przypadku organizmów wyższych, np. pasożytów czy owadów, stosuje się niższe dawki, zwykle zapewniające całkowity efekt letalny, a nie tylko ograniczenie wzrostu (tab. 1). Należy również pamiętać, że dawka promieniowania wymagana do inaktywacji organizmów zależy od ich wyjściowej koncentracji w produkcie – im większy stopień skażenia biologicznego, tym większą dawkę należy zastosować. Ponadto wpływ na skuteczność jonizacji mają czynniki zewnętrzne, takie jak skład i stan (świeży/mrożony) produktu, zawartość wody, dostęp tlenu czy temperatura otoczenia [10].

Dawki promieniowania powszechnie stosowane w ramach radiacyjnego utrwalania żywności zostały podzielone na 3 grupy: dawki niskie (< 1 kGy), dawki średnie (1–10 kGy) oraz dawki wysokie (> 10 kGy). Dobierając dawkę promieniowania, należy pamiętać o tym, aby podczas uzyskiwania odpowiedniej jakości mikrobiologicznej produktu nie wywołać w nim niepożądanych przemian biochemicznych.

W przemyśle spożywczym najrzadziej wykorzystuje się dawki wysokie, które zasadniczo prowadzą do sterylizacji produktu, pozbawiając go większości witamin i składników odżywczych. Najbezpieczniejsze są dawki niskie, ponieważ jak wykazały badania, nie wpływają one na pogarszanie wartości odżywczej i jakości sensorycznej utrwalanej żywności oraz nie inicjują powstawania związków toksycznych. Warto jednak podkreślić, że w przypadku napromieniowywania niskimi czy średnimi dawkami żywność w dalszym ciągu jest podatna na psucie, ponieważ nie dochodzi w niej do całkowitej eliminacji mikroflory, a także do denaturacji białek enzymatycznych, dlatego nadal mogą zachodzić reakcje prowadzące do zmiany barwy, zapachu czy tekstury [2, 8, 11].

W zależności od stosowanych dawek promieniowania i założonego celu wśród metod napromieniowywania żywności wyróżnia się 3 procesy: raduryzację, radycydację oraz radapteryzację (tab. 2) [2, 9, 11].

Tabela 2. Charakterystyka metod radiacyjnego utrwalania żywności

Proces	Cel	Dawka (kGy)
	– hamowanie naturalnych procesów kiełkowania (np. cebula, ziemniaki) – przedłużenie okresu dojrzewania (np. owoce, warzywa)	
Raduryzacja	– niszczenie insektów zbożowych – niszczenie pasożytów chorobotwórczych w surowcach i produktach spożywczych (np. eliminacja <i>Trichinella spiralis</i> w wieprzowinie)	< 1
Radycydacja	– niszczenie mikroorganizmów patogennych (np. <i>Salmonella</i> , <i>Campylobacter</i> , <i>Yersinia</i> , <i>Escherichia coli</i> O157:H7, <i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Shigella</i>) w mięsie, drobiu i rybach – ograniczenie rozwoju pleśni (np. na truskawkach czy innych owocach)	1–10
Radapteryzacja	– higienizacji przypraw – wyjaławiania żywności dla osób z upośledzoną odpornością (np. pacjenci po przeszczepach szpiku kostnego) – tzw. żywność <i>shelf-stable</i> (np. dla żołnierzy oraz astronautów) – całkowite zniszczenie mikroflory wegetatywnej oraz przetrwalnikowej (np. niszczenie przetrwalników <i>Clostridium botulinum</i>)	> 10

Źródło: [2, 9].

Regulacje prawne w zakresie napromieniowywania żywności

Podstawą prawną do wyznaczenia międzynarodowych regulacji w zakresie napromieniania żywności są przyjęte w 1983 roku przez Komisję Kodeksu Żywnościowego (CAC, ang. Codex Alimentarius Commission) a następnie skorygowane w 2003 roku, Ogólne Standardy dla Napromienienia Żywności (ang. *General Standard for Irradiated Food*) oraz Międzynarodowe Zasady Eksploatacji Urządzeń Radiacyjnych Stosowanych do Napromieniania Żywności (ang. International Code of Practice for Operation Facilities Used for Treatment of Foods). Określają one dopuszczalne źródła promieniowania stosowane podczas radiacyjnego utrwalania żywności, a także opisują ogólne praktyki dotyczące higieny i kontroli tego procesu oraz stawianych wymagań technologicznych. Na podstawie wytycznych CAC w procesie radiacyjnego utrwalania żywności można wykorzystywać 3 rodzaje promieniowania jonizującego pochodzące z określonych źródeł:

- promieniowanie γ emitowane przez radionuklidy Cs-137 i Co-60,
- promieniowanie X wytwarzane przez urządzenia obsługiwane na poziomie energii nominalnej nieprzekraczającej 5 MeV,
- elektrony wytwarzane przez urządzenia obsługiwane na poziomie energii nominalnej nieprzekraczającej 10 MeV.

Ponadto, zgodnie z wytycznymi, pochłonięta dawka promieniowania nie powinna stanowić zagrożenia dla bezpieczeństwa konsumenta, obniżać wartości zdrowotnej produktu lub niekorzystnie wpływać na integralność strukturalną, właściwości funkcjonalne czy atrybuty sensoryczne żywności. W 1999 roku grupa ekspertów z FAO, IAEA i WHO rekomendowała, że nie ma potrzeby ustalania górnego poziomu dawki promieniowania, twierdząc, że żywność napromieniowana nawet wysokimi dawkami jest bezpieczna, a jedyne ograniczenia mogą wynikać z obniżonych właściwości smakowych produktu. Ostatecznie CAC w 2003 roku uznała, że sumaryczna dawka promieniowania jonizującego pochłonięta przez środki spożywcze nie powinna przekraczać 10 kGy, chyba że jest to konieczne do osiągnięcia uzasadnionego celu technologicznego. Warto więc zauważyć, że regulacje prawne definitywnie nie odrzuciły możliwości stosowania wysokich dawek, a jedynie wprowadziły w tym zakresie pewne ograniczenia [2, 4].

W odniesieniu do napromieniowania żywności na terenie Unii Europejskiej obowiązują dwie dyrektywy z dnia 22 lutego 1999 roku: Dyrektywa 1999/2/WE w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich dotyczących środków spożywczych oraz składników środków spożywczych poddanych działaniu promieniowania jonizującego i Dyrektywa 1999/3/WE w sprawie ustanowienia wspólnotowego wykazu środków spożywczych oraz składników środków spożywczych poddanych działaniu promieniowania jonizującego [12, 13]. Dyrektywa 1999/2/WE jest podstawowym aktem prawnym regulującym napromieniowanie żywności, bazującym na wytycznych CAC. W załączniku I niniejszej dyrektywy wyszczególniono warunki i cele napromieniowania żywności. Zgodnie z nimi promieniowanie jonizujące może być zastosowane w produkcji żywności w 4 określonych celach: (1) zmniejszenia liczby przypadków chorób wynikających ze spożycia skażonej żywności przez niszczenie organizmów patogennych; (2) zapobiegania psuciu się żywności na skutek opóźnienia/powstrzymania procesów rozkładu i poprzez niszczenie organizmów odpowiedzialnych za te procesy; (3) przedłużenia okresu przydatności do spożycia przez hamowanie naturalnych procesów biologicznych związanych z dojrzewaniem /kielkowaniem; (4) usunięcia organizmów szkodliwych dla zdrowia roślin i dla żywności pochodzenia roślinnego. Ponadto technika napromieniowania żywności powinna być: bezpieczna i korzystna dla konsumenta, uzasadniona technologicznie, a także nie może zastępować praktyk higienicznych lub zdrowotnych, czyli nie może być stosowana w celu ukrycia defektów żywnościowych, np. rozpoczętego procesu psucia żywności. Należy również pamiętać, że żywność, która ma być poddana działaniu promieniowania jonizującego, nie może zawierać związków chemicznych służących do konserwacji czy stabilizacji. Niestety przepisy nie uwzględniają już sytuacji, gdy takie substancje będą dodawane po zakończonej radiacji [12].

