

Charakterystyka dozymetryczna pola promieniowania na stanowisku radiograficznym w aspekcie ekspozycji obiektów roślinnych

Streszczenie. Istnieje szereg agrotechnicznych zabiegów, które wpływają na przebieg wegetacji roślin, oraz pośrednio na strukturę uzyskiwanych z tych roślin plonów. Oprócz powszechnie stosowanych metod chemicznych i biologicznych, metody fizyczne również mogą być stosowane do stymulacji wzrostu i rozwoju roślin. Ciekawym aspektem jest hormetyczne oddziaływanie niskich dawek promieniowania jonizującego na wzrost roślin. Celem pracy było zbadanie rozkładu dawki w polu promieniowania jonizującego, generowanego z lampy rentgenowskiej. Wyniki przedstawionych badań zostaną wykorzystane do zaplanowania eksperymentów z napromienianiem obiektów roślinnych zadaną dawką promieniowania rentgenowskiego.

Abstract. Several agrotechnical treatments affect the course of plant vegetation and indirectly affect the structure of the yields obtained from these plants. In addition to the commonly used chemical and biological methods, physical methods can also be used to stimulate plant growth and development. An interesting aspect is the hormetic effect of low doses of ionizing radiation on plant growth. The purpose of this study was to investigate the dose distribution in the field of ionizing radiation generated from an X-ray tube. The results of the presented research will be used to plan experiments on irradiating plant objects with a preset dose of X-rays. (**Dosimetric characteristics of the radiation field at the radiographic site in the aspect of exposure of plant objects**)

Słowa kluczowe: promieniowanie jonizujące, detektory termoluminescencyjne, napromienianie roślin, odpowiedź na dawkę, hormeza, wydajność upraw

Keywords: ionizing radiation, thermoluminescent detectors, plant irradiation, dose response, hormesis, crop yield

Wstęp

Metody fizyczne stanowią uzupełnienie zabiegów agrotechnicznych, mających na celu m.in. wzrost wydajności plonów oraz ich zabezpieczenie w trakcie przechowywania [1-5].

Jedną z takich metod jest ekspozycja materiału siewnego oraz plodów rolnych na promieniowanie jonizujące. Zgodnie z hipotezą hormezy radiacyjnej, niskie dawki promieniowania jonizującego indukują stymulację roślin, a wysokie dawki hamują ich wzrost [6-9]. Wydaje się, że każdy gatunek roślin charakteryzuje się innym zakresem tolerancji na promieniowanie jonizujące. Znalezienie optymalnej dawki dla uzyskania maksymalnych, pozytywnych efektów wymaga przeprowadzenia szeregu agrotechnicznych eksperymentów, uwzględniających zarówno rodzaj promieniowania jonizującego jak i deponowaną w materiale roślinnym dawkę.

Realizacja napromieniania obiektów roślinnych zadaną dawką może odbywać się na różne sposoby. Jednym z nich jest wykorzystanie promieniowania jonizującego emitowanego z lampy rentgenowskiej. W celu zaplanowania napromieniania określonych obiektów konieczna jest weryfikacja dozymetryczna pola promieniowania emitowanego z lampy rentgenowskiej, co było celem prezentowanej pracy.

Materiały i metody

W ramach pracy wykonano pomiary rozkładu pola promieniowania na stanowisku radiograficznym w Katedrze Fizyki Medycznej i Biofizyki Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Do zbadania rozkładu pola promieniowania wykorzystano detektory termoluminescencyjne.

