

**Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków**

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2015/

Kraków, grudzień 2015

Raport Nr 2085/AP

Symulacja Monte-Carlo odpowiedzi otworowej sondy geofizycznej gamma - gamma w ceramicznym ośrodku modelowym stanowiska kalibracyjnego w Zielonej Górze

D. Dworak

Praca wykonana została w ramach realizacji umowy pt. *"Opracowanie modeli cyfrowych trzech typów sond otworowej geofizyki jądrowej (gamma-gamma, neutron - neutron epitermiczne i termiczne, neutron - neutron termiczne) w formie zestawów danych wejściowych dla oprogramowania MCNP i wykonanie obliczeń testowych przy użyciu tych modeli dla zadanego ośrodka skalnego"* w ramach współpracy z Wydziałem Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Umowa nr ZDN/035/140/2015.

Abstract

Responses of the spectrometric gamma-gamma density tool in borehole were numerically simulated by means of the MCNP code. The rock medium has been modelled as a few layers of some ceramic materials with well-known chemical composition and mudstones of 2, 5, 9 and 15 % porosity.

1. Wstęp

Prace opisane w poniższym raporcie stanowią część dużego, ogólnopolskiego projektu badawczego, związanego z rozwojem metod poszukiwawczych gazu łupkowego i znanego pod nazwą Blue Gas [1]. Prace te prowadzone są w IFJ w ścisłej współpracy z Katedrą Geofizyki Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska (GGiOŚ) AGH, która to grupa jest jednym z oficjalnych wykonawców w/w projektu. Ponieważ wiele danych technicznych projektu ma charakter poufny i/lub jest chronionych prawami autorskimi, w raporcie wszystkie tego typu dane zostaną pominięte. W szczególności, rysunki będą tylko schematyczne, a dane liczbowe ograniczone do tych jedynie ogólnodostępnych.

Zasadniczym celem pracy było utworzenie specyficznych zbiorów danych liczbowych, których najistotniejszą częścią jest zakodowana w formacie programu MCNP [2] geometria sondy gamma-gamma (g-g), znanej też w geofizyce pod nazwą *sondy gęstościowej*. Sonda tego typu umożliwi pomiar zarówno gęstości ośrodka jak i tzw. *indeksu absorpcji fotoelektrycznej* Pe - dwóch bardzo istotnych, z punktu widzenia geofizycznych metod poszukiwawczych, parametrów ośrodków skalnych.

Prócz sondy g-g opracowywane są obecnie w IFJ w podobny sposób także inne sondy, w szczególności sondy neutronowe oparte na konstrukcji dobrze znanej sondy NNTE. Część danych i założeń jest wspólna dla wszystkich tych sond, podobny jest także zakres koniecznych do wykonania prac. Jest jednak także wiele istotnych, merytorycznych różnic pomiędzy sondami neutronowymi i gamma. Dlatego zdecydowano, iż prace nad każdą z sond, choć częściowo się pokrywają i choć prowadzone są w ramach tego samego projektu i zlecenia, zostaną przeprowadzone i opisane oddzielnie [3].

Kilka praktycznych aspektów związanych z wykorzystaniem sondy g-g w geofizyce otworowej było już wcześniej przedmiotem badań w ramach współpracy IFJ z Katedrą Geofizyki AGH. Ich wynikiem był także szereg oficjalnych publikacji (np. [4] - [8]). Jednak tamte prace - jako prace o wyraźnym, jedynie badawczym profilu - nie podlegały tego typu formalnym restrykcjom jak ta, prowadzona obecnie.

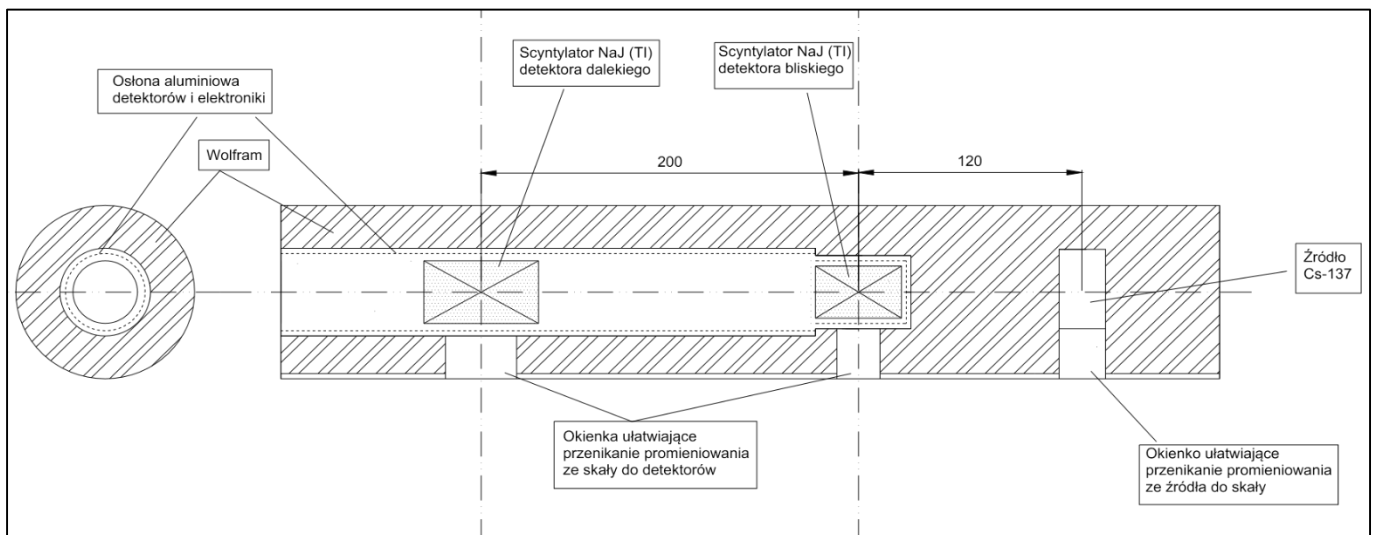
Wspomniany powyżej zbiór zawierający geometrię sondy g-g i inne istotne dane, będzie służył do dalszych, roboczych już obliczeń projektu Blue Gas, w ramach prac koordynowanych przez Wydział GGiOŚ AGH. W raporcie przedstawiono wyniki testowych obliczeń, tj. odpowiedzi spektrometrycznej sondy gęstościowej g-g umieszczonej w zadanym, modelowym ośrodku skalnym, zaproponowanym przez zleceniodawcę. Oczywiście, zgodnie z istotą i założeniami zlecenia, wszystkie odpowiedzi sondy zostały wyliczone przy pomocy programu MCNP. Ten doskonale znany i stosowany na całym świecie program służy do symulacji transportu promieniowania w materii metodą Monte Carlo (MC). Zarówno sama sonda jak i ośrodek skalny zostały zapisane w postaci cyfrowej z uwzględnieniem wszystkich istotnych szczegółów, które to jednak techniczne szczegóły, jak wspomniano na wstępie, nie mogą zostać w tym miejscu podane.

2. Sonda

Spektrometryczna sonda gęstościowa gamma-gamma (g-g), oddana nam do opracowania w ramach wspomnianej na wstępie umowy, posiada konstrukcję typową dla sond stosowanych we współczesnym przemyśle naftowym. Schemat ideowy tego typu sondy przedstawia Rysunek 1. Ze względu na ochronę praw autorskich, ani wymiary geometryczne, ani szczegóły konstrukcyjne sondy nie zostały na szkicu zaznaczone, a podane tam rozstawy źródło-detektor są jedynie orientacyjne. W sondzie znajduje się mono-energetyczne, objętościowe źródło promieniowania gamma, ^{137}Cs , emitujące izotropowo fotony o energii 662 keV. Źródło jest

standardowe, komercyjne, jednak o relatywnie dużej aktywności, bo aż 2 Ci (7.32E10 Bq). Okienko berylowe umożliwia emisję promieniowania gamma ze źródła ^{137}Cs w kierunku badanego ośrodka, w naszym przypadku jest to objętość badanego modelu skalnego. Po przejściu przez obszar skały promieniowanie dociera do objętości czynnej detektorów, co z kolei umożliwiają systemy otworów-kolimatorów w wolframowej obudowie sondy. Wymiary i rozmieszczenie tych kolimatorów to jedno z najważniejszych parametrów decydujących o pracy sondy. W obliczeniach testowych przedstawionych w raporcie wymiar jednego z tych kolimatorów został celowo, dla potrzeb testu, zmieniony. Jako ciekawostkę można podać, iż zmiana średnicy jednego z kanałków kolimacyjnych o czynnik dwa, powoduje natychmiastową zmianę liczby odczytów sondy o cały rząd wielkości.

