

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Iwony Słoneckiej

z tytułu

Statystyka bayesowska jako narzędzie wspomagające ocenę narażenia w dozymetrii promieniowania jonizującego

Perspektywy rozwoju energetyki jądrowej w Polsce oraz groźby użycia broni jądrowej w Europie, zwiększają zainteresowania dozymetrią promieniowania jonizującego. Monitorowanie dawek pracowników narażonych na promieniowanie jonizujące z wykorzystaniem dawkomierzy osobistych jest wymagane przepisami prawa. W przypadku ekspozycji osób nie posiadających dawkomierzy osobistych ocenę dawek prowadzi się na podstawie wskazań dawkomierzy środowiskowych lub z wykorzystaniem metod dozymetrii awaryjnej i biologicznej.

W praktyce ochrony radiologicznej wykorzystuje się dawkomierze osobiste o różnej konstrukcji i charakterystyce energetyczno-dawkowej. Najprostsze dawkomierze osobiste, wykorzystujące detektory TL czy OSL, zawierają jeden lub więcej detektorów, zwykle przestonowanych odpowiednio dobranymi filtrami. Celem pomiaru jest wyznaczenie zalecanych wielkości operacyjnych, przybliżających dawkę efektywną. Dawkomierz jest kalibrowany we wzorcowym polu promieniowania, jednak faktyczna ekspozycja może nastąpić w innym polu promieniowania, co powoduje istotne problemy w ocenie dawki na podstawie sygnału detektora. W przypadku braku dawkomierza i podejrzenia o pochłonięcia dawek zagrażających zdrowiu i życiu, można zastosować dozymetrię biologiczną. Trudność w ocenie narażenia może polegać m.in. na braku informacji o składzie wiązki w mieszanym polu promieniowania lub braku krzywej kalibracyjnej dla danego typu promieniowania.

Rozprawie doktorska pani mgr inż. Iwony Słoneckiej dotyczy opracowania metody oceny narażenia osoby napromienionej, na podstawie wskazań dawkomierza lub wyników pomiarów aberracji chromosomowych w przypadku niepełnej informacji o polu promieniowania lub w polu promieniowania, dla którego nie istnieją krzywe kalibracyjne. W tym celu Autorka zaproponowała statystyczną metodę ocenę dawki i jej niepewności, wykorzystując twierdzenie Bayesa wiążące prawdopodobieństwa warunkowe dwóch zdarzeń. W ramach pracy Autorka opracowała metody oraz przygotowała narzędzia ułatwiające ocenę narażenia w mieszanych polach promieniowania beta-gamma ($\beta + \gamma$) i neutron-gamma ($n + \gamma$), dopasowanie krzywych odpowiedzi w dozymetrii biologicznej oraz ocenę dawki przy braku właściwej krzywej kalibracyjnej. Praca została wykonana na renomowanym Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem pana prof. Daniela Kikoły oraz dr Krzysztofa Fornalskiego.

Omówienie treści rozprawy

Rozprawa jest obszernym, 185 dokumentem, z klasyczną, przejrzystą strukturą typową dla prac doktorskich. Ułatwia to czytanie i dostęp do potrzebnej informacji. Rozprawa jest napisana i wydana bardzo starannie, a nieliczne uchybienia terminologiczne i elementy wymagające przedyskutowania zostały przedstawione w kolejnej części recenzji. Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów, obszernego spisu literatury liczącego 155 pozycji, spisu rysunków, listy wykonanych projektów.

Rozdziały teoretyczne (3 i 4) omawiają podstawowe pojęcia z zakresu dozymetrii. Bardziej szczegółowo omówiona została dozymetria termoluminescencyjna, gdyż w rozdziale 5 przedstawiono wyniki eksperymentów i obliczeń wykonanych przez Autorkę w mieszanym polu z wykorzystaniem

detektorów TL. Warto zaznaczyć, że oprócz prac modelowych, Autorka wykonała samodzielnie większość prac związanych z pomiarami częstości dicentryków w limfocytach krwi obwodowej człowieka po ekspozycji w mieszanym polu n+g, choć tylko wspomniała o tym w rozdziale 6. Po części teoretycznej, zasadnicze wyniki rozprawy przedstawione są w Rozdziałach 5-8. Warto zaznaczyć, że wyniki przedstawione w tych rozdziałach zostały w większości opublikowane w czasopiśmie z listy JRC (Radiat.Envir. Biophys).