Podstawy fizyczne pomiarów dawki z użyciem materiałów termoluminescencyjnych

Luminescencja niektórych materiałów polega na absorpcji promieniowania (zakres promieniowania elektromagnetycznego obejmujący promieniowanie

jonizujące, UV, światło widzialne a także promieniowanie korpuskularne wywołujące jonizację ośrodka) i reemisji energii zdeponowanej w tym materiale w postaci światła widzialnego pod wpływem różnych czynników. W przypadku materiałów termoluminescencyjnych takim czynnikiem jest temperatura [10]. Zjawisko termoluminescencji zachodzi dwuetapowo i można je opisać w oparciu o budowę pasmową ciał stałych. W pierwszym etapie elektrony z pasma walencyjnego, po zaabsorbowaniu energii niesionej przez promieniowanie jonizujące, zostają przeniesione do pasma przewodnictwa, w którym migrują do momentu przechwycenia przez pułapkę o określonej energii. W drugim etapie materiał termoluminescencyjny podgrzewa się do odpowiedniej temperatury, dzięki czemu elektronom uwięzionym w pułapkach elektronowych dostarczona jest energia niezbędna do uwolnienia z pułapki i przeniesienia do pasma przewodnictwa. Następnie dochodzi do rekombinacji elektronów z centrami luminescencji, w skutek czego emitowany jest kwant światła [11 - 13]. Prawdopodobieństwo uwolnienia elektronu z pułapki opisane jest rozkładem Boltzmana:

$$(1) \quad p = s \cdot e^{-E_n/kT}$$

gdzie: p – prawdopodobieństwo uwolnienia elektronu na jednostkę czasu [s^{-1}], s – współczynnik częstotliwości dla danego rodzaju pułapki [s^{-1}], E_n – energia wiązania pułapki [eV], k – stała Boltzmana [eV/K], T – temperatura [K].

Podgrzewając materiał termoluminescencyjny otrzymuje się zależność liczby zliczeń impulsów świetlnych od temperatury. Jest to tzw. krzywa wyświecania, na której widoczne piki odpowiadają pułapkom elektronowym. Pole powierzchni pod krzywą wyświecania jest proporcjonalne do zaabsorbowanej dawki promieniowania jonizującego [14, 15].

Opis stanowiska do ekspozycji obiektów roślinnych na promieniowanie rentgenowskie

Badania przeprowadzono na stanowisku radiograficznym (rys.1), w skład którego wchodzi lampa rentgenowska,

kamera rentgenowska oraz statyw do mocowania próbek. Stanowisko wyposażone jest w lampę typu dyfrakcyjnego ze stałą anodą molibdenową, przeznaczoną do pracy ciągłej. Lampa jest zasilana przez generator HV Philips PW1830 (maksymalne napięcie 60 kV, maksymalny prąd lampy 60 mA) i chłodzona wodą o przepływie około 4 litrów na minutę za pomocą układu chłodzenia Testchem UChF 4,5s.

Promieniowanie na wyjściu lampy rentgenowskiej kształtowane jest przez mosiężny kolimator o średnicy otworu 10 mm i wsuwany w mosiężną obudowę. Dodatkowo na pobocznicy kolimatora założona jest warstwa folii ołowianej o grubości 1 mm. Istnieje możliwość montażu dodatkowych filtrów na kolimatorze.

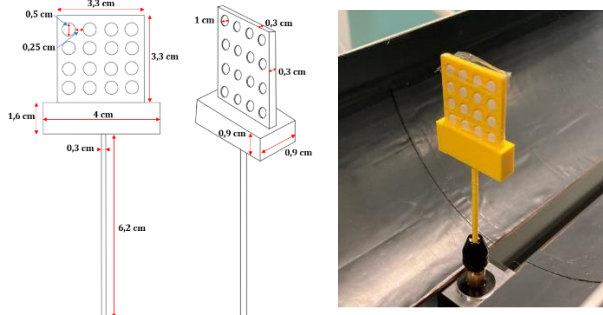
Z uwagi na dużą moc dawki w polu promieniowania wychodzącym z lampy, dla spełnienia wymogów ochrony radiologicznej, stanowisko jest wyposażone w osłonę antyradiacyjną wykonaną z rury PCV wyklejonej od wewnątrz folią ołowianą o grubości 0,5 mm. Na kamerze rentgenowskiej zamontowana jest dodatkowo tafła szkła ołowianego o grubości 10 mm, a tylna ściana obudowy zabezpieczona jest przez warstwę ołowiu o grubości 1,5 mm. Kąt rozwarcia stożka promieniowania wynosi 4,83°.