W sondzie znajdują się dwa detektory promieniowania gamma, reprezentowane w cyfrowym zapisie geometrii sondy przez walce kryształów NaJ(Tl). Detektor położony bliżej źródła nazywany jest w nomenklaturze geofizycznej po prostu „detektorem bliskim” (ang. *near detector*), a drugi, położony dalej od źródła sondy - „detektorem dalekim” (ang. *far detector*). W dalszej części raportu takie właśnie, skrótowe nazwy będą konsekwentnie używane. W czasie pracy sonda zawsze dociskana jest do ściany otworu wiertniczego tą stroną, która zawiera okienka kolimacyjne źródła i detektorów. W tym celu sonda umieszczona jest na krótkim wysięgniku (ang.: *pad*) skonstruowanym w taki sposób by zapewnić mocny, jednostronny docisk sondy do ścianki otworu wiertniczego.



Rysunek 1. Schemat sondy gamma-gamma. Rysunek nie jest w skali, a podane rozstawy źródło-detektor przybliżone

3. Modele ośrodków skalnych (testowych)

Wszystkie symulacje przeprowadzone zostały w modelowych ośrodkach skalnych, których kształt, wymiary i skład chemiczny zostały zaproponowane przez geofizyków AGH. Trzy z tych materiałów, o nazwach BW, KW i L13, to modele ceramiczne skał o znanym składzie chemicznym. Modele te są dostępne na stanowisku kalibracyjnym w "Baza Geofizyki Wiertniczej w Zielonej Górze", który to ośrodek stanowi od wielu lat bazę doświadczalno-pomiarową Katedry Geofizyki AGH. Dla tych ceramicznych modeli dysponujemy więc także wynikami bezpośrednich pomiarów. Pozostałe materiały skalne modeli to łupki ilaste o tym samym składzie chemicznym szkieletu skały ale o różnych porowatościach, odpowiednio 2, 5, 9 i 15 %, a tym samym o różnych gęstościach objętościowych (po wysyceniu porów wodą).

	Rodzaj skały			
	BW	KW	L13	Łupki
Gęstość szkieletu [g/cm ³]	2.47	2.45	2.61	2.68
Porowatość [%]	23.81	16.55	60.00	2, 5, 9, 15
Skład chemiczny:	[% wagowy szkieletu skały]			
H ₂ O	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.24200E+00
CO ₂	6.57400E-01	6.04900E-01	7.06700E-01	3.62250E+00
SiO ₂	5.84718E+01	6.85623E+01	6.14751E+01	5.89951E+01
Al ₂ O ₃	3.67896E+01	2.51835E+01	3.36640E+01	1.34550E+01
Fe ₂ O ₃	1.56820E+00	8.41800E-01	1.11530E+00	5.69250E+00
CaO	8.37700E-01	7.70800E-01	9.00400E-01	4.65750E+00
MgO	4.09100E-01	2.94100E-01	4.91100E-01	3.10500E+00
Na ₂ O	2.92200E-01	1.45040E+00	3.27400E-01	5.17500E-01
K ₂ O	9.74000E-01	2.29220E+00	1.32000E+00	3.62250E+00
V ₂ O ₅				4.14000E-02
Cr ₂ O ₃				3.10500E-02
MnO				1.24200E-01
TiO ₂				6.21001E-01
C _{org}				2.48400E+00
S				1.65600E+00
Cl				1.03500E-01
U				7.45000E-04
Th				6.42000E-04
B				1.34550E-02
Li				4.14000E-03
Gd				6.21000E-04
Sm				5.18000E-04
Er				2.59000E-04
Ni				8.79800E-03
Suma:	1.00000E+02	1.00000E+02	1.00000E+02	9.99999E+01

Tabela 1. Podstawowe własności i składy chemiczne skał modeli testowych.

Składy chemiczne oraz podstawowe własności geofizyczne wszystkich zastosowanych w modelach skał zostały podane w Tabeli 1.

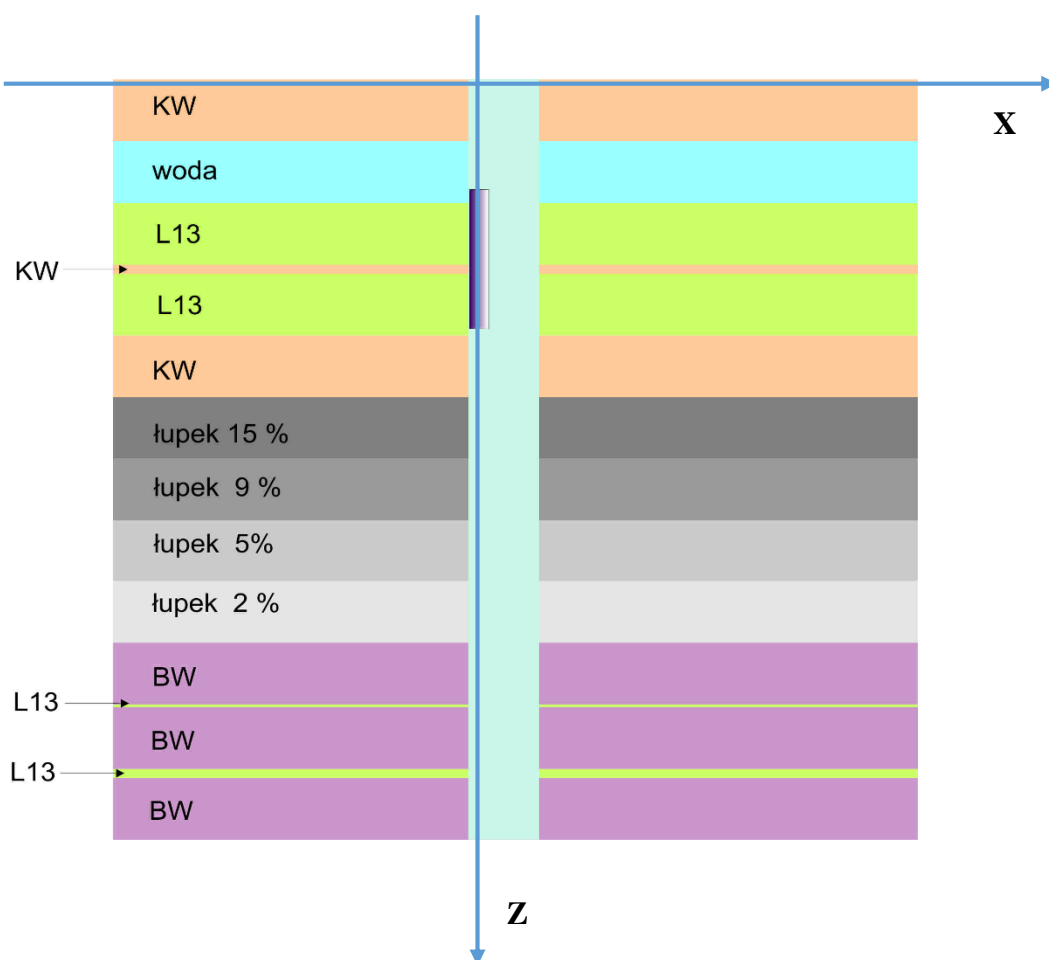
Do obliczeń sondy g-g zastosowane zostały dwa testowe modele, które w dalszej części raportu nazywane będą *Test-model-1* i *Test-model-2*. Generalnie, na model składają się równoległe, nakładające się kolejno na siebie warstwy skał o zmiennej wysokości i różnych własnościach geofizycznych. Jedynym nieskalnym materiałem użytym do konstrukcji modeli jest czysta chemicznie woda o gęstości 1 g/cm³. Czystą wodą wypełnione są również pory wszystkich, modelowych szkieletów skalnych. Sam model ma kształt walca, przez środek którego