W rozdziale 5 przedstawione zostało twierdzenie Bayesa i zdefiniowane podstawowe parametry stosowane w dalszej pracy. Analizie poddano dane eksperymentalne uzyskanych po odczycie detektorów TL napromieniane dawką referencyjną Cs-137 lub Co-60 i dawką referencyjną promieniowania gamma oraz dawką beta ze źródła Sr-90 lub Kr-85. Powodem zastosowania metody Bayesa była potrzeba obliczenia odpowiedzi detektora w przypadku niepełnej informacji dotyczącej kalibracji detektorów lub braku informacji o względnym udziale różnych składowych promieniowania. Badano trzy zasadnicze przypadki w których (i) znane są współczynniki kalibracyjne, lecz nieznanym względnym udziałem promieniowania gamma i beta w mieszanym polu; (ii) znany jest skład wiązki, lecz nieznane są współczynniki kalibracyjne i (iii) nieznanym jest skład wiązki, lecz nieznane współczynniki kalibracyjne.

Dane eksperymentalne uzyskane z odczytu dawkomierzy TL dopasowano krzywymi Gaussa, które wykorzystano jako funkcje wiarygodności w metodzie Bayesa. Oprócz klasycznego użycia metody Bayesa, sprowadzającej się do przecałkowania funkcji wiarygodności i rozkładu prawdopodobieństwa względnego udziału różnych rodzajów promieniowania θ , zastosowano też metodę Monte Carlo, umożliwiającą uzyskanie pseudolosowego rozkładu wartości wyniku, przy losowaniu parametru z założonego lub znanego rozkładu θ . Uzyskano bardzo dobre zgodności między uzyskanymi wartościami eksperymentalnymi, uzyskanymi z ekspozycji w pojedynczych i mieszanych polach promieniowania, oraz wynikami uzyskanymi z analizy Bayesa i metody Monte Carlo. Wyniki tego rozdziału wykazały spójność numeryczną testowanych metod: zmierzone wartości dawek w polach mieszanych zgodziły się z przewidywaniami, przy znajomości względnych udziałów dawek.

W rozdziale 6 Autorka zaprezentowała metodę i wyniki analizy bayesowskiej, przeprowadzonej dla metod dozymetrii biologicznej w mieszanym polu promieniowania neutronowego (n) i gamma (g) (n+g). Badano częstość dicentrycznych aberracji chromosomowych w limfocytach krwi ludzkiej, po napromienieniu w mieszanym polu n+g. Wydajność indukcji tych aberracji na jednostkę dawki pochłoniętej jest dla obu promieniowań znacząco różny i zależy od wielu czynników m.in. poziomu dawki oraz energii neutronów. W przypadku niekontrolowanych, awaryjnych ekspozycji, na ogół nie jest znany stosunek dawki neutronowej i dawki gamma D_n/D_g . Autorka zaprezentowała szereg komplementarnych metod obliczenia dawki neutronowej i dawki gamma w przypadku, gdy nie jest znany *a priori* stosunek tych dawek. Interesujące jest zastosowanie w analizie oprócz tzw. rozkładów informatywnych θ , również rozkładów nieinformatywnych, w których możemy poczynić tylko bardzo przybliżone założenia co do składu promieniowania. Okazuje się, że nawet zastosowanie rozkładu nieinformatywnego może dać znaczącą poprawę zgodności, w porównaniu do założenia rozkładu jednostajnego θ . Ponownie zastosowanie metody Monte Carlo umożliwiło przeprowadzenie analizy statystycznej analizowanych prób z rozkładów.