Natomiast Dyrektywa 1999/3/WE zawiera wykaz produktów żywnościowych, które można poddawać

napromieniowaniu i wprowadzać do obrotu handlowego na terenie Unii Europejskiej. Wykaz obejmuje tylko jedną kategorię środków spożywczych. Są to: suszone aromatyczne zioła, przyprawy korzenne i przyprawy warzywne, które mogą być napromieniowane dawką nieprzekraczającą 10 kGy. Zgodnie z ustawodawstwem europejskim, kraje członkowskie mogą poddawać procesowi napromieniania inne artykuły żywnościowe, które w chwili wejścia w życie dyrektywy posiadały zezwolenie Komitetu Naukowego WE ds. Żywności (SCF, ang. The EC's Scientific Committee on Food; obecnie zastąpiony przez Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności) oraz pod warunkiem, że nie będą one przeznaczone na eksport do innych krajów Unii Europejskiej [12, 13]. Obecnie tylko 7 państw członkowskich UE (tj. Belgia, Republika Czeska, Francja, Włochy, Holandia, Polska i Wielka Brytania) zezwoliło na napromieniowanie dodatkowych produktów (tab. 3) [14].

Na całym świecie lista artykułów spożywczych dopuszczonych do napromieniowania jest zróżnicowana. W Stanach Zjednoczonych Agencja Żywności i Leków (FDA, ang. Food and Drug Administration) zatwierdziła stosowanie radiacji w odniesieniu do: wołowiny, wieprzowiny, skorupiaków, świeżych owoców i warzyw, sałaty i szpinaku, drobiu, kiełków, jaj w skorupkach, mięczaków (w tym ostrygi, małże, przegrzebki), przypraw [15]. Z kolei zgodnie z rekomendacjami WHO, opracowanymi we współpracy z FAO, działaniu promieniowania jonizującego mogą być poddawane: kurczaki, ziarno kakaowe, suszone daktyle, mango, papaja, ziemniaki, cebula, jadalne nasiona roślin strączkowych, ryż, przyprawy, surowe truskawki, surowe ryby i przetwory rybne oraz zboża [16].

Żywność lub jej składniki mogą być poddawane działaniu promieniowania jonizującego wyłącznie w zatwierdzonych jednostkach, które spełniają wymagania CAC, opublikowane jako Międzynarodowe Zasady Eksploatacji Urządzeń Radiacyjnych Stosowanych do Napromieniowania Żywności. Zgodnie z art. 7 ust. 1 Dyrektywy 1999/2/WE jednostki działające na terenie Unii Europejskiej (UE) muszą być zatwierdzone przez odpowiednie organy państwa, w którym się znajdują. Ponadto kraje członkowskie są zobowiązane do przekazywania do Komisji Europejskiej wykazu wszystkich zatwierdzonych jednostek (art. 7 ust. 3 Dyrektywy 1999/2/WE). Wykaz jednostek uprawnionych do napromieniowania żywności w państwach unijnych i w tzw. państwach trzecich (państwa nienależące do UE) jest publikowany w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej [12]. Obecnie na terenie UE istnieje 25 jednostek, w których można przeprowadzać radiacyjne utrwalanie żywności (tab. 4) [17]. Dodatkowo na podstawie Decyzji Komisji z dnia 23 października 2002 roku (z późniejszymi zmianami), dopuszcza się do obrotu handlowego napromieniowane produkty spożywcze, otrzymane w 9 jednostkach zlokalizowanych w państwach trzecich (tab. 4) [18]. Do obowiązków zatwierdzonych jednostek prowadzących radiacyjne utrwalanie żywności należy przekazywanie do organów unijnych informacji o wydanych zgodach na napromieniowanie oraz o wynikach kontroli wprowadzanych do obrotu handlowego napromieniowanych produktów [12].

Ważnym aspektem postępowania z napromieniowanymi produktami spożywczymi jest ich etykietowanie, rekomendowane przez CAC. Wymagania UE w zakresie oznakowania radiacyjnie utrwalonej żywności zostały opisane w art. 6 Dyrektywy 1999/2/WE. Dopuszczalnym sposobem oznaczenia takich produktów jest użycie dwóch określeń:

Tabela 3. Kategorie środków spożywczych poddawanych napromieniowaniu w różnych krajach UE

Kraj	Kategorie środków spożywczych	Maksymalna dawka (kGy)	Kraj	Kategorie środków spożywczych	Maksymalna dawka (kGy)	
UE	Suszone aromatyczne zioła, przyprawy korzenne i przyprawy warzywne	10	UE	Głęboko mrożone zioła aromatyczne; Płatki i zarodki zbóż do przetworów mlecznych; Sucha krew, osocze, koagulanty	10	
	Głęboko mrożone zioła aromatyczne; Płatki i zarodki zbóż do przetworów mlecznych; Sucha krew, osocze, koagulanty	10		Kazeiny, kazeiniany	6	
	Drób (ptactwo domowe, gęsi, kaczki, perliczki, gołębie, przepiórki i indyki)	7		Drób; Mięso drobiowe odzyskane w sposób mechaniczny; Podroby drobiowe; Mrożone żabie udka; Krewetki mrożone obrane lub bez głów	5	
	Kazeiny, kazeiniany	6		Mąka ryżowa	4	
Belgia	Drób; Mięso drobiowe odzyskane w sposób mechaniczny; Podroby drobiowe; Mrożone żabie udka; Krewetki mrożone obrane lub bez głów	5	Francja	Guma arabska; Białko jaja	3	
	Mąka ryżowa	4		Suszone warzywa i owoce	1	
	Guma arabska; Ryby i bezkręgowce wodne (w tym węgorze, skorupiaki i mięczaki); Białko jaja	3		Cebula; Czosnek; Szalotka	0,075	
	Owoce, włącznie z grzybami, pomidorami i rabarborem; Truskawki i poziomki	2		Holandia	Mięso z kurcząt	7
	Warzywa, włącznie z nasionami roślin strączkowych; Suszone warzywa i owoce; Zboża	1			Mrożone żabie udka	5
	Ziemniaki; Cebula; Czosnek; Szalotka	0,15			Guma arabska; Krewetki; Białko jaja	3
					Nasiona roślin strączkowych; Suszone warzywa i owoce; Płatki zbożowe	1
Republika Czeska	Głęboko mrożone zioła aromatyczne; Płatki i zarodki zbóż do przetworów mlecznych; Sucha krew, osocze, koagulanty	10	Polska	Owoce, włącznie z grzybami, pomidorami i rabarborem (jedynie pieczarki, w tym pieczarki suszone)	1	
	Mięso z kurcząt; Drób (ptactwo domowe, gęsi, kaczki, perliczki, gołębie, przepiórki i indyki)	7		Czosnek	0,15	
	Kazeiny, kazeiniany	6		Ziemniaki	0,1	
	Drób; Mięso drobiowe odzyskane w sposób mechaniczny; Podroby drobiowe; Mrożone żabie udka; Krewetki mrożone obrane lub bez głów	5		Cebula	0,06	
	Mąka ryżowa	4		Wielka Brytania	Drób (ptactwo domowe, gęsi, kaczki, perliczki, gołębie, przepiórki i indyki)	7
Guma arabska; Ryby i bezkręgowce wodne (w tym węgorze, skorupiaki i mięczaki); Białko jaja	3	Ryby i bezkręgowce wodne (w tym węgorze, skorupiaki i mięczaki)	3			
Owoce, włącznie z grzybami, pomidorami i rabarborem; Truskawki i poziomki	2	Owoce, włącznie z grzybami, pomidorami i rabarborem	2			
Warzywa, włącznie z nasionami roślin strączkowych; Nasiona roślin strączkowych; Suszone warzywa i owoce; Płatki zbożowe; Zboża	1	Warzywa, włącznie z nasionami roślin strączkowych; Suszone warzywa i owoce	1			
Republika Czeska	Pochrzyn; Ziemniaki; Cebula; Czosnek; Szalotka	0,2	Włochy	Ziemniaki; Cebula; Czosnek	0,15	

Źródło: [15].