przewiercony jest otwór wiertniczy o średnicy 180 mm, także wypełniony czystą wodą. Wymiary zewnętrzne walca są na tyle duże, że z punktu widzenia zasięgu kwantów gamma emitowanych przez źródło sondy stanowi on ośrodek nieskończony. Wzajemne położenie warstw oraz ich grubości dla obu modeli testowych zostały podane w Tabeli 2. Szkic modelu Test-model-1, z zachowaniem proporcji grubości warstw przedstawiono na Rysunku 2. Model ten jest identyczny z modelem zastosowanym do testowania sond neutronowych (porównaj z [3]). Test-model-2 różni się od Test-model-1 jedynie grubością kolejnych warstw. Wprowadzono go dodatkowo do testów sondy g-g z uwagi na znacznie mniejszy niż w sondach neutronowych rozstaw źródło-detektor. Można przyjąć, iż model testowy to nic innego jak znajdujący się pod powierzchnią ziemi fragment warstwowej struktury geologicznej. Górna powierzchnia najwyższej położonej warstwy modelu (KW) stanowi "poziom zero" tej struktury. Dno najniższej położonej warstwy (BW) kończy formalnie zakres modelu. Położenie sondy względem modelu, tj. współrzędne położenia jej źródła i detektorów, odnosić się będą zawsze do *poziomu zero*. Innymi słowy, powierzchnię *poziomu zero* definiujemy jako płaszczyznę *XY* układu współrzędnych. Oś *Z* układu, będąca jednocześnie geometryczną osią sondy, jest skierowana w dół, tj. w głąb ziemi. Tym samym, współrzędne "z" warstw modelu mają dodatnie wartości i patrząc z góry na dół - zgodnie z kierunkiem osi *Z* - rosną wraz z głębokością. Zgodnie ze stosowanym w geofizyce nazewnictwem, współrzędną "z" w tak zdefiniowanym układzie współrzędnych będziemy nazywać *głębokością prawdziwą*. W czasie pomiaru sondę opuszcza się w głąb otworu wiertniczego w taki sposób, że źródło znajduje się "u dołu sondy", a detektory "u góry sondy". Oznacza to, iż w zdefiniowanym układzie współrzędnych, współrzędna źródła z_s jest zawsze większa od współrzędnej detektora bliskiego z_1 , a ta ostatnia zawsze większa od współrzędnej detektora dalekiego, z_2 . W szczególności, gdy źródło znajduje się w pozycji startowej (*poziom zero*), współrzędne obu detektorów, z_1 i z_2 , przyjmują wartości ujemne, ich *głębokość prawdziwa* jest ujemna (patrz także Tabela 4 w Appendix). W uzupełnieniu modelu, koniecznym z punktu widzenia symulacji MC, przyjmujemy, iż obszary powyżej/poniżej formalnego zakresu modelu testowego wypełnione są takim samym materiałem skalnym jaki zawierają skrajne warstwy tego modelu, tzn. obszar powyżej *poziomu zero* wypełnia skała KW, a obszar poniżej dna modelu testowego - skała BW. W praktyce oznacza to, iż wyniki symulacji w pobliżu granic modelu będą bardzo podobne do wyników symulacji w ośrodkach jednorodnych: KW (u góry) i BW (u dołu). Dotyczy to zwłaszcza pierwszego z modeli testowych, Test-model-1, którego skrajne warstwy są ponad dwukrotnie grubsze niż odpowiednie warstwy Test-model-2.

Model testowy jest tak skonstruowany, aby z jednej strony dać możliwość porównania symulacji MCNP z pomiarami na stanowisku kalibracyjnym w Zielonej Górze, z drugiej zaś uzyskać wstępną ocenę wskazań sond w ośrodku odpowiadającym łupkom ordowicko – sylurskim rejonu Wejherowa [9].

Tabela 2. Położenie i grubości warstw w modelowych, testowych ośrodkach skalnych.

Warstwa	Test-model-1			Test-model-2		
	od [cm]	do [cm]	h [cm]	od [cm]	do [cm]	h [cm]
KW	0.0	100.0	100.0	0.0	45.0	45.0
Woda	100.0	200.0	100.0	45.0	90.0	45.0
L13	200.0	300.0	100.0	90.0	135.0	45.0
KW	300.0	315.0	15.0	135.0	150.0	15.0
L13	315.0	415.0	100.0	150.0	155.0	5.0
KW	415.0	515.0	100.0	155.0	160.0	5.0
łupek 15%	515.0	615.0	100.0	160.0	205.0	45.0
łupek 9%	615.0	715.0	100.0	205.0	250.0	45.0
łupek 5%	715.0	815.0	100.0	250.0	295.0	45.0
łupek 2%	815.0	915.0	100.0	295.0	340.0	45.0
BW	915.0	1015.0	100.0	340.0	345.0	5.0
L13	1015.0	1022.5	7.5	345.0	360.0	15.0
BW	1022.5	1122.5	100.0	360.0	375.0	15.0
L13	1122.5	1137.5	15.0	375.0	380.0	5.0
BW	1137.5	1237.5	100.0	380.0	425.0	45.0



Rysunek 2. Test-model-1, szkic układu wsp. i geometrii profilowań testowych.

4. Obliczenia

Wszystkie obliczenia zostały przeprowadzone przy pomocy piątej generacji programu MCNP, tj. MCNP5 (w wersji 1.60). Do estymacji ilości zliczeń detektorów sondy zastosowana metoda histogramowania energii deponowanej w objętości czynnej detektorów (u nas są to kryształy NaJ o różnych wymiarach), w literaturze programu znanej powszechnie jako „*tally 8*”. W wyniku tej procedury otrzymuje się rozkłady energii deponowanej w objętości danego detektora, które w pełni odpowiadają histogramom liczby zliczeń jakie obserwujemy zazwyczaj na monitorach spektrometrów wielokanałowych. Stąd też zapewne rozkłady generowane przez *tally 8* nazywane są rozkładami wielkości impulsu (ang. *pulse high distribution*).

Prócz najważniejszych w przypadku oddziaływań elektro-magnetycznych zjawisk fizycznych, tj. absorpcji fotoelektrycznej, rozpraszania Comptonowskiego, kreacji par elektron-pozyton, program może uwzględniać opcjonalnie wiele mniej istotnych zjawisk i procesów fizycznych (np. detaliczne obliczenia strat energii cząstek naładowanych na jonizację), co pozwala na prowadzenie symulacji transportu promieniowania z dużą precyzją. Na ogół, związane jest to jednak ze znacznym wydłużeniem czasu obliczeń i konieczne staje się ustalenie pewnego złotego środka.

Oprócz rozkładów energii deponowanej w detektorach (energii liczonej osobno dla każdego, indywidualnego fotonu źródła przy pomocy *tally 8*), wyznaczone zostały także globalne, statystyczne rozkłady strumieni fotonów w detektorach (*tally 4*) oraz wynikające z nich (po scałkowaniu z odpowiednimi przekrojami czynnymi) średnie ilości reakcji fotoabsorpcji i całkowite ilości reakcji w objętościach detektorów (ang. *total reaction rate*).

Obliczenia wykonano na klastrze komputerów *McRadiat* w Zakładzie Fizyki Transportu Promieniowania (NZ54) IFJ PAN.

5. Wyniki obliczeń

Poniżej przedstawione są jedynie najważniejsze wyniki testów sondy g-g, wszystkie z nich uzyskano przy pomocy metody estymacji *tally 8*. W przypadku każdej z symulacji emitowano tę samą liczbę fotonów źródła, $n_{ps}=1E+09$ (1 mld), emitowanych izotropowo w pełny kąt bryłowy 4π [sr]. Tak więc, jednostki oznaczone w tabelach i na rysunkach w uproszczony sposób jako [imp] oznaczają faktycznie "ilości impulsów w danym przedziale energii, przypadających na 1 mld cząstek źródłowych, emitowanych w 4π [sr]".

5-a. Tło własne sondy.