Analizowano dwa rodzaje wyników. Pierwszy z nich dotyczył opublikowanych danych literaturowych, które Autorka ponownie poddała analizie przy wykorzystaniu przygotowanych przez siebie narzędzi obliczeniowych. Spójność wyników, przy porównaniu wartości referencyjnych i obliczonych, oceniano porównując wartości parametru Z. Wartości tego parametru, obliczone metodą analityczną oraz metodą quasi-bayesowską, były praktycznie identyczne, zarówno dla D_g jak i dla D_n i zgadzały się

z wartościami literaturowymi dla dawek biologicznych. Ponownie, pokazane obliczenia wykazały całkowitą poprawność rozwiniętego aparatu obliczeniowego. Zaletą tych metod jest poprawa zgodności obliczonych dawek z eksperymentem, nawet przy założeniu niepełnej informacji o polu promieniowania.

Warta omówienia jest analiza wyników napromieniania limfocytów krwi obwodowej w reaktorze Maria. Napromienione próbki krwi zostały przewiezione do CLOR i tam Autorka przeprowadziła samodzielnie pełną ich analizę. Dawki fizyczne D_n i D_g zostały zmierzone dwoma niezależnymi metodami. Uzyskano bardzo dobrą zgodność metodą dozymetrii i biologicznej. Bardzo interesująca była tu analiza prowadzona uproszczoną metodą bayesowską, w której zastosowano różne rozkłady parametru θ , zarówno informatywne jak i nieinformatywne. Sukcesem metody było wykazanie, że nawet przy zastosowaniu sigmoidalnego rozkładu nieinformatywnego dla $\theta > 0.5$ uzyskano poprawną wartość D_g . Podobnie jak w wypadku badania odpowiedzi detektorów TLD, analizę wartości dawek przeprowadzono również metodą Monte Carlo, przy założeniu różnych rozkładów θ , uzyskując ponownie zgodne wyniki z metoda analityczną, iteracyjną i bayesowską. Metoda rozwinięta przez Autorkę, wraz z opracowanym samodzielnie oprogramowaniem, została wszechstronnie przetestowana i może być wdrożona w laboratoriach radiobiologicznych. Jest to niewątpliwie spory sukces i osiągnięcie, docenione publikacjami o zasięgu międzynarodowym.

Osobnym zagadnieniem jest analiza wyników uzyskanych w wyniku ekspozycji pojedynczym rodzajem promieniowania (**Rozdział 7**). Problem polega na tym, że krzywa kalibracyjna (zależność dawka – efekt) uzyskiwana dla danego typu promieniowania, najczęściej z lamp rentgenowskich lub źródeł Co-60, może nie dawać poprawnych wyników dla innej energii czy rodzaju promieniowania. Na dodatek, krzywe kalibracyjne dla jednej modalności promieniowania, ale pochodzące z różnych laboratoriów, wykazują znaczny rozrzut. Aby zbadać te zależności, Autorka wyznaczyła dla dużego zbioru danych literaturowych rozkład parametrów γ i β , występujących odpowiednio przy członie kwadratowym i liniowym równania krzywej kalibracyjnej dla promieniowania ze źródła Co-60. Podobną operację przeprowadzono dla parametru α , stojącym przy członie liniowym dla neutronów rozszczepieniowych. Funkcja wiarygodności opisana została rozkładem Poissona z liczbą dicentryków wyliczonych z równania krzywej kalibracyjnej. W tej sytuacji przedmiotem zainteresowania jest rozkład dawki *a posteriori*.

Autorka przygotowała rozkład *a priori* współczynników γ krzywych kalibracyjnych dla Co-60 na podstawie danych literaturowych z 17 eksperymentów i dopasowała do tego rozkładu funkcję Gaussa. Podobne zabiegi wykonała dla pozostałych współczynników krzywych kalibracyjnych dla promieniowania o niskim i o wysokim LET. Mając tak przygotowaną funkcję wiarygodności metodą bayesowską wyliczono wartości dawek po napromienieniu ze źródła Co-60 jak również na podstawie krzywej kalibracyjnej otrzymanej dla promieniowania X. Metoda bayesowska, wykorzystująca rozkład wartości współczynników, dała bardzo dobre zgodności z wartościami referencyjnymi, znacznie lepsze niż dla wielu pojedynczych krzywych dla Co-60 czy też dla krzywej uzyskanej dla promieniowania X.