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego

Pomiary dawek przy użyciu detektorów TLD

W celu wyznaczenia rozkładu pola wykorzystano detektory termoluminescencyjne (TLD – ang. thermoluminescent detectors) o wysokiej czułości, typu LiF:Mg, Cu,P (MCP-N) wyprodukowane w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, umieszczone w matrycy wykonanej z materiału termoplastycznego metodą druku 3D (rys. 2).



Rys. 2. Schemat matrycy do napromieniania detektorów TLD oraz widok matrycy z umieszczonymi w niej detektorami TL zamontowanej na stanowisku radiograficznym

W celu wyznaczenia dawki pochłoniętej przez detektory termoluminescencyjne wyznaczono ich indywidualne współczynniki czułości (IRF), będące ilorzem średniej liczby

zliczeń z odczytów partii detektorów ekspozycyjnych na tę samą dawkę (N_{sr}) i liczby zliczeń dla i-tego detektora (N_i) zgodnie z równaniem:

$$(2) \quad IRF_i = \frac{N_{sr}}{N_i}$$

Ponadto wyznaczono współczynnik kalibracyjny w oparciu o ekspozycję detektorów na zadaną dawkę (1 mGy, ^{137}Cs):

$$(3) \quad K = \frac{N_{sr}}{D}$$

Ostatecznie odpowiedź każdego z detektorów obliczono w następujący sposób:

$$(4) \quad D_i = \frac{N_i \cdot IRF_i}{K}$$

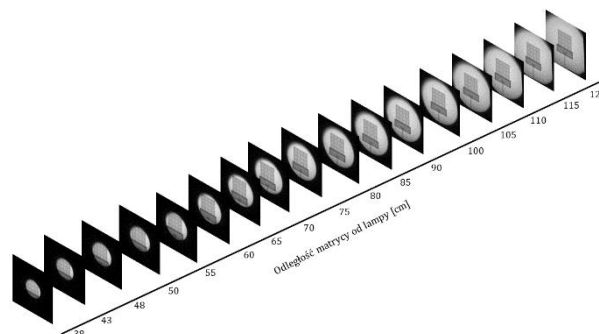
Natomiast wartość dawki dla określonych warunków pracy lampy rentgenowskiej obliczano jako średnią arytmetyczną z odczytu 16 detektorów umieszczonych w matrycy. Niepewność dawki średniej obliczono jako odchylenie standardowe średniej.

Każdy cykl pomiarowy składał się z sekwencji następujących czynności:

- 1) anilacja przedekspozycyjna (temp. 240°C, 10 minut) przy użyciu laboratoryjnego pieca wysokotemperaturowego TLDO (PTW, Niemcy)
- 2) napromieniowanie z użyciem lampy rentgenowskiej
- 3) anilacja poekspozycyjna (temp. 100°C, 10 minut) – jak w pkt 1;
- 4) odczyt w czytniku *lexygresearch* TL/OSL reader (Freiberg Instruments GMBH).

Analiza ułożenia matrycy względem napromienianego pola w funkcji odległości od lampy na stanowisku radiograficznym

Celem przeprowadzonej analizy było wyznaczenie pozycji ułożenia matrycy względem źródła promieniowania, czyli takiej, w której cały obszar matrycy będzie jednorodnie napromieniony, przy możliwie największej intensywności. Ideę optymalizacji położenia matrycy względem ogniska lampy rentgenowskiej pokazano na rysunku 3. Widoczne obrazy uzyskano przy użyciu kamery rentgenowskiej.



Rys. 3. Zależność uzyskanego obrazu matrycy od odległości pomiędzy matrycą a ogniskiem lampy rentgenowskiej

Analiza uzyskanych obrazów została przeprowadzona przy użyciu darmowego oprogramowania ImageJ. Zbadano rozrzut średnich wartości, wyrażonych w skali szarości, uzyskanych dla poszczególnych położenia detektorów TL.