W pierwszej kolejności zbadane zostało tło własne sondy, tj. ilość tych fotonów źródła dochodzących do detektorów (i deponujących tam pewną ilość energii), które w trakcie transportu nie opuściły objętości sondy. Tego typu stałe tło będzie występować w przypadku każdego pomiaru (także każdej symulacji) i jego znajomość do prawidłowej interpretacji wyniku pomiaru/symulacji jest nieodzowna. Doświadczalne zmierzenie tła własnego sondy nie jest proste. Można je jedynie aproksymować, np. umieszczając sondę w powietrzu, w dużej odległości od wszelkich innych obiektów materialnych. Symulację komputerową tła własnego

sondy można natomiast przeprowadzić z bardzo dużą dokładnością i to w banalnie prosty sposób. Wystarczy w tym celu skorzystać z własności specjalnego rodzaju "materiału" jakim w obliczeniach MC jest tzw. zewnętrzna, pochłaniająca próżnia (ang. *blackhole*). Historia każdej z cząstek, która w trakcie transportu znajdzie się w przestrzeni wypełnionej przez *blackhole* zostaje automatycznie zakończona - cząstka nie jest transportowana dalej. W różnych programach MC powyższy mechanizm "zabijania cząstek" może być realizowany w różny sposób, jednak niezależnie od zastosowanej techniki sama idea i jej wynik są identyczne. Rozważono osobno dwa praktyczne przypadki:

1. Sonda, jako taka, umieszczona jest w idealnej, zewnętrznej próżni
2. Sonda umieszczona jest w otworze wiertniczym wypełnionym wodą i dosunięta do ściany otworu (tak jak ma to miejsce w czasie zwykłego pomiaru czy symulacji), ale na zewnątrz otworu znajduje się idealna próżnia - *blackhole*. Tak więc transport na drodze źródło-detektor, na zewnątrz sondy, może odbywać się jedynie w obrębie otworu wiertniczego.

W pierwszym przypadku uzyskano dla obu detektorów, zarówno bliskiego jak i dalekiego, zerowe ilości zliczeń (przy emisji 1 mld fotonów źródła). Oznacza to, iż materiał konstrukcyjny sondy (wolfram) osłania detektory niemal idealnie. Emitowane ze źródła kwanty gamma, nawet te emitowane bezpośrednio w kierunku detektora bliskiego, są w całości absorbowane. I nic w tym specjalnie dziwnego, gdyż średnia droga swobodna w wolframie w rozpatrywanym zakresie energii kwantów gamma (poniżej 660 keV) wynosi ok. 4 mm, a warstwa wolframu pomiędzy źródłem a detektorami to wiele centymetrów.

W drugim przypadku uzyskano jedynie kilka zliczeń, a dokładnie: zero zliczeń w detektorze bliskim i 9 zliczeń w detektorze dalekim (zliczając ponownie w pełnym zakresie energii, przy 1 mld emitowanych fotonów źródła). Oczywiście, tak niska ilość zliczeń w tym przypadku (sonda wewnątrz wypełnionego wodą otworu wiertniczego) jest wynikiem tylko tego, że sondę dosunęliśmy do ściany otworu stroną zawierającą okienko w wolframowej osłonie źródła (patrz opis sondy w rozdziale 2). Tym samym, prawie wszystkie wylatujące przez okienko źródła fotony trafiają niemal bezpośrednio w pochłaniającą próżnię - *blackhole* - na zewnątrz otworu, gdzie ich historia się kończy. Wystarczyłoby jednak odsunąć sondę od ściany, w kierunku osi otworu, by sytuacja uległa drastycznej zmianie, gdyż kwanty gamma transportują się w wodzie, jako takiej, znakomicie, co można będzie zobaczyć w podanych dalej wynikach dla ośrodków jednorodnych. W każdym bądź razie uzyskany wynik oznacza, iż obudowa sondy jest "szczelna", tzn. do detektorów docierają jedynie te fotony, które opuściły źródło przez okienko w wolframowej osłonie.

Reasumując, uzyskane wyniki oznaczają, iż w czasie rutynowych symulacji/pomiarów, tzn. takich gdy na zewnątrz otworu znajduje się skalny ośrodek materialny a sonda dociśnięta jest prawidłowo do ściany otworu, fotony źródła mogą dotrzeć do detektorów jedynie drogą serii kolejnych zderzeń z atomami ośrodka otaczającego otwór wiertniczy. Mówiąc językiem obrazowym: sonda g-g w praktyce rejestruje jedynie te kwanty gamma, które "widziały ośrodek skalny na zewnątrz otworu wiertniczego, miały wcześniej z atomami tego ośrodka styczność". To ważny i bardzo optymistyczny wynik, gdyż daje nam mocne podstawy do wiary, że rejestrowane cząstki, ich ilości, rozkłady i energie, w pierwszej kolejności przynoszą informację o własnościach interesującego nas ośrodka. I nawet jeśli nie jest to informacja pełna, to przynajmniej nie jest zafałszowana. W przypadku sond neutronowych sytuacja na ogół nie jest tak prosta, klarowna i jednoznaczna.

5-b. Wydajności detektorów

W przypadku każdego detektora promieniowania niezwykle istotną sprawą jest jego wydajność (ang. *efficiency*), tj. stosunek ilości cząstek przez ten detektor rejestrowanych do całkowitej ilości cząstek docierających do objętości detektora. Wydajność detektorów rzeczywistych, fizycznych jest problemem złożonym, zależnym od wielu czynników, przede wszystkim od samej zasady działania detektora, rodzaju, natężenia i energii promieniowania, i wielu, wielu innych. Sprawie wydajności detektorów poświęcono dziesiątki lat badań i setki prac.

Problem wydajności detektorów występuje także w przypadku symulacji komputerowych i idealnych pod każdym względem, zdawałoby się, detektorów wirtualnych. Detektory symulowane faktycznie są idealne, w tym znaczeniu, iż nie rejestrują białego szumu, naturalnego tła, etc., zliczają precyzyjnie ustalone wielkości, zgodnie z ustalonym algorytmem. Wydajność detektora występuje tu w nieco innym znaczeniu i dotyczy tylko *pulse high distribution*, tj. algorytmu zliczania *tally 8*. Chodzi po prostu o fakt, iż nie wszystkie cząstki docierające do objętości czynnej detektora deponują w nim energię i tym samym nie wszystkie z nich wnoszą wkład do wyznaczanego histogramu. Zdarza się tak najczęściej wówczas gdy cząstka jedynie "zahacza" o detektor, a mówiąc precyzyjniej, gdy średnia droga swobodna cząstki w detektorze jest znacznie większa od geometrycznej długości jej, pozostawionego w detektorze, śladu. Można jednak ze stuprocentową dokładnością wyliczyć tę wirtualną wydajność. Program MCNP w każdym przypadku użycia estymatora *tally 8* zlicza osobno wszystkie takie przypadki gdy kwant gamma (czy elektron) o danej energii dotarł do detektora, przeciął jego geometryczną objętość, a następnie z tą samą energią go opuścił i tym samym nie zdeponował w detektorze energii.