Tabela 4. Zatwierdzone jednostki prowadzące napromieniowanie żywności w UE i w krajach trzecich

Kraj	Zatwierdzone jednostki prowadzące napromieniowanie żywności	
	Źródło promieniowania	Liczba
UE	25 jednostek	
Belgia	promieniowanie γ ^{60}Co	1
Bułgaria	promieniowanie γ ^{60}Co	2
Chorwacja	promieniowanie γ ^{60}Co	1
Estonia	promieniowanie γ ^{60}Co	1
Francja	promieniowanie γ ^{60}Co	4
	napromienianie przyspieszonymi elektronami	1
Hiszpania	promieniowanie γ ^{60}Co	1
	napromienianie przyspieszonymi elektronami	1
Holandia	promieniowanie γ ^{60}Co	2
Niemcy	promieniowanie γ ^{60}Co	3
	napromienianie przyspieszonymi elektronami	2
Polska	napromienianie przyspieszonymi elektronami	1
Republika Czeska	promieniowanie γ ^{60}Co	1
Rumunia	promieniowanie γ ^{60}Co	1
Węgry	promieniowanie γ ^{60}Co	1
Wielka Brytania	promieniowanie γ ^{60}Co	1
Włochy	promieniowanie γ ^{60}Co	1
Kraje trzecie	9 jednostek	
Indie	3 jednostki	
Republika Południowej Afryki	3 jednostki	
Szwajcaria	1 jednostka	
Tajlandia	2 jednostki	

Źródło: [18, 19].

„napromieniowane” lub „poddane promieniowaniu jonizującemu”, które powinny być umieszczone na etykiecie lub opakowaniu, a także na dokumentach towarzyszących środkom spożywczym poddanym napromieniowaniu lub zawierającym napromieniowane składniki (wraz ze wskazaniem konkretnych składników poddanych radiacji). Przepisy unijne nie określają innych sposobów oznakowania radiacyjnie utraconej żywności, ale CAC rekomenduje umieszczenie na takich produktach międzynarodowego symbolu żywności napromieniowanej, tzw. znaku Radura (ryc. 1). W efekcie na terenie UE stosowanie tego oznaczenia jest dopuszczalne, ale pod warunkiem umieszczenia na etykiecie ww. określeń [12]. W pozostałych krajach na świecie przepisy dotyczące oznakowania i etykietowania napromieniowanej żywności są zróżnicowane. Kraje takie jak Australia czy Nowa Zelandia podobnie jak UE wymagają, aby każdy produkt spożywczy utracony radiacyjnie został pisemnie oznakowany (użycie znaku Radura jest dobrowolne), nawet jeśli tylko część produktu miała kontakt z promieniowaniem jonizującym. Przepisy te dotyczą również restauracji i lokali gastronomicznych, wykorzystujących napromieniowane produkty. W USA wymagane jest, aby na etykiecie widniał symbol Radura oraz zwrot „poddane działaniu promieniowania” lub „poddane napromieniowaniu”. Jeśli jednak napromieniowane składniki zostaną dodane do żywności, która w całości nie została napromieniowana, wówczas nie jest wymagane specjalne etykietowanie na opakowaniach

**Rycina 1.** Znak Radura (międzynarodowy symbol żywności napromieniowanej) [16]

detalicznych. Z kolei w Kanadzie i Malesji obowiązek znakowania napromieniowanej żywności uzależniony jest od udziału procentowego składników poddawanych radiacji – nie jest ono wymagane, jeśli napromieniowany składnik stanowi odpowiednio mniej niż 5% (Kanada) i 10% (Malesja) masy całego produktu [4].

W Polsce obowiązują dwa główne akty prawne regulujące warunki napromieniowania żywności: Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 roku o bezpieczeństwie żywności i żywienia oraz Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 20 czerwca 2007 roku w sprawie napromieniania żywności promieniowaniem jonizującym. Oba dokumenty wdrażają postanowienia unijnych dyrektyw (1999/2/WE i 1999/3/WE), doprecyzowując zawarte w nich zapisy. W rozdziale 5 Ustawy znajdują się ogólne wymagania i procedury w zakresie napromieniowania środków spożywczych, a w szczególności informacje o podmiocie odpowiedzialnym za nadzór nad napromieniowaniem żywności, którym w Polsce jest Główny Inspektor Sanitarny (art. 20 ust. 1). Natomiast Rozporządzenie Ministra Zdrowia stanowi bardziej szczegółowy dokument, odnoszący się do radiacyjnego utrwalania żywności, zwłaszcza w zakresie warunków napromieniowania, w tym procedur pomiarowych czy wymagań dla urządzeń. Na szczególną uwagę w Rozporządzeniu zasługuje § 10 ust. 1, zgodnie z którym średnia sumaryczna dawka promieniowania jonizującego, pochłonięta przez środki spożywcze nie może przekraczać 10 kGy, co oznacza, że – w odróżnieniu od rekomendacji WHO i FAO (zapis o dawce, która nie powinna przekraczać 10 kGy) – stosowanie dawek wyższych niż 10 kGy jest zabronione. Dodatkowo Rozporządzenie zawiera wykaz środków spożywczych, które mogą być poddawane radiacji (załącznik nr 1), wraz z celami i dopuszczalnymi dawkami. Aktualnie w Polsce dopuszcza się radiacyjne utrwalanie: ziemniaków (hamowanie kiełkowania; dawka: 0,025–0,1 kGy), cebuli (hamowanie kiełkowania; dawka: < 0,06 kGy), czosnku (hamowanie kiełkowania; dawka: 0,03–0,15 kGy), pieczarek świeżych (zahamowanie wzrostu i starzenia, dawka: 1,0 kGy), pieczarek suszonych i suszonych warzyw (obniżenie poziomu zanieczyszczeń biologicznych; dawka: 1,0 kGy), a także zgodnie z przepisami UE – suchych przypraw (obniżenie poziomu zanieczyszczeń biologicznych; dawka: 10 kGy) [19, 20]. Napromieniowanie żywności w naszym kraju jest możliwe tylko w jednej zatwierdzonej jednostce – Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie, który posiada zgodę na radiację wszystkich ww. produktów [17].

Rynek żywności napromieniowanej w Europie i na świecie

Rynek żywności utrwalonej radiacyjnie jest bardzo zróżnicowany w skali całego świata. Według Institute of Food Science & Technology (IFST) ponad 50 krajów na całym świecie używało zgodę na napromieniowanie ponad 60 produktów [4].

Niewątpliwie największy udział w światowym rynku żywności napromieniowanej mają kraje azjatyckie, przede wszystkim Chiny. W tym państwie ilość artykułów spożywczych poddawanych radiacji zwiększa się każdego roku o ok. 20%. Szacuje się, że w 2015 roku w samych Chinach radiacyjnie utrwalaniu poddano ok. 600 tys. ton żywności, z czego największą stanowiły takie produkty jak: czosnek, przyprawy, zboża, gotowane mięso, kurze łapki czy zioła. Proces napromieniowania odgrywa również istotną rolę w krajach takich jak: Wietnam (ok. 66 tys. ton napromieniowanej żywności w 2010 roku, w tym głównie mrożone owoce morza i świeże owoce, np. smocze owoce, liczi, winogrona), Indonezja (ok. 6,9 tys. ton napromieniowanej żywności w 2010 roku, w tym głównie kakao, mrożone owoce morza, przyprawy) czy Japonia (ok. 5,7 tys. ton napromieniowanej żywności w 2015 roku, przy czym całość stanowiły ziemniaki). Należy zaznaczyć, że pozostałe kraje azjatyckie, w tym: Indie, Korea, Malezja, Pakistan, Filipiny czy Tajlandia, również zalegalizowały konserwowanie żywności za pomocą promieniowania jonizującego, jednak ilość napromieniowanych artykułów jest tam znacznie mniejsza. Ponadto kraje azjatyckie wykorzystują radiację głównie w odniesieniu do produktów eksportowanych, ze względu na duże zagrożenie fitosanitarne związane z transportem transgranicznym.