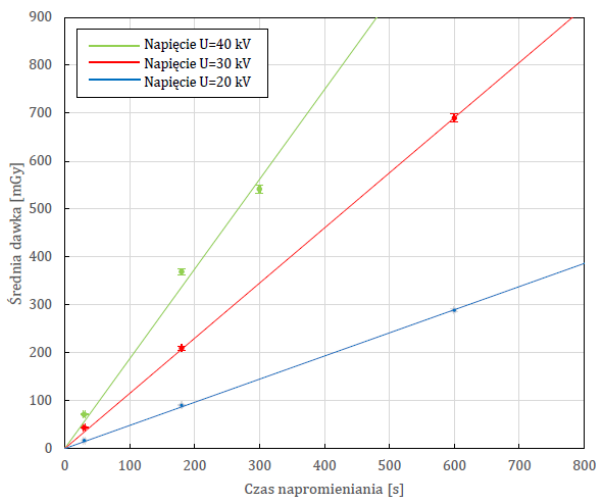
Na podstawie wyników ustalono, że dalsze pomiary będą wykonywane w odległości 100 cm od ogniska lampy.

Zależność dawki od czasu ekspozycji oraz od napięcia lampy rentgenowskiej

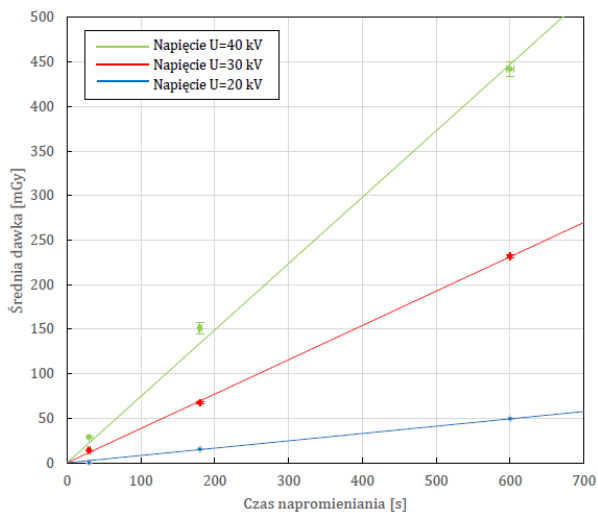
Dla zadanych parametrów ekspozycji (napięcie, filtracja, odległość ognisko lampy-matryca) obliczono średnie

wartości dawek pochłoniętych na podstawie odczytów detektorów TL umieszczonych w matrycy. Zależność dawki w funkcji czasu napromieniowania pokazano na rysunkach 4 i 5.

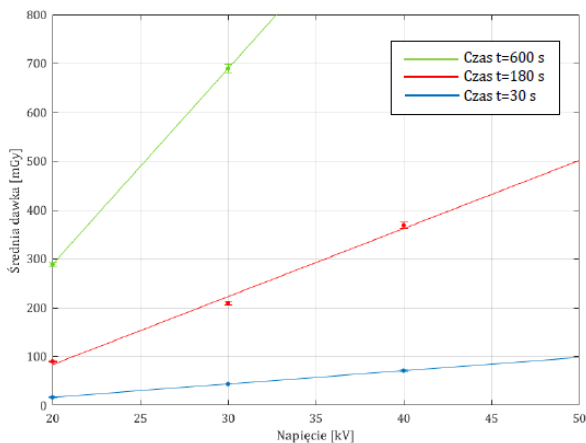
Obliczone średnie wartości dawek posłużyły do wyznaczenia zależności dawki pochłoniętej od napięcia na lampie rentgenowskiej. Wyniki pokazano na rysunkach 6 i 7.