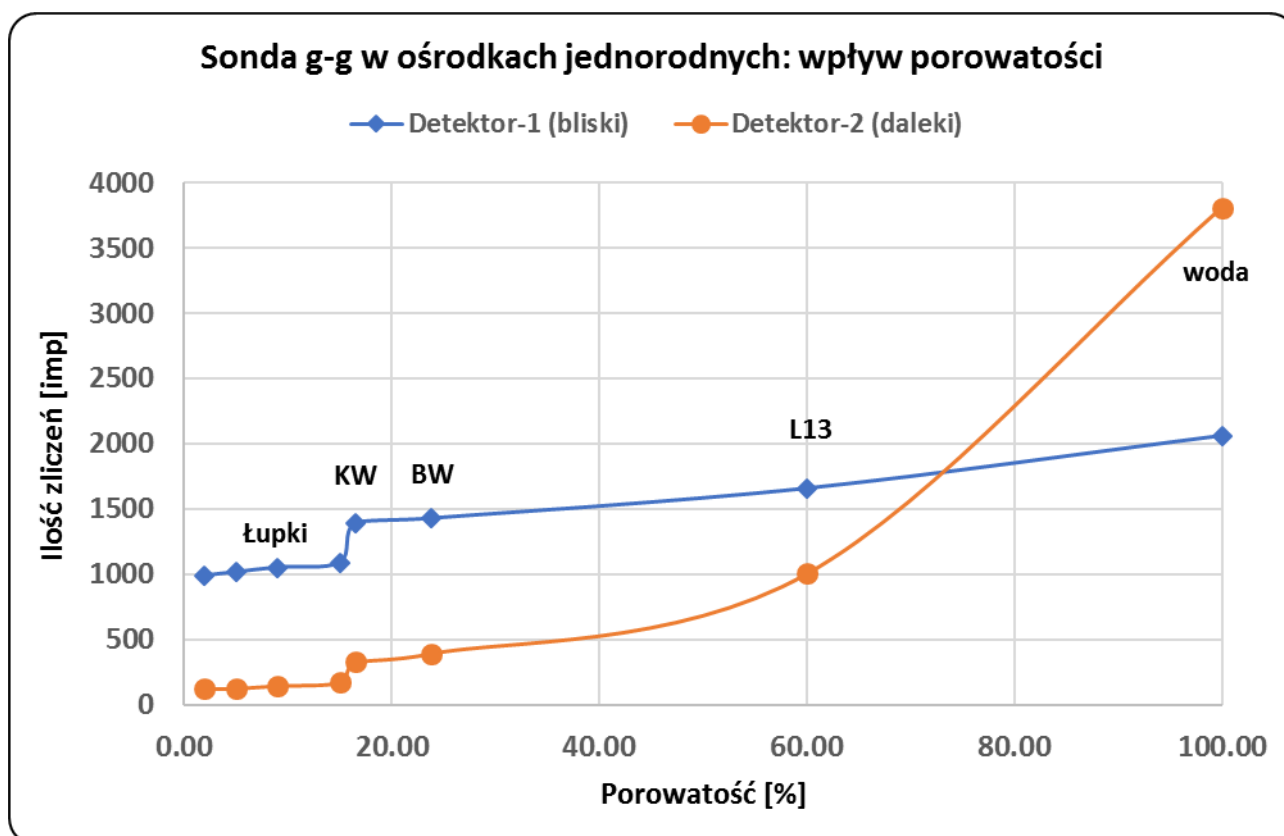
Wydajności detektorów, tj. wyrażony w procentach stosunek liczby cząstek deponujących w detektorze energię do liczby wszystkich cząstek docierających do detektora, zostały wyznaczone dla wszystkich przeprowadzonych symulacji. Wyniki dla ośrodków jednorodnych podano w Tabeli 3, a dla Test-model-2 w Tabeli 4 w Appendix (zostały tam oznaczone odpowiednio przez *Eff_1* i *Eff_2*). Generalnie, wydajności wirtualnych detektorów, zliczających cząstki wg procedury *tally 8*, są wysokie i mieszczą się w granicach od ok. 90% do ok. 96-98%. Zarówno w Tabeli 3 jak i 4 widoczne są wyraźne i systematyczne, choć z definicji ilościowo niezbyt duże, różnice wydajności detektorów bliskiego i dalekiego. Najprawdopodobniej, w pierwszej kolejności, wynikają one z różnej wielkości kryształów NaJ oraz całkowicie różnego kształtu kolimatorów wlotowych obu tych detektorów. Niewątpliwie wpływ wywiera także inny kształt widma kwantów gamma rejestrowanych w detektorach bliskim i dalekim. Można zaobserwować także wyraźne zmiany i wahania wydajności w okolicach przejścia sondy przez granice warstw. można zauważyć także korelację wydajności z porowatością ośrodka. Jednak wszystkie te zmiany, choć dość systematyczne, mieszczą się w granicach statystycznych błędów zliczeń, co zdecydowanie zniechęca do formułowania zbyt daleko idących wniosków.

5-c. Ośrodki jednorodne

Tabela 3 zawiera całkowite liczby zliczeń sondy gamma-gamma w ośrodkach jednorodnych poszczególnych materiałów, wchodzących w skład modeli testowych. Podobnie jak w przypadku modeli warstwowych każdy z ośrodków materiałowo jednorodnych został przecięty otworem wiertniczym o średnicy 180 mm, wypełnionym czystą wodą. Podobnie również jak w przypadku modeli testowych, rozmiary geometryczne ośrodków przyjęto na tyle duże by z punktu widzenia transportu kwantów gamma, a dokładniej - zasięgu kwantów gamma w materii danego ośrodka, objętości ośrodków stanowiły obszary quasi-nieskończone. Wyniki podane w Tabeli 3 zostały zobrazowane na Rysunku 3. Liczby zliczeń wirtualnej sondy przedstawiono tam w funkcji porowatości ośrodka.

Tabela 3. Całkowite ilości zliczeń oraz wydajności detektorów sondy g-g w ośrodkach jednorodnych.

Material	Gęstość	Porowatość	Detektor-1 (bliski)			Detektor-2 (daleki)		
	[g/cm ³]		Zliczeń [imp]	Błąd [imp]	Wydajność [%]	Zliczeń [imp]	Błąd [imp]	Wydajność [%]
woda	1.00	100.00	2062	45	93.9	3808	62	96.7
L13	1.65	60.00	1659	41	92.1	1005	32	95.3
BW	2.12	23.81	1429	38	92.2	393	20	94.2
KW	2.21	16.55	1392	37	91.9	328	18	94.0
Lupek_15%	2.43	15.00	1091	33	91.1	173	13	93.5
Lupek_9%	2.53	9.00	1053	32	91.1	147	12	92.5
Lupek_5%	2.60	5.00	1018	32	91.4	127	11	93.4
Lupek_2%	2.65	2.00	991	31	90.9	124	11	95.4



Rysunek 3. Całkowita ilość zliczeń sondy g-g w funkcji porowatości ośrodka.

Widoczny na wykresach Rysunku 3 wyraźny skok liczby impulsów przy minimalnej zmianie porowatości na granicy "łupki - skała KW", gdzie porowatość zmienia się jedynie z 15% do 16.5%, niewątpliwie związany jest z istotną zmianą składu izotopowego tych sąsiadujących, na skali porowatości, materiałów (patrz Tabela 2 i porównaj składy łupków ze składami wzorców KW, BW, czy L13). Ten ilościowy skok pojawia się wyraźnie zarówno na wykresie detektora bliskiego jak i dalekiego, trudno więc szukać przyczyny w istotnie różnej konstrukcji okienek wlotowych obu detektorów, czy też w dużej różnicy w rozstawach źródło-detektor.

Prócz tego skały łupkowe bardzo słabo reagują na wzrost porowatości. przy wzroście porowatości o czynnik ponad 7 (Łupek_2% vs Łupek_15%) ilość zliczeń rośnie raptem o ok. 10% (dla detektora bliskiego). W przypadku detektora dalekiego ten wzrost zliczeń z porowatością jest większy, choć pojawia się dopiero przy porowatości ok. 10%. Wskazania detektora dalekiego dla Łupek_2% i Łupek_5% (wzrost porowatości o czynnik 2.5) praktycznie się nie różnią. Widoczna jest także wyraźnie duża, jakościowa różnica pomiędzy detektorem bliskim a dalekim. W przypadku detektora bliskiego krzywa zliczeń rośnie z porowatością niemal liniowo, w przypadku detektora dalekiego krzywa ta ma wyraźny, potęgowy charakter, przynajmniej w zakresie wyższych porowatości. Dla czystej wody wskazania detektora dalekiego są nawet wyższe niż detektora bliskiego, i to aż o czynnik dwa. Te różnice pomiędzy detektorami, jednakże, zdają się nie dotyczyć skał łupkowych, a jedynie wzorców ceramicznych KW, BW, L13 i wody.