Tak przygotowana funkcja wiarygodności, z rozkładem *a priori* dla współczynników krzywych kalibracji, została również użyta do analizy wyników uzyskanych dla wypadku radiacyjnego w Stambule w 1998 roku. W każdym z analizowanych przypadków wartość referencyjna była zgodna z wartością uzyskaną metodą bayesowską w zakresie dwóch odchyłeń standardowych. Podobna analiza przeprowadzona dla neutronów potwierdziła zalety metody bayesowskiej, mimo że rozkład współczynników krzywych był w tym przypadku oparty na mniej licznej grupie 9 wyników.

Możliwa obecność punktów odstających w krzywych kalibracyjnych dozymetrii biologicznej skłoniła autorkę do przygotowania i przetestowania adekwatnej metody dopasowania krzywej kalibracyjnej

do punktów eksperymentalnych (**Rozdział 8**). W tym celu zaadoptowała metodę bayesowską dopasowania krzywych do potrzeb dozymetrii biologicznej, w której prawie wyłącznie krzywe kalibracyjne dopasowywane są prostymi funkcjami liniowymi i kwadratowymi. Mimo, że problem wydaje się mało skomplikowany, podstawową zaletą takiego dopasowania krzywych jest możliwość automatycznej eliminacji punktów odstających. Metodę ta przetestowano najpierw na czterech wygenerowanych wykresach, w których celowo przesunięto szereg punktów, a potem do dopasowania krzywej kalibracyjnej, uzyskanej przy ekspozycji próbek krwi w reaktorze Maria. Wyniki uzyskane metodą bayesowską w pełni pokrywają się w granicach niepewności z wynikami uzyskanymi metodą dopasowania metoda najmniejszych kwadratów, co było do przewidzenia.

Mniej oczywistym wynikiem jest analiza bayesowska prowadząca do wyboru modelu, który posłuży do ekstrapolacji krzywej kalibracyjnej, znacznie powyżej zakresu dawek użytych do kalibracji. Rozstrzygnięcie następuje przy analizie wartości tzw. współczynnika wyboru modelu W_m . W wyliczeniu wartości tego współczynnika zastosowano wiedzę *a priori*, dotyczącą wartości parametru jednego z modeli. W niskim zakresie dawek, dla którego dostępne były dane eksperymentalne, zarówno model liniowy i kwadratowy dawały praktycznie te same wartości. Rozstrzygnięcie było możliwe przy założeniu (wiedzy *a priori*) zakresu wartości współczynnika liniowego α . Wybór modelu liniowego dla danych z reaktora Maria był spójny z faktem, że wiązka z reaktora dawała w sposób oczywisty przewagę dawki neutronowej.