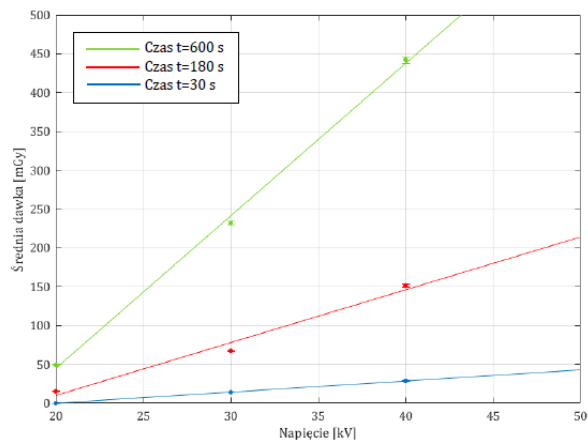
Rys. 4. Zależność średniej dawki pochłoniętej od czasu ekspozycji dla pomiarów bez filtra



Rys. 5. Zależność średniej dawki pochłoniętej od czasu ekspozycji dla pomiarów z filtrem aluminiowym o grubości 5 mm



Rys. 6. Zależność średniej dawki pochłoniętej od napięcia na lampie rentgenowskiej dla pomiarów prowadzonych bez filtra.



Rys. 7. Zależność średniej dawki pochłoniętej od napięcia na lampie rentgenowskiej dla pomiarów prowadzonych z filtrem

Wyznaczenie niepewności względnej

W celu określenia jednorodności rozkładu dawki na płaszczyźnie matrycy wyznaczono wartość niepewności względnej δ , zgodnie ze wzorem 5:

$$(5) \quad \delta = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{min}} \cdot 100\%$$

gdzie D_{max} i D_{min} oznaczają odpowiednio maksymalną i minimalną wartość wyznaczonej dawki dla danych parametrów ekspozycji. Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli nr 1 można stwierdzić, że zastosowanie filtra aluminiowego o grubości 0,5 mm powoduje polepszenie jednorodności rozkładu dawki.

Tabela 1. Niepewność względna dawki pochłoniętej

Ekspozycja	bez filtra	z filtrem
napięcie U = 20 kV		
Czas [s]		
30	25%	-
180	19%	16%
600	20%	21%
napięcie U = 30 kV		
30	14%	14%
180	29%	16%
600	20%	17%
napięcie U = 40 kV		
30	20%	18%
180	32%	23%
300/600	24%	16%

w przypadku ekspozycji przy 40 kV bez filtra czas napromieniowania został ograniczony do 300 sekund

Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary posłużyły do wyznaczenia rozkładu dawki na stanowisku radiograficznym w Pracowni Rentgenowskiej Laboratorium Fluorescencji Rentgenowskiej Katedry Fizyki Medycznej i Biofizyki WFILS AGH za pomocą detektorów termoluminescencyjnych. Pole o najlepszej jednorodności rozkładu dawki uzyskano dla filtra aluminiowego o grubości 0,5 mm.

Rezultaty przeprowadzonych badań stanowią gotowy schemat do przeliczania pożądanego wartości dawek i ich implementacji w planowanych eksperymentach polegających na ekspozycji niewielkich obiektów na zadaną dawkę promieniowania rentgenowskiego. Wykonane pomiary stanowią pierwszy krok w realizacji projektu polegającego na ekspozycji nasion wybranych roślin na niewielkie dawki promieniowania rentgenowskiego.

Autorzy: dr inż. Joanna Dudala, inż. Karolina Lechowicz, dr inż. Aleksandra Jung, prof. AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska, E-mail: Joanna.Dudala@fis.agh.edu.pl;

Karolina.Lechowicz@fis.agh.edu.pl;
Aleksandra.Jung@fis.agh.edu.pl; dr inż. Tomasz Jakubowski, prof.
URK, dr inż. Zygmunt Sobol, prof. URK, Uniwersytet Rolniczy,
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Ul. Balicka 116B, 30-149
Kraków, Polska, E-mail: tomasz.jakubowski@urk.edu.pl;
zygmunt.sobol@urk.edu.pl.