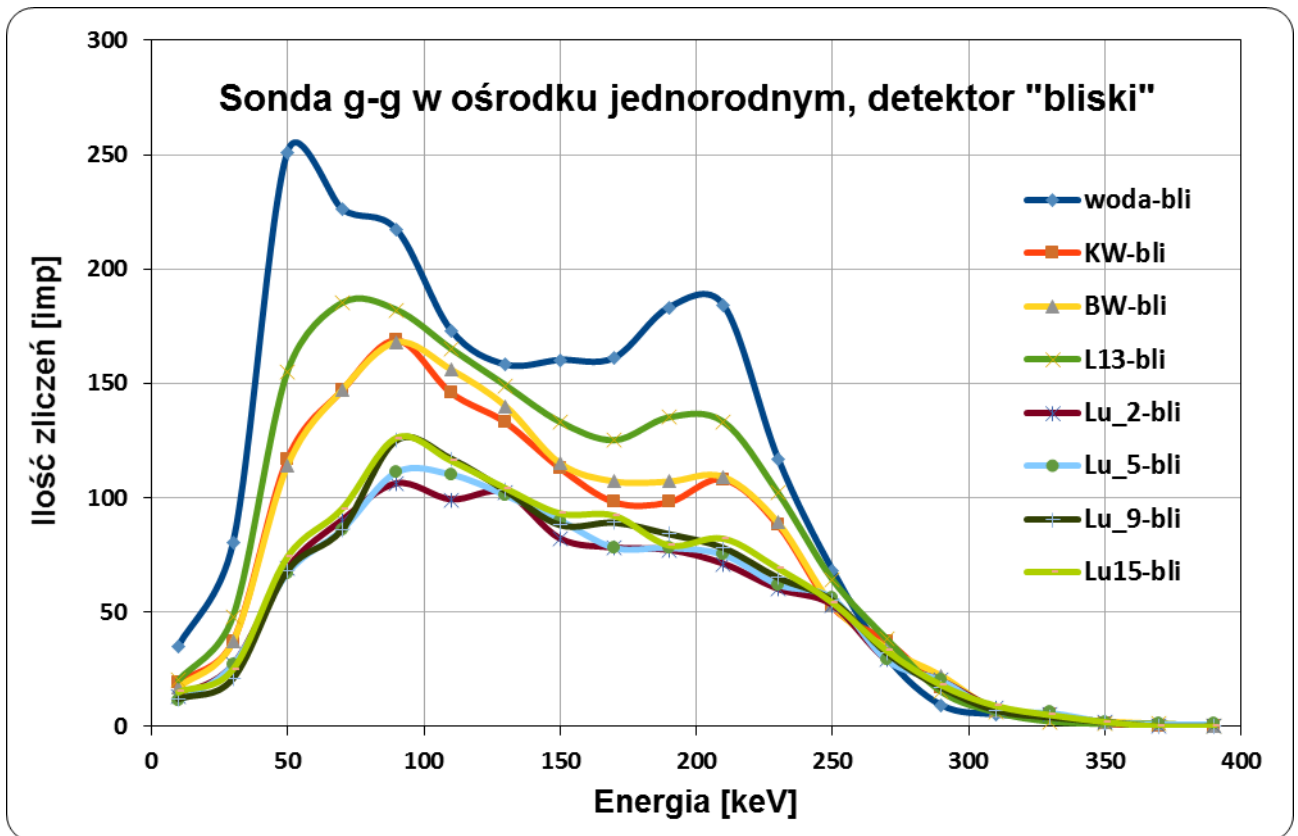
By uwydatnić powyższe wyniki, na serii kolejnych rysunków przedstawione zostały rozkłady tych ilości zliczeń, których sumaryczne wartości podane zostały w Tabeli 3 i/lub na Rysunku 4.

Rysunki 4 i 5 zawierają rozkłady energii deponowanej w detektorach bliskim (Rysunek 4) i dalekim (Rysunek 5) sondy g-g umieszczonej w otworze wiertniczym otoczonym jednorodnym, quasi-nieskończonym ośrodkiem materiałowym - jednym z ośmiu z zastosowanych do konstrukcji testowych modeli skalnych. By móc porównać bezpośrednio kształty krzywych, na kolejnych dwóch rysunkach (6 i 7) przedstawiono trzy wybrane rozkłady dla materiałów reprezentatywnych dla całego zakresu porowatości, tj. dla wody, KW oraz Łupek_2%, po znormalizowaniu ich do jedności. Na ostatnim z serii, Rysunku 8, zestawiono znormalizowane rozkłady dla czystej wody - jedynie po to by dla tego specyficznego ośrodka uwydatnić różnicę pomiędzy detektorem bliskim a dalekim.

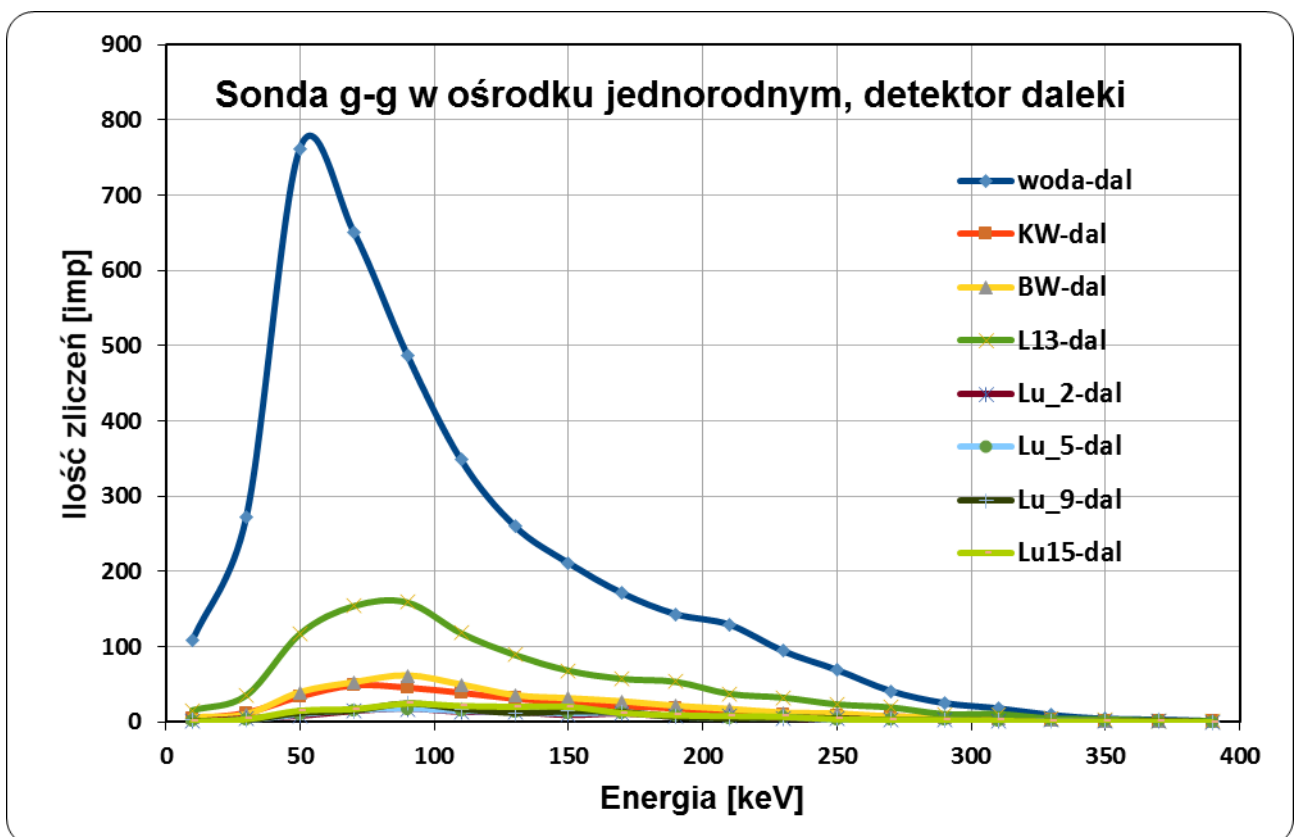
Rzucają się w oczy dwie sprawy:

1. Różnice w kształcie rozkładów obserwowanych w detektorze bliskim i dalekim
2. Różnice pomiędzy kształtem rozkładów skał łupkowych i innych - niezależnie od rodzaju detektora