W obu Amerykach najczęściej napromieniowanych produktów wprowadzanych jest do obrotu handlowego i spożywanych w USA, przy czym zdecydowaną większość stanowią produkty importowane. W 2015 roku zaledwie 125 tys. ton żywności było napromieniowanych w kraju (była to żywność poddana radiacji przede wszystkim przez Gateway America, Gulfport, Mississippi), a prawie 23 mln ton przypało w udziale artykułom importowanym. Wśród krajowych produktów poddanych radiacji w 2015 roku dominowały: przyprawy (68 tys. ton), świeże owoce i warzywa (30 tys. ton) oraz mięso, drób i żywe ostrygi (ok. 12,5 tys. ton), z kolei ok. 10 tys. ton stanowiły inne artykuły spożywcze. Import radiacyjnie utrwalonych produktów do USA odbywa się głównie na podstawie tzw. ramowych umów o równoważności, zgodnie z którymi przywożenie do kraju określonych towarów jest możliwe przy założeniu, że państwo partnerskie zezwoli na eksport podobnych produktów amerykańskich. W 2016 roku podpisaną umowę posiadało 13 krajów: Australia, Dominikana, Gujana, Indie, Laos, Malezja, Meksyk, Pakistan, Peru, Filipiny, RPA, Tajlandia i Wietnam. Ponadto w przypadku USA na szczególną uwagę w zakresie napromieniowania żywności zasługuje jeden ze stanów – Hawaje. Jest to pierwsze miejsce na świecie, w którym rozpoczęto stosowanie promieniowania jonizującego w celach fitosanitarnych, zatwierdzone przez FDA w 1986 roku. W latach 1995–2000 wysłano z Hawajów do kontynentalnych Stanów Zjednoczonych ponad 300 ton papai i 100 ton pozostałych owoców tropikalnych. W 2015 roku na Hawajach najważniejszą rośliną eksportową poddawaną radiacji były słodkie fiołkowe ziemniaki, stanowiące ponad 90% (6,5 tys. ton) wszystkich napromieniowanych hawajskich artykułów spożywczych.

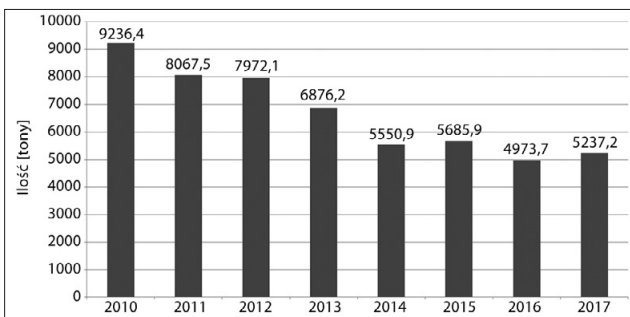
Znaczny udział w ilości produktów, które zostały napromieniowane na kontynentach amerykańskich, ma Meksyk.

Historia napromieniowania żywności w tym kraju sięga 2008 roku, kiedy to procesowi napromieniowania poddawano jedynie guawę w ilości 265 ton. W 2015 roku ilość radiacyjnie utrwalanych produktów zwiększyła się do 11,7 tys. ton, z czego 83% stanowiła guawa, 8,4% papryka chili (*Capsicum pubescens*) i 6,7% mango, a pozostały odsetek przypadł w udziale m.in.: granatom, owocom karambola, smoczom owocom czy figom. Wszystkie te produkty zostały eksportowane do USA.

W Afryce głównym rynkiem dla żywności napromieniowanej jest Republika Południowej Afryki (RPA), gdzie promieniowanie jonizujące zaczęto wykorzystywać w procesie konserwacji żywności już w latach 60. XX wieku. W 2015 roku, według danych Departamentu Zdrowia RPA, ilość napromieniowanych produktów sięgnęła ok. 24 tys. ton, z czego największą stanowiły przyprawy (19 tys. ton) i miód (3,2 tys. ton), a następnie: świeży czosnek, imbir, owoce i warzywa oraz odwodnione i sproszkowane warzywa, suszone owoce, jaja, herbata Rooibos, mięso, owoce morza i orzechy. Warto zauważyć, że RPA jest jedynym krajem, który dopuszcza napromieniowanie importowanego miodu w celu przeciwdziałania chorobie zgnilca złośliwego (AFB, ang. *american foulbrood disease*). W tym przypadku promieniowanie jonizujące umożliwia zniszczenie przetrwalników *Paenibacillus larvae*, bakterii odpowiedzialnych za występowanie AFB u larw pszczoł.

Australia i Nowa Zelandia zezwoliły na napromieniowanie żywności w 1999 roku. W latach 2014–2015 w obrocie handlowym znajdowało się łącznie ok. 2 tys. ton żywności poddanej działaniu promieniowania jonizującego, z czego największą stanowiły owoce mango (1,48 tys. ton), następnie pomidory (430 ton), liczi (34 tony), winogrona stołowe (28 ton) i śliwki (2 tony). Artykuły pochodziły zarówno z produkcji rodzimej (mango, pomidory, liczi), z USA (mango), jak i z krajów azjatyckich (mango, śliwki, winogrona) [21].

W Europie głównym źródłem informacji na temat ilości napromieniowanej żywności są publikowane od wielu lat Sprawozdania Komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady, ostatnie za lata 2016–2017. W podanym okresie na terenie UE napromieniowaniu poddano łącznie 10,211 tys. ton żywności, z czego 5,237 tys. ton w 2017 roku i 4,973 tys. ton w 2016 roku. Porównując dane za 2017 rok z tymi dotyczącymi roku 2010, można zauważyć, że w państwach unijnych ilość radiacyjnie utrwalonej żywności zmniejszyła się o 43,46% (ryc. 2). W latach 2016–2017 najczęściej napromieniowanymi w UE kategoriami żywności były: żabie udka (57%), suszone zioła, przyprawy korzenne i warzywne (20,77%) oraz drób (16%). Ponad 80% produktów poddano procesowi napromieniowania w dwóch krajach: w Belgii (68%) i w Holandii (13%) [22].



Rycina 2. Ilość napromieniowanych produktów spożywczych w zatwierdzonych jednostkach na terenie Unii Europejskiej w latach 2010–2017 [22]

Mimo stale rosnącej ilości produktów poddawanych radiacji rynek żywności napromieniowanej rozwija się powoli, a w niektórych regionach, np. na terenie Unii Europejskiej, wykazuje tendencję spadkową. Przyczyną tego jest często obserwowana niechęć konsumentów do kupowania radiacyjnie utrwalonych artykułów, a kluczem do ich akceptacji wydaje się być odpowiednia edukacja. Badania konsumenckie wyraźnie wykazały, że mając wybór i dostęp do podstawowych, ale rzetelnych informacji o radiacji, konsumenci nie tylko są skłonni kupować napromieniowaną żywność, ale często wolą ją od żywności utrwalonej metodami konwencjonalnymi. Na podstawie analiz przeprowadzonych w USA stwierdzono, że do najważniejszych czynników motywujących konsumentów do zakupu zakonserwowanych metodą radiacji artykułów należą: niszczenie patogenów przenoszonych przez żywność (77%), kontrola rozprzestrzeniania się owadów (64%) i ograniczenie stosowania insektycydów (60%). Z kolei w doświadczeniu przeprowadzonym na University of California zaobserwowano, że zainteresowanie zakupem radiacyjnie utrwalonej żywności wzrosło wśród uczestników z 57 do 82% jedynie po obejrzeniu 10-minutowego filmu na temat napromieniowania żywności [23]. W Europie rzadko prowadzi się badania poświęcone społecznej akceptacji dla napromieniowywania produktów spożywczych. Jedno z niedawno realizowanych badań przeprowadzono na terenie Turcji w 2007 roku. Stwierdzono, że świadomość i wiedza konsumentów na temat radiacji żywności była bardzo niska – tylko 29% ankietowanych znało technikę napromieniowania żywności. Jednocześnie w opinii zaledwie 11% badanych utrwalona w ten sposób żywność jest bezpieczna. Poziomy nastawienie do napromieniowanych produktów znacznie wzrósł (62%) po przedstawieniu zalet tego procesu [24]. Z kolei badania przeprowadzone we Włoszech w 2019 roku wykazały, że 84,2% włoskich respondentów nie zna metody utrwalaania żywności przy użyciu promieniowania jonizującego, ale jednocześnie 89,2% ankietowanych jest zainteresowanych otrzymaniem informacji na ten temat [25]. W Polsce brakuje informacji na temat poziomu akceptacji dla napromieniowanych produktów wśród konsumentów. Poddana radiacji żywność (ziemniaki i cebula) sprzedawała się dobrze w naszym kraju w latach 1987–1988, przy 90% ogólnej akceptacji dla napromieniowanych ziemniaków i 95% dla napromieniowanej cebuli [23]. Jednak badania z 2016 roku wykazały, że tylko 6,6% polskich respondentów uznało radiacyjnie utrwaloną żywność za bezpieczną [26].