REFERENCES

- [1] Jakubowski, T., Syrotyuk, S., Lopushniak, V., and Atilgan, A. Wpływ stymulacji zmiennym polem magnetycznym nasion pszenicy o różnym przeznaczeniu technologicznym. *Przegląd Elektrotechniczny* 98 (2022), 5, 38–42
- [2] Jakubowski, T., Syrotyuk, S., and Yankovska, K. The use of microwave radiation with a frequency of 2.45 GHz as a factor reducing the storage losses of potato tubers. *Journal of Physics - Conference Series* 1782 (2021), 1–6
- [3] Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. o warunkach zdrowotnych żywności i żywienia (http://www.pfb.info.pl/files/ustawy/4.Dz.U.2001_nr_63_poz_63_4.pdf, data dostępu: 12.05.2015).
- [4] Lemessa A., Popardowski E., Hebda T., Jakubowski T. The Effect of UV-C Irradiation on the Mechanical and Physiological Properties of Potato Tuber and Different Products. *Applied Sciences-Basel* 12 (2022), 1–19. doi:10.3390/app12125907
- [5] Goćławski J., Sekulska-Nalewajko J., Korzeniewska E., Piekarska A. "The use of optical coherence tomography for the evaluation of textural changes of grapes exposed to pulse electric field". *Computers and Electronics in Agriculture* (2017) 142: 29-40
- [6] Volkova P. Yu., Bondarenko E.V., Kazakova E. A. Radiation hormesis in plants. *Current Opinion in Toxicology*, 30 (2022) 100334.
- [7] Villegas D., Sepúlveda C., Ly D. 2023. Use of Low-dose Gamma Radiation to Promote the Germination and Early development in Seeds. *Seed Biology – New Advances*. In techOpen. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1003137>
- [8] Vargas-Hernandez M., Macias-Bobadilla I., Guevera-Gonzalez R. G., Romero-Gomez S.D.J., Rico-Garcia E., Ocampo-Velazquez R.V., Alvarez-Arquieta L.D.D., Torres-Pacheco I. Plant hormesis management with biostimulants of biotic origin in agriculture. *Front. Plant Sci.* 8 (2017) 1762.
- [9] Jalal A., de Oliveira Junior J.C., Fernandes G.C., Mariano G.G., Dias Rezende Trindade V., dos Reis A.R. Hormesis in plants: Physiological and biochemical responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 207 (2021) 111225.
- [10] Bos A.J.J. Theory of thermoluminescence, *Radiation Measurements*, 41 (2007) 45.
- [11] Budzanowski M., Ocena przydatności ultraczułych detektorów termoluminescencyjnych LiF: Mg, Cu, P (MCP-N) w dozymetrii promieniowania gamma w środowisku. Rozprawa doktorska (2001), IFJ PAN Kraków
- [12] Mandowska E., Majgier R., Mandowski A., Termoluminescencja kryształu chlorku potasu jako detektora promieniowania jonizującego. *Przegląd elektrotechniczny, zeszyt 9* (2016).
- [13] Gałązka-Czarnecka, I.; Korzeniewska, E.; Czarnecki, A.; Sójka, M.; Kielbasa, P.; Drózdź, T. Evaluation of Quality of Eggs from Hens Kept in Caged and Free-Range Systems Using Traditional Methods and Ultra-Weak Luminescence. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 2430. <https://doi.org/10.3390/app9122430>
- [14] Bluszcz A., Datowanie luminescencyjne osadów czwartorzędowych – teoria, ograniczenia, problemy interpretacyjne. *Politechnika Śląska* (2000), Zeszyty Naukowe nr 1434, Gliwice.
- [15] Jakubowski T. Effects of microwave radiation on the germination of *Solanum tuberosum* L. tubers. *Bangladesh Journal of Botany.* 45 (2016), 1255–1257.