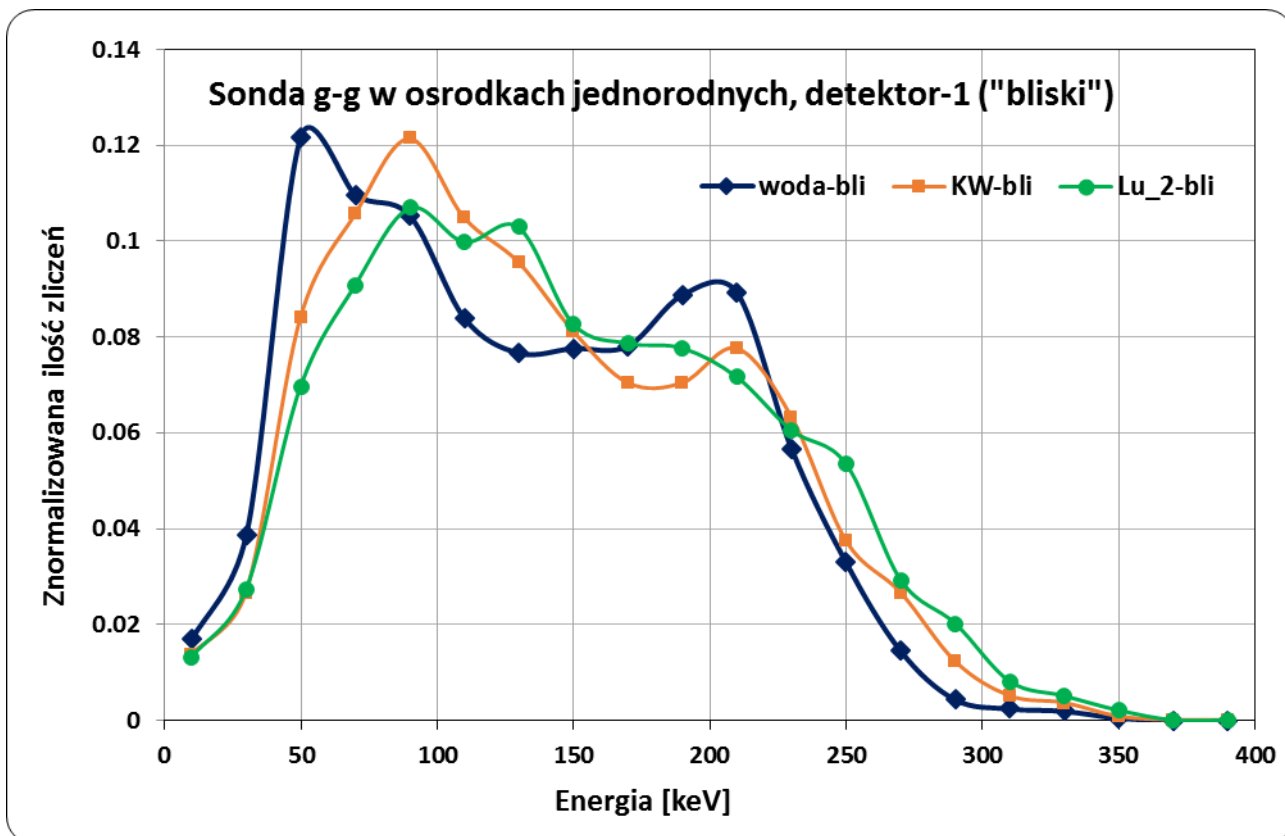
W przypadku materiałów niebędących łupkami kształty rozkładów w detektorze bliskim są bimodalne, z szerokim maksimum przy energii 50-100 keV, oraz niższym ale również wyraźnym maksimum w okolicach 200 keV. Rozkłady detektora dalekiego są natomiast jednomodalne, wtórne maksimum znika niemal całkowicie, pierwsze jest tym samym jeszcze bardziej wyraźne i wydaje się pozostawać w tej samej pozycji (50-100 keV) co na wykresach detektora bliskiego. Widma detektora dalekiego są gładkie, a widmo wody zdecydowanie dominuje. W przypadku obu detektorów rozkłady dość wyraźnie "miękną" wraz ze wzrostem porowatości ośrodka (widmo przesuwają się w lewo, w stronę niższych energii).



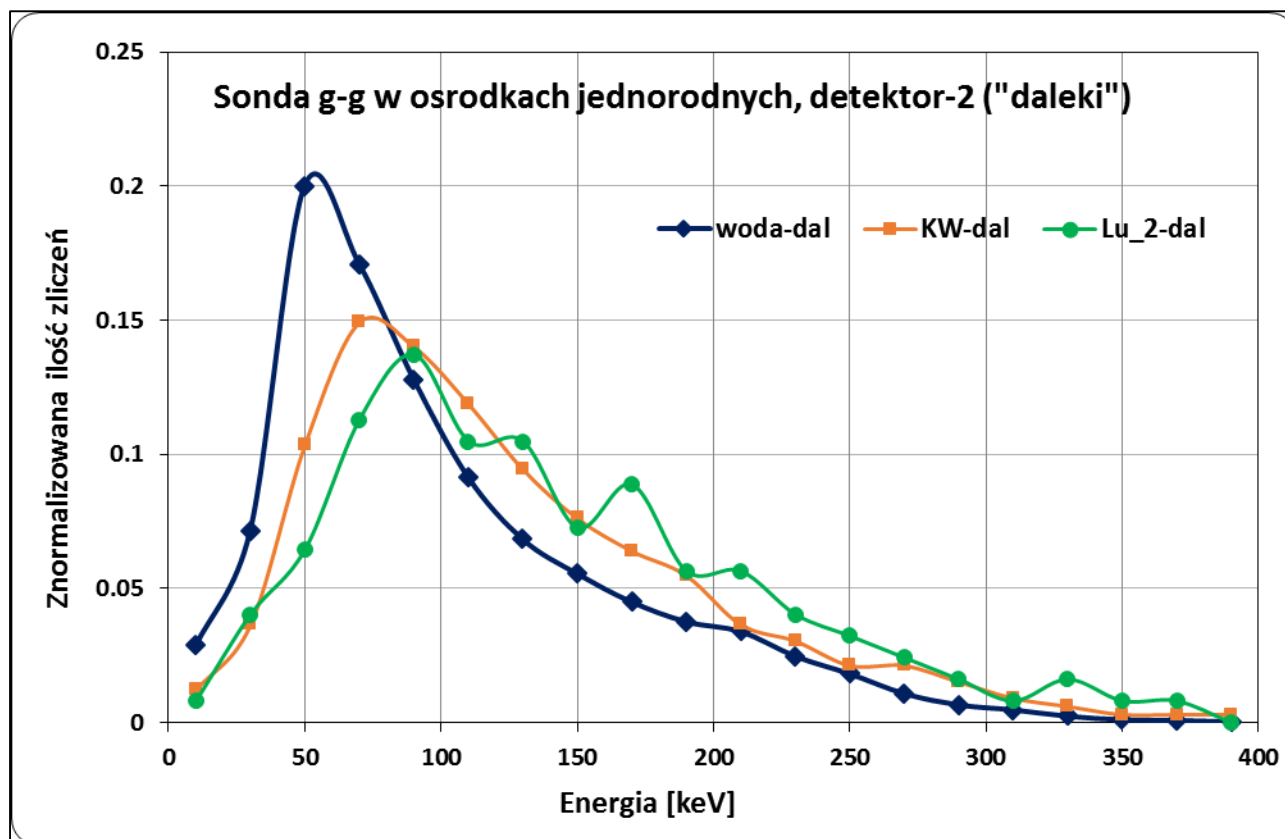
Rysunek 4. Rozkłady energii deponowanej w kryształach NaJ detektora bliskiego.