Bezpieczeństwo napromieniowanej żywności i jej wartość odżywcza

Rozważając kwestie związane z bezpieczeństwem napromieniowanej żywności, należy przede wszystkim zwrócić uwagę na stanowisko międzynarodowych organizacji i komitetów naukowych związanych ze zdrowiem. Od lat 60. XX wieku przeprowadzono tysiące badań dotyczących radiacyjnie utrwalonych produktów, a ich wyniki zostały przeanalizowane przez ekspertów z zakresu toksykologii, mikrobiologii i żywienia, którzy doszli do wniosku, że poddawanie żywności promieniowaniu jonizującemu nie stanowi żadnego zagrożenia. Podstawą dla międzynarodowej akceptacji napromieniowania żywności była wspomniana we wstępie niniejszej pracy publikacja JECFI z 1981 roku, w której potwierdzono bezpieczeństwo produktów radiacyjnie utrwalonych dawką < 10 kGy. Ponadto podkreślono możliwość stosowania wyższych dawek promieniowania bez

uszczerbku dla zdrowia konsumentów, ale należy się liczyć z negatywnym wpływem radiacji na walory smakowe i zapachowe żywności. Bezpieczeństwo artykułów spożywczych poddanych radiacji zostało również potwierdzone przez kluczowe organizacje międzynarodowe i krajowe, takie jak: Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności (EFSA, ang. European Food Safety Authority), FDA, Urząd ds. Norm Żywnościowych Australii i Nowej Zelandii (FSANZ, ang. Food Standards Australia New Zealand's), Kanadyjski Departament Zdrowia (HC, ang. Health Canada) czy komitety naukowe, w tym: Międzynarodowy Komitet ds. Mikrobiologii i Higieny Żywności (ICFMH, ang. International Committee on Food Microbiology and Hygiene), Amerykańskie Stowarzyszenie Medyczne i organizacje zdrowia publicznego czy Amerykańskie Stowarzyszenie Dietetyczne (ADA, ang. The American Dietetic Association; obecnie The Academy of Nutrition and Dietetics). Ponadto w latach 90. XX wieku JECFI na podstawie danych naukowych stwierdził, że straty składników odżywczych towarzyszące procesowi radiacji są niewielkie, zwłaszcza przy niższych dawkach, a w przypadku tych wysokich mogą być zbliżone do strat będących efektem innych metod konserwacji żywności, np. obróbki wysokotemperaturowej [27].

Obecnie badania nad bezpieczeństwem napromieniowanej żywności koncentrują się na kilku aspektach: (1) indukowaniu radioaktywności napromieniowanego artykułu, (2) powstawaniu związków potencjalnie toksycznych (w tym substancji rakotwórczych czy teratogennych) oraz (3) indukowaniu mutacji w komórkach mikroorganizmów i wynikającym z tego występowaniu mikroorganizmów potencjalnie szkodliwych. Oprócz opisanych powyżej potencjalnych zagrożeń, wiele osób zwraca również uwagę na możliwość pogorszenia jakości żywności, zwłaszcza za sprawą zmniejszenia ilości lub utraty niektórych składników odżywczych czy zmian właściwości fizycznych produktu [7].

Dodatek energii do żywności może zniszczyć jej składniki odżywcze, a zatem promieniowanie jonizujące, którego działanie polega na przekazywaniu energii, również może powodować takie zmiany. Do tego dochodzi pośredni mechanizm działania promieniowania związany z aktywnością wolnych rodników, które także mogą uszkadzać składniki żywności. Intensywność zachodzących w następstwie radiacji zmian zależy od wielu czynników, takich jak: dawka promieniowania, struktura napromieniowanej żywności, sposób jej przetwarzania czy rodzaj opakowania, a także od warunków samego procesu napromieniowania, np. temperatury otoczenia i zawartości tlenu [28]. Warto podkreślić, że większość zmian w składnikach odżywczych towarzyszących procesowi radiacji obserwowano najczęściej podczas stosowania dawek wysokich. Wpływ promieniowania na poszczególne składniki żywności opisano w tab. 5. Rozkład składników żywności pod wpływem promieniowania może negatywnie oddziaływać na walory smakowe i zapachowe produktów. Największy wpływ na właściwości organoleptyczne żywności ma obecność węglowodorów, związków karbonylowych, alkoholi i związków siarki, takich jak merkaptany, które powstają głównie w następstwie degradacji białek i lipidów. W przypadku niższych dawek promieniowania zmiany są niewielkie, a nawet jeśli dochodzi do pogorszenia zapachu czy smaku, to dodatkowa obróbka termiczna pozwala to zniwelować. Ponadto spektrum generowanych podczas napromieniowania zapachów zależy w dużej mierze od składu i rodzaju żywności. Najbardziej wrażliwe na działanie promieniowania

Tabela 5. Wpływ promieniowania jonizującego na poszczególne składniki żywności (*przedstawione informacje dotyczą stosowania dawek od niskich do wysokich w zależności od rodzaju składnika; w badaniach nie przestrzegano warunków zalecanych w celu minimalizacji strat składników odżywczych, takich jak brak dostępu tlenu, temperatura pokojowa*)

Charakterystyka zmian	Literatura
Węglowodany (<i>dane dla dawek wysokich</i>) – mało wrażliwe na działanie promieniowania; może dochodzić do pękania wiązań glikozydowych łączących monosacharydy, co zmniejsza stopień polimeryzacji, a w konsekwencji zmniejsza się lepkość	[29]
Białka (<i>dane dla dawek średnich i wysokich</i>) – stosunkowo niewielkie zmiany, mniejsze niż podczas gotowania; – zerwanie wiązań wodorowych z późniejszym pęcznieniem, agregacją, fragmentacją lub dysocjacją na mniejsze elementy, co prowadzi do utraty pierwotnej funkcji białka; – produkty radiolizy białek mogą wchodzić w interakcje z innymi składnikami; – deaminacja i dekarboksylacja aminokwasów (wg malejącej wrażliwości na promieniowanie: aminokwasy siarkowe > histydyna > fenyloalanina > tyrozyna > tryptofan; najmniej wrażliwe są: prolina i oksyprolina); – produkty rozpadu aminokwasów to najczęściej: amoniak, amin, dwutlenku węgla, kwasy karboksylowe	[6]
Tłuszcze (<i>dane dla dawek średnich i wysokich</i>) – rozpad tłuszczu pod wpływem promieniowania zbliżony do naturalnie występującego jęczenia tłuszczu; – mechanizm: radioliza lipidów na skutek jonizacji, co prowadzi do rozpadu z uwolnieniem węglowodorów, aldehydów i ketonów; w wyniku radiolizy triacylogliceroli powstaje 2-alkilcyklobutanon (2-ACB); – zachodzące procesy: utlenianie, polimeryzacja, dekarboksylacja, odwodnienie kwasów tłuszczowych i lipidów	[7, 30]
Witaminy rozpuszczalne w wodzie (<i>dane dla dawek od niskich do wysokich</i>) – bardziej wrażliwe na działanie promieniowania niż witaminy rozpuszczalne w tłuszczach; – wg malejącej wrażliwości na promieniowanie: witamina B1 (tiamina)* > witamina C* > witamina B6 (pirydoksyna) > witamina B2 (ryboflawina) > witamina B12 (kobalamina) > kwas nikotynowy > kwas foliowy – witamina B1: straty 10–50% przy dawkach 0,6–7,3 kGy; – witamina C: straty 17–26% przy dawkach 2–3 kGy	[28, 29]
Witaminy rozpuszczalne w tłuszczach (<i>dane dla dawek od niskich do wysokich</i>) – wg malejącej wrażliwości na promieniowanie: witamina E* > witamina A* > witamina D > witamina K	[28, 29]