Uwagi i elementy pracy wymagające dyskusji

- 1) Nie spotkałem się z terminem „optoluminescencja” dla określenia Optycznie Stymulowanej Luminescencji OSL. (str. 17)
- 2) Na stronie 18 zamieszczono tekst: *„Detektory termoluminescencyjne posiadają także inne ograniczenia, które w pewnych sytuacjach uniemożliwiają przeprowadzenie właściwej oceny narażenia. Przykładem jest stosowanie źródeł o energiach wykraczających poza ramy kalibracji.”* Trudno mi zgodzić się z tym twierdzeniem. Detektory TL posiadają świetnie przebadane charakterystyki dawkowo –energetyczne i dla promieniowania o innej energii można stosunkowo łatwo przeliczyć odpowiedź detektora.
- 3) Str. 30 *„Źródłem promieniowania mieszanego beta i gamma ($\beta + \gamma$) jest głównie medycyna nuklearna, ale też stanowiska do wzorcowania przyrządów, czy radiografia przemysłowa.”* To pewien skrót myślowy, źródłem promieniowania beta są oczywiście pierwiastki promieniotwórcze rozpadające się wg rozpadu beta.
- 4) Str 63 ... *Niepewność dawki szacuje się na 17% wartości dawki, zgodnie z procedurą przyjętą w CLOR.* Niepewność dawki zależy m.in. od poziomu mierzonych dawek tzn. rośnie wraz z malejącą dawką.
- 5) Tabela 5.2 Podawanie w tabeli 6 cyfr znaczących w warunkach gdy niepewności mają 5 cyfr znaczących nie ma uzasadnienia i utrudnia korzystanie z takich danych.
- 6) „Zerodose” jest slangiem i lepiej używać terminu „tło własne” czy „bieg własny” detektora
- 7) Nie do końca rozumiem dlaczego krzywe na rys. 5.3 dla Cs-137 zostały wykonane dla amplitudy sygnału a dla Co-60 z całki z sygnału? To są jednak dwa różne parametry. Podobna sytuacja ma miejsce prawdopodobnie w przypadku Sr90 i Kr85 (odpowiedź od Kr-85 na 1 mSv jest znacznie mniejsza, więc chyba Autorka zdecydowała się na poprawienie statystyki). Nie znalazłem tutaj żadnego komentarza.

Podsumowanie

Praca doktorska pani mgr inż. Iwony Słoneckiej podejmuje ważny temat interpretacji odpowiedzi systemów dozymetrii, w warunkach kiedy ekspozycja nastąpiła w nieznanym polu promieniowania lub dla zakresów dawek lub typów promieniowania poza zakresem kalibracji. Autorka zastosowała z powodzeniem analizę opartą o twierdzenie Bayesa, która umożliwia zmniejszenie zakresu niepewności odczytu dawki w warunkach, kiedy posiadamy początkową wiedzę o warunkach napromienienia. Zaletą metody jest możliwość zastosowania wiedzy *a priori*, co w przypadkach wątpliwych ułatwia analizę wyniku, w tym analizę statystyczną przy zastosowaniu metody Monte Carlo. Mimo, że przykłady zastosowań dotyczyły przypadków możliwych do analizy również innymi metodami, metoda bayesowska może okazać się nieoceniona w interpretacji dozymetrii biologicznej, głównie przy niepełnej informacji o warunkach ekspozycji. Autorka w pełni zrealizowała cele postawione w pracy, a wymienione w recenzji uwagi krytyczne i polemiczne nie naruszają zasadniczych wyników pracy. Uważam, że recenzowana rozprawa spełnia całkowicie wymagania stawiane dysertacjom na stopień doktora nauk fizycznych i wnioskuję do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne o dopuszczenie pani magister inż. Iwony Słoneckiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ogromna zaletą rozprawy jest bardzo obszerne, wręcz podręcznikowe przedstawienie metody obliczeń, co daje realne możliwości weryfikacji obliczeń. Autorka rozwinęła dedykowane oprogramowanie, które umożliwia w sposób szybki prowadzenie takich analiz. Z takimi sytuacjami możemy mieć współcześnie do czynienia np. w razie użycia brudnej bomby czy wręcz podczas ataku bronią jądrową. Przy ocenie rozprawy warto nadmienić, że większość wyników analizowanych w pracy została opublikowana w recenzowanych, indeksowanych czasopismach z listy JRC, głównie w wydawanym od ponad 40 lat *Journal of Environmental Biophysics*. Autorka potrafiła połączyć różnorodne prace eksperymentalne (ewaluacja detektorów TLD, skomplikowana metodycznie dozymetria biologiczna) z opanowaniem i wdrożeniem aparatu matematycznego i informatycznego. Połączenie tych umiejętności nie należy do częstych przypadków i wymagało o Autorki szczególnej wszechstronności. Biorąc wszystkie te aspekty pod uwagę wnioskuję do Rady Dyscypliny nauki Fizyczne wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej.



Prof. dr hab. Paweł Olko

Kraków, 13.04.2022