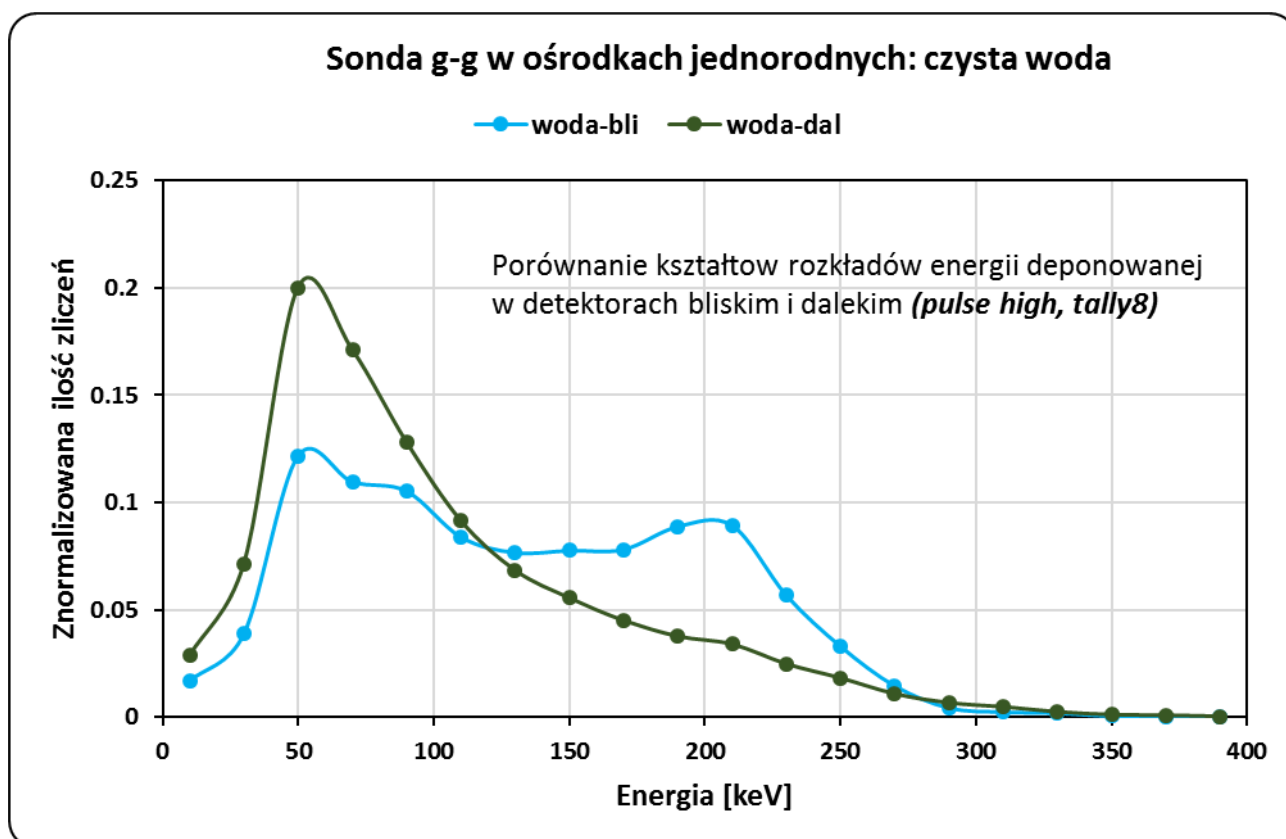
Rysunek 5. Rozkłady energii deponowanej w kryształach NaJ detektora dalekiego.



Rysunek 6. Znormalizowane rozkłady energii deponowanej w detektorze bliskim dla trzech wybranych ośrodków o wyraźnie różnej porowatości.



Rysunek 7. Znormalizowane rozkłady energii deponowanej w detektorze dalekim dla trzech wybranych ośrodków o wyraźnie różnej porowatości.



Rysunek 8. Znormalizowane rozkłady energii deponowanej w kryształach NaJ detektorów bliskiego i dalekiego dla przypadku maksymalnej porowatości ośrodka (czysta woda).

Dla skał łupkowych sytuacja wydaje się być znacznie bardziej złożona. W przypadku obu detektorów wykresy niemal nakładają się na siebie, niezależnie od porowatości. Widma są wyraźnie twardsze, przesunięte w stronę wyższych energii. Widma te są również szerokie, o wyraźniejszym maksimum (w okolicy 100 keV) można mówić w zasadzie jedynie w przypadku Łupek_9% i Łupek_15%. Prócz tego, rozkłady te nie są gładkie, sprawiają raczej wrażenie rozkładów wielomodalnych, co wyraźnie jest widoczne zwłaszcza w detektorze dalekim. Wszystko na to wskazuje, iż do zbadania tej ciekawej sprawy konieczne będą obliczenia ze znacznie lepszą statystyką zliczeń i większą rozdzielczością, co oczywiście oznacza także znacznie dłuższe czasy obliczeń.

5-d. Profilowanie

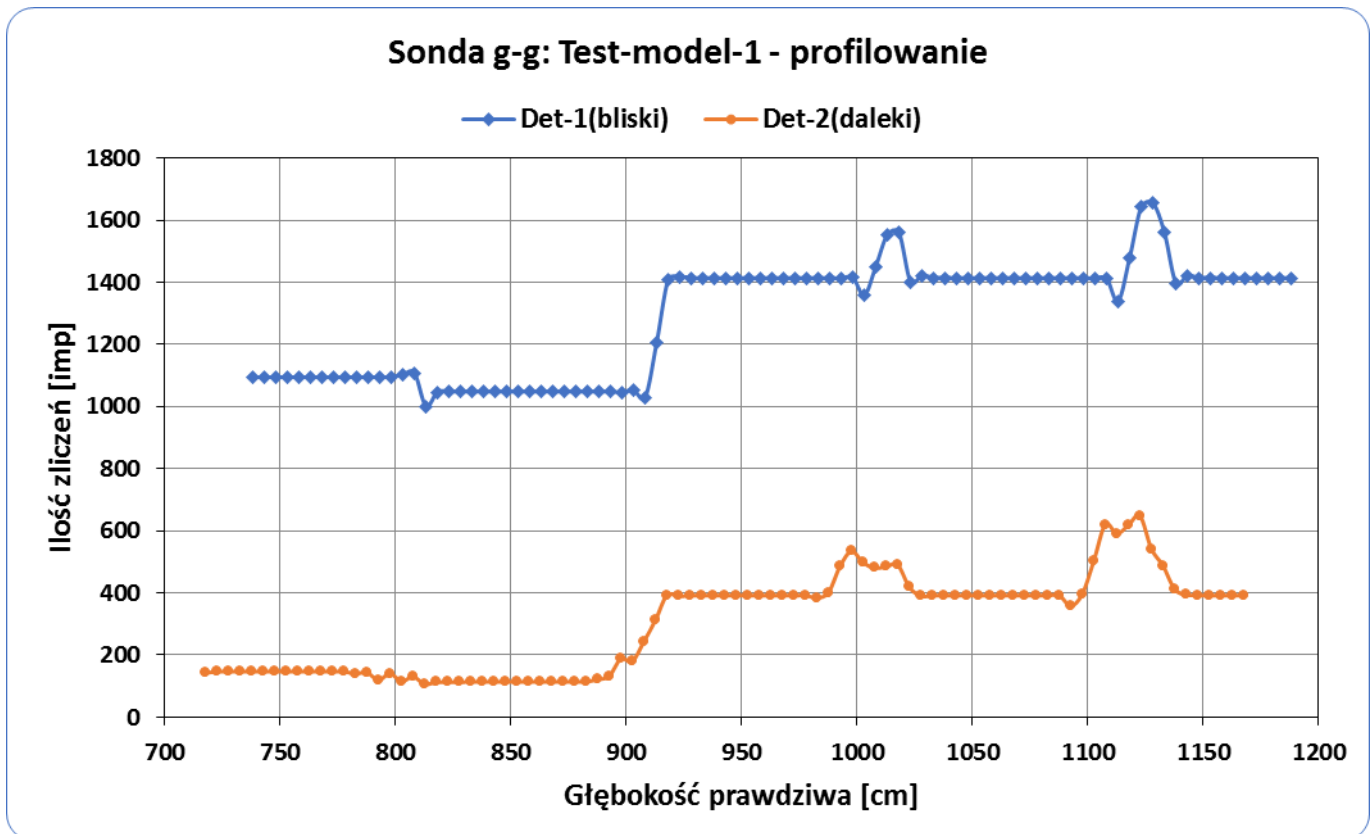
Zasadniczy wynik obliczeń z użyciem utworzonego, cyfrowego modelu sondy gamma-gamma, przeprowadzonych w testowych modelach skał Test-model-1 i Test-model-2, przedstawiają Rysunki 9, 10 i 11. Rysunek 9 zawiera końcowy wynik symulacji profilowania w Test-model-1. Profilowanie przeprowadzono w szerokim zakresie, bo prawie 5 metrów (od $z_s=750$ cm do $z_s=1200$ cm, z krokiem 5 cm). Sonda przesuwana jest w otworze wiertniczym modelu (o średnicy 180 mm) pionowo w dół, wzdłuż kolejnych warstw. W każdym położeniu, co 5 cm, zbierane jest widmo energetyczne impulsów generowanych w detektorach sondy. Każde nowe położenie sondy względem warstw modelu oznacza kolejny przebieg programu MCNP. Krzywe na Rysunku 9 zawierają ilości zliczeń detektorów sondy g-g w funkcji głębokości prawdziwej detektorów. Są to całkowite liczby zliczeń uzyskane w wyniku zsumowania widma w całym zakresie deponowanych energii, czyli w tzw. pełnym oknie pomiarowym. Ponieważ

dla każdego położenia sondy dysponujemy pełnym widmem impulsów, możliwe jest ustalenie innej szerokości okna, tj. przedziału energii, czy nawet kilku okien, i zsumowanie impulsów z ograniczeniem do danego okna/okien.