* witaminy najbardziej wrażliwe na działanie promieniowania
Źródło: [6, 7, 28–30].

jest mleko i produkty mleczne, dlatego w ich przypadku proces radiacji jest przeciwwskazany. Drugą grupą produktów szczególnie narażoną na negatywne zmiany organoleptyczne jest mięso i produkty mięsne, w przypadku których stosuje się najczęściej niższe dawki promieniowania. Jeśli zachodzi konieczność użycia dawek średnich i wysokich, rekomenduje się przeprowadzanie napromieniowania w atmosferze pozbawionej tlenu i dostępu światła, a także w niskich temperaturach lub w odniesieniu do produktów zamrożonych. W przypadku takich artykułów jak przyprawy czy liście herbaty napromienianie nie zmienia ich oryginalnych, pożądaných zapachów, a czasami nawet je wzmacnia [7, 28, 30].

W odniesieniu do trzech przedstawionych powyżej aspektów bezpieczeństwa napromieniowanych artykułów spożywczych większość przeprowadzonych badań potwierdza ustalenia JECFI. Po pierwsze, energia promieniowania jonizującego wykorzystywanego do napromieniowania żywności nie przekracza progu dla reakcji jądrowej i w odpowiednich warunkach nie dochodzi do indukowania promieniotwórczości produktu. Po drugie, badania przeprowadzone

na zwierzętach laboratoryjnych nie wykazały toksyczności ostrej ani przewlekłej napromieniowanej paszy, w tym działania rakotwórczego, mutagennego, teratogennego czy genotoksycznego. Po trzecie, radiacja żywności nie powoduje zmian mutacyjnych w materiale genetycznym mikroorganizmów występujących w produktach, w tym nie zwiększa ich zjadliwości [7].

Aktualnie negatywne opinie o żywności napromieniowanej wynikają głównie z zachodzącego w niej zjawiska radiolizy, co może przekładać się na jeden z aspektów bezpieczeństwa tych produktów – powstawanie potencjalnie toksycznych związków. Główne odnotowywane w publikacjach produkty radiolizy to wybrane węglowodory oraz niektóre tenki cholesterolu i furany. Większość tych substancji powstaje również w żywności, która została poddana innej metodzie obróbki, np. konwencjonalnej obróbce cieplnej. Wyjątkiem są 2-alkilcyklobutanony (2-ACBs) [31].

2-ACBs zidentyfikowano w 1972 roku jako produkty radiolizy lipidów obojętnych, ale dopiero w 1993 roku stwierdzono, że są one charakterystyczne dla produktów poddanych działaniu promieniowania [7]. Pod względem chemicznym są to cykliczne ketony. Dokładny mechanizm ich powstawania polega na rozbiciu, pod wpływem promieniowania jonizującego, wiązań między atomem tlenu i grupą acylową w cząsteczce triacylogliceroli. W zależności od rodzaju kwasu tłuszczowego wchodzącego w skład triacyloglicerolu mogą powstawać różne rodzaje tych związków: 2-decylcyklobutanon (z kwasu mirystynowego), 2-dodecylcyklobutanon (2-dDCB) (z kwasu palmitynowego), 2-tetradecylcyklobutanon (2-tDCB) (z kwasu stearynowego), 2-(5'-tetradecenyl)cyklobutanon (2-tDeCB) (z kwasu oleinowego) czy 2-(5',8'-tetradekadienyl)cyklobutanon (2-tD2eCB) (z kwasu linolowego). Unikalność tych związków dla procesu radiacji spowodowała, że są one wykorzystywane w identyfikacji napromieniowanych produktów spożywczych [9, 31]. Jednocześnie obecność 2-ACBs w radiacyjnie utrwalonej żywności wzbudza pewne obawy. W 1998 roku stwierdzono, że 2-dDCB dodawany do hodowli komórek ludzkich i szczurzych w stężeniu 0,30–1,25 mg/ml powodował pęknięcia DNA (przy niższych stężeniach), a w najwyższej dawce miał dodatkowo działanie cytotoksyczne w stosunku do 80% badanych komórek. W latach 2006–2007 opublikowano kilka prac, w których potwierdzono pęknięcia DNA przy traktowaniu komórek 2-ACBs w stężeniu: 3–100 µg/ml, a w przypadku dawek dochodzących do 500 µg/ml stwierdzono nawet występowanie aberracji chromosomowych [32]. Wykazano również, że stopień cytotoksyczności i genotoksyczności 2-ACBs zależy od długości łańcucha kwasu tłuszczowego w cząsteczce (krótszy miał wyższy stopień toksyczności) oraz od jego stopnia nienasylenia (nienasycone kwasy tłuszczowe charakteryzowały się większą toksycznością) [31]. W ostatniej dekadzie stwierdzono, że w żywności napromieniowanej dawkami dochodzącymi nawet do 59 kGy, 2-ACBs powstają w bardzo niskich stężeniach, które nie stanowią zagrożenia dla zdrowia człowieka. Działanie cytotoksyczne i genotoksyczne zostało potwierdzone w tych badaniach, ale jedynie w przypadku wysokich stężeń 2-ACBs, niewystępujących w żywności napromieniowanej dopuszczalnymi dawkami [7, 30]. Warto również podkreślić, że wiele badań nie potwierdziło genotoksyczności 2-ACBs, m.in. badania: Sommersa (2003) [32], Gadgila i Smitha (2004) [32], Sommersa i Schiestla (2004) [32] czy Sommersa i Mackaya (2005) [32]. Obecnie nie ma zgody co do mechanizmu toksycznego działania 2-ACBs.

Doświadczenia *in vitro* i *in vivo* potwierdzają działanie cytotoxyczne 2-ACBs, jednak jest wiele wątpliwości związanych z ich działaniem genotoksycznym. Uważa się, że genotoksyczność, na którą wskazują uszkodzenia DNA obserwowane w teście kometowym, może wynikać z cytotoxyczności wpływającej na uszkodzenia DNA lub ze zniszczenia błony komórkowej i pośredniego oksydacyjnego uszkodzenia DNA [32]. Trudno obecnie określić, na jak duże dawki 2-ACBs możemy być narażeni, ponieważ brakuje danych na temat spożycia napromieniowanych produktów. Jedną z niewielu analiz w tym zakresie przeprowadzili Sommers i wsp. [33]. Stwierdzili oni, że spożycie utrwalonego radiacyjnie mięsa drobiowego wynoszące średnio 62,1 g/dzień (podane przez Health Canada w 2003 roku) [33], może dostarczać: 0,08 µg 2-dDCB + 0,02 µg 2-tDCB + 0,08 µg 2-tDeCB + 0,06 µg 2-tD2eCB /kg mc/dzień, co sprawia, że w tym przypadku całkowite spożycie 2-ACBs wynosi ok. 0,24 µg/kg mc/dzień (przy założeniu, że cały spożywany drób pochodził z napromieniowania oraz przy braku innych napromieniowanych produktów w diecie). Uzyskany wynik można porównać z wartością progową zagrożenia toksykologicznego (TTC, ang. *threshold of toxicological concern*), wynoszącą dla 2-ACBs, 1,5 µg/osoba/dzień. Rzeczywisty poziom 2-ACBs w napromieniowanych produktach spożywczych może być bardzo różnicowany – badania wykazały, że ilość tych związków zależy od zawartości tłuszczu i składu kwasów tłuszczowych w żywności, dawki promieniowania, a nawet temperatury procesu [33]. Większość organizacji naukowych, w tym również EFSA, dostrzega potrzebę przeprowadzenia dokładniejszych badań toksykologicznych i metabolicznych w odniesieniu do 2-ACBs [31].

Szkodliwość radiacyjnie utrwalonej żywności może również wynikać z powstających pod wpływem promieniowania wolnych rodników i ich wpływu na równowagę oksydacyjną. W 2019 roku sprawdzano zmiany zachodzące pod wpływem promieniowania jonizującego (dawki: 1–4 kGy) w schłodzonym mięsie ryb (schłodzone i wypatroszone pstrągi tęczowe, *Salmo irideus*). Ustalono, że w zakonserwowanych radiacyjnie pstrągach wprost proporcjonalnie do wzrostu aplikowanej dawki promieniowania zmniejsza się aktywność antyoksydacyjna, co wynika przede wszystkim z peroksydacji lipidów na skutek powstawania wolnych rodników. Potwierdzeniem tego jest wzrost parametrów peroksydacyjnych: wartości liczby kwasowej (o 50%, porównując wyniki dla 1 i 4 kGy) czy liczby nadtlenkowej dla tłuszczów (o 68,8%, porównując wyniki dla 1 i 4 kGy). W opinii autorów tych badań, zmiany zachodzące pod wpływem promieniowania w strukturze związków wchodzących w skład produktu mogą negatywnie wpływać na zdolność enzymów trawiennych do rozkładu pokarmu. Ilościowe i jakościowe naruszenie struktury chemicznej składników żywności może stać się przyczyną nietolerancji produktów spożywczych, a w konsekwencji reakcji alergicznych organizmu [6]. Należy podkreślić, że wyniki badań dotyczących zmian w aktywności antyoksydacyjnej napromieniowanych produktów są zróżnicowane. Zaobserwowano, że w dużej mierze zależy ona oczywiście od dawki, ale również od rodzaju analizowanego produktu, jego przygotowania do radiacji, a także sposobu jego przechowywania i pakowania po zakończonym procesie. Zmiany oksydacyjne można ograniczyć poprzez zapakowanie napromieniowanych artykułów próżniowo przy użyciu odpowiednich materiałów oraz prowadząc proces w warunkach kriogenicznych [34].

Omawiając aspekt toksykologiczny napromieniowanej żywności, należy zwrócić szczególną uwagę na jedyne do tej pory badania uznawane przez EFSA, potwierdzające szkodliwość diety składającej się z radiacyjnie utrwalonych produktów. Wykazano bowiem, że u kotów karmionych wyłącznie lub głównie karmą poddawaną działaniu wysokich dawek promieniowania może występować leukoencefalomiopatia (LEM, ang. *leukoencephalomyelopathy*). Przed udowodnieniem ww. związku, LEM obserwowano wielokrotnie w populacji kotów w Wielkiej Brytanii, Nowej Zelandii, Australii czy w badaniach laboratoryjnych prowadzonych w Irlandii. Objawem klinicznym choroby jest postępująca ataksja kończyn tylnych, która wydaje się spowodowana zwyrodnieniem Wallera części ośrodkowego układu nerwowego (rdzenia kręgowego i różnych obszarów mózgu). Naukowcy powiązali występowanie LEM z dietą kotów, składającą się głównie z napromieniowanych produktów. W 2009 roku przeprowadzono badania laboratoryjne, które potwierdziły ten związek. Koty spożywające przez 224 dni wyłącznie karmę utrwaloną radiacyjnie wysokimi dawkami promieniowania (38, 21–53, 6 kGy) rozwijały objawy leukoencefalomiopatii między 140. a 174. dniem. Autorzy przeanalizowali również skład produktów podawanych zwierzętom. Stwierdzono, że stężenia nadtlenków w dietach napromieniowanych były 10-krotnie (25,7–38,1 kGy) i 64-krotnie wyższe (38,1–53,6 kGy) niż w dietach nienapromieniowanych. Ponadto stężenie witaminy A było obniżone odpowiednio do 6230 j.m./kg (43%) i 6900 j.m./kg (48%) w porównaniu z początkową zawartością 14 500 j.m./kg. Zmiany w stężeniu nadtlenków mogły spowodować zwiększenie uszkodzeń oksydacyjnych, prawdopodobnie nasilone przez obniżoną zawartość witaminy A. W przeprowadzonych badaniach nie udało się jednak ustalić dokładnego mechanizmu występowania LEM [31].

Żywność utrwalona radiacyjnie ma również wiele zalet, które w większości są zbieżne z uregulowanymi prawnie i wcześniej omówionymi celami napromieniowania. Ta technika konserwacji produktów spożywczych może mieć duży wkład w zmniejszenie ryzyka zdrowotnego dla konsumentów, powodowanego przez patogeny przenoszone przez żywność. Zredukowanie czy wyeliminowanie zanieczyszczeń mikrobiologicznych żywności wiąże się również z obniżeniem poziomu niektórych zanieczyszczeń chemicznych powstających w procesach biologicznych, np. amin biogennych. Spożywanie żywności o wysokim stężeniu tych związków może wywoływać działania niepożądane i skutki toksykologiczne, dlatego ich zawartość w produktach powinna być jak najniższa. W kilku badaniach potwierdzono korzystny wpływ radiacji na poziom 4 kluczowych amin biogennych: histaminy, tyraminy, putrescyny i kadaweryny. W porównaniu z kontrolą, wszystkie napromieniowane próbki (dawka: 10–15 kGy w zależności od aminy) charakteryzowały się bardzo niskim całkowitym poziomem tych amin. Różnice były szczególnie widoczne podczas przechowywania żywności – w radiacyjnie utrwalonych produktach aminy powstawały później i w dużo mniejszym stężeniu [35]. Ponadto dzięki użyciu promieniowania jonizującego możliwy stał się import wielu owoców i warzyw, co dawniej nie było możliwe ze względu na obawę przed szkodnikami występującymi w regionach tropikalnych [30].

Napromieniowanie artykułów spożywczych może mieć również korzystny wpływ na bezpieczeństwo żywności konserwowanej chemicznie. Wykazano, że promieniowanie y

ogranicza proces redukcji azotynów do rakotwórczych N-nitrozoamin w produktach mięsnych. Odnotowano znaczny spadek poziomu pozostałości azotynów i stężenia N-nitrozoamin, zwłaszcza nitrozodimetyloaminy i nitrozopirolidyny, w gotowanych kielbasach wieprzowych uprzednio poddanych działaniu promieniowania w dawce powyżej 10 kGy (dla N-nitrozodimetyloamina > 10 kGy; dla N-nitrozopirolidyny 20–30 kGy), przechowywanych do 4 tygodni w lodówce [31]. Podobne wyniki uzyskano w 2012 roku w przypadku boczku konserwowanego azotynami, zamrożonego w temperaturze -40°C i utrwalonego radiacyjnie dawką 30 kGy – stężenia nitrozoamin były podobne do ich stężeń w boczku wolnym od azotynów [30].

Oddziaływanie promieniowania jonizującego na produkty spożywcze może również zmniejszać ich właściwości alergizujące. Badania wykazały, że w przypadku niektórych alergenów, np. białek mleka czy ekstraktu alergenów z kretetek, napromieniowanie dawką 10 kGy prowadzi do zmian strukturalnych w obrębie epitopów w taki sposób, że nie są one rozpoznawane przez odpowiednie przeciwciała (IgE i IgG), co skutkuje znacznym obniżeniem odpowiedzi immunologicznej. Zależność ta była jednak charakterystyczna dla dawek wynoszących co najmniej 10 kGy, a w przypadku niższych poziomów napromieniowania obserwowano wzrost alergenicności produktu [31].

PODSUMOWANIE

Napromieniowanie żywności to w dalszym ciągu dość kontrowersyjna metoda konserwacji. Mimo kilku wad, które w mniejszym lub większym stopniu dotyczą wszystkich metod utrwalaania żywności, radiacja wydaje się być dobrą alternatywą. Największym problemem jest często obserwowany w wielu krajach brak akceptacji społecznej dla tej techniki. Wydaje się, że zmiany opinii publicznej w tej kwestii można dokonać dzięki lepszemu uświadomieniu przeciętnego konsumenta o potencjalnej roli, jaką napromieniowanie żywności może odgrywać w kontrolowaniu, a nawet eliminowaniu chorób przenoszonych przez żywność czy w ograniczeniu strat finansowych związanych z jej psuciem. Należy pamiętać, że w świetle przeprowadzonych badań naukowych żywność poddana radiacji zgodnie z wytycznymi, przy zastosowaniu odpowiednich poziomów dawek oraz odpowiednio przygotowana, a następnie przechowywana nie stanowi zagrożenia dla konsumenta.

PIŚMIENNICTWO

- Ehlermann DAE. The early history of food irradiation. *Radiat Phys Chem.* 2016; 129: 10–12. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.07.024>
- Migdał W, Gryczka U. Radiacyjna metoda higienizacji i utrwalaania żywności. *Postępy Techniki Jądrowej.* 2013; 59(1): 8–14.
- Yousefi MR, Razadri AM. Irradiation and its potential to food preservation. *Int J Adv Biol Biom Res.* 2015; 3(1): 51–54.
- Roberts PB. Food irradiation: Standards, regulations and world-wide trade. *Radiat Phys Chem.* 2016; 129: 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.06.005>
- Farkas J, Mohácsi-Farkas C. History and future of food irradiation. *Trends Food Sci Technol.* 2011; 22(2–3): 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.002>
- Timakova RT, Tikhonov SL, Tikhonova NV, Shikhalev SV. Determining the dose of radiation and radurisation effects on the antioxidant activity of fish and the thermophysical characteristics of fish muscle tissue. *Foods.* 2019; 8(4): 130–142. <https://doi.org/10.3390/foods8040130>
- Kobayashi Y. Food Irradiation: Radiation-based sterilization, insecticidal, and inhibition of sprouting technologies for foods and agricultural produce. In: Kudo H, eds. *Radiation Applications.* Springer, Singapore; 2018. p. 217–253.
- Farkas J. Irradiation for better foods. *Trends Food Sci Tech.* 2006; 17: 148–152. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.12.003>
- Rachubik J. Wykrywanie markerów utrwalaania żywności promieniowaniem jonizującym. *Med Weter.* 2013; 69(3): 150–156.
- Patterson M. Food Irradiation: Microbiological Safety and Disinfestation. *International Symposium New Frontier of Irradiated Food and Non-Food Products;* 2005 Sept 22–23, KMUTT, Bangkok, Thailand; 2005.
- Jędrzejczyk H, Hoffmann M, Świętochowska E. Metoda radiacyjna w utrwalaaniu żywności. Część I. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego.* 2010; 2: 98–102.
- Dyrektywa 1999/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 22 lutego 1999 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich dotyczących środków spożywczych oraz składników środków spożywczych poddanych działaniu promieniowania jonizującego (Dz.U. L 66 z 13.3.1999, s. 16–23).
- Dyrektywa 1999/3/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 22 lutego 1999 r. w sprawie ustanowienia wspólnotowego wykazu środków spożywczych oraz składników środków spożywczych poddanych działaniu promieniowania jonizującego (L 66/24).
- Wykaz zezwoleń państw członkowskich dotyczących środków spożywczych oraz składników środków spożywczych, które mogą być poddane działaniu promieniowania jonizującego. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* (2009/C 283/02).
- FDA. Food Irradiation: What You Need to Know, <https://www.fda.gov/food/buy-store-serve-safe-food/food-irradiation-what-you-need-know> (dostęp: 2020.03.20).
- World Health Organization. *FOOD IRRADIATION. A technique for preserving and improving the safety of food.* Genewa, 1988.
- Wykaz zatwierdzonych jednostek poddających w państwach członkowskich środki spożywcze i ich składniki działaniu promieniowania jonizującego. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* (2019/C 37/03).
- Decyzja Komisji z dnia 23 października 2002 r. przyjmująca wykaz zatwierdzonych jednostek w państwach trzecich w odniesieniu do napromieniowania żywności 2002/840/WE (Dz.U. L 287 z 25.10.2002, s. 40).
- Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o bezpieczeństwie żywności i żywienia (Dz.U. 2006 Nr 171 poz. 1225).
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie napromieniowania żywności promieniowaniem jonizującym (Dz.U. nr 121, poz. 841).
- Eustice RF. Global status and commercial applications of food irradiation. In: Ferreira I, Antonio AL, Verde SC, eds. *Food Irradiation Technologies. Concepts, Applications and Outcomes.* Royal Society of Chemistry; 2017. p. 397–424.
- Sprawozdanie Komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady za lata 2016–2017 dotyczące żywności i składników żywności poddanych działaniu promieniowania jonizującego. Bruksela, 08.10.2019 r., sygnatura KE: COM(2019) 454 final.
- Maherani B, Hossain F, Criado P, Ben-Fadhel Y, Salmieri S, Lacroix M. World market development and consumer acceptance of irradiation technology. *Foods.* 2016; 5(4): 79. <https://doi.org/10.3390/foods5040079>
- Gunes G, Tekin MD. Consumer awareness and acceptance of irradiated foods: Results of a survey conducted on Turkish consumers. *LWT-Food Sci Technol.* 2006; 39(4): 444–448. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.03.001>
- Galati A, Tulone A, Moavero P, Crescimanno M. Consumer interest in information regarding novel food technologies in Italy: The case of irradiated foods. *Food Res Int.* 2019; 119: 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.01.065>
- Kuźniar W, Kawa M, Kuźniar P. Konsumenty wobec bezpiecznych rozwiązań w zakresie produkcji żywności. *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Problemy Rolnictwa Światowego.* 2016; 16(3): 243–250.
- Roberts PB. Food irradiation is safe: Half a century of studies. *Radiat Phys Chem.* 2014; 105: 78–82. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.05.016>
- Woodside JV. Nutritional aspects of irradiated food. *Stewart Postharvest Review.* 2015; 11(3): 1–6. doi:10.2212/spr.2015.3.2
- Lima F, Vieira K, Santos M, de Souza PM. Effects of Radiation Technologies on Food Nutritional Quality. In: Díaz AV, eds. *Descriptive Food Science, IntechOpen;* 2018. p. 137–152. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80437>

30. Ravindran R, Jaiswal AK. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods. *Food Chem.* 2019; 285: 363–368. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.002>
31. Scientific Opinion on the Chemical Safety of Irradiation of Food. EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes, Flavourings and Processing Aids (CEF). *EFSA Journal.* 2011; 9(4): 1930. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.1930>
32. Song BS, Choi SJ, Jin YB, Park JH, Kim JK, Byun EB, Marchioni E. A critical review on toxicological safety of 2-alkylcyclobutanones. *Radiat Phys Chem.* 2014; 103: 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.05.065>
33. Sommers CH, Delincée H, Smith JS, Marchioni E. Toxicological safety of irradiated foods. In: Fan X, Sommers CH, eds. *Food Irradiation Research and Technology*. 2nd ed. Blackwell Publishing; 2013. p. 53–74. DOI:10.1002/9781118422557
34. Irawati Z, Sani Y. Feeding studies of radiation sterilization ready to eat foods on sprague dawley rats: In vivo. *Nat Sci.* 2012; 4: 116–122. DOI: 10.4236/ns.2012.42017
35. Shalaby AR, Anwar MM, Sallam EM, Emam WH. Quality and safety of irradiated food regarding biogenic amines: Ras cheese. *Int J Food Sci Tech.* 2016; 51(4): 1048–1054. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13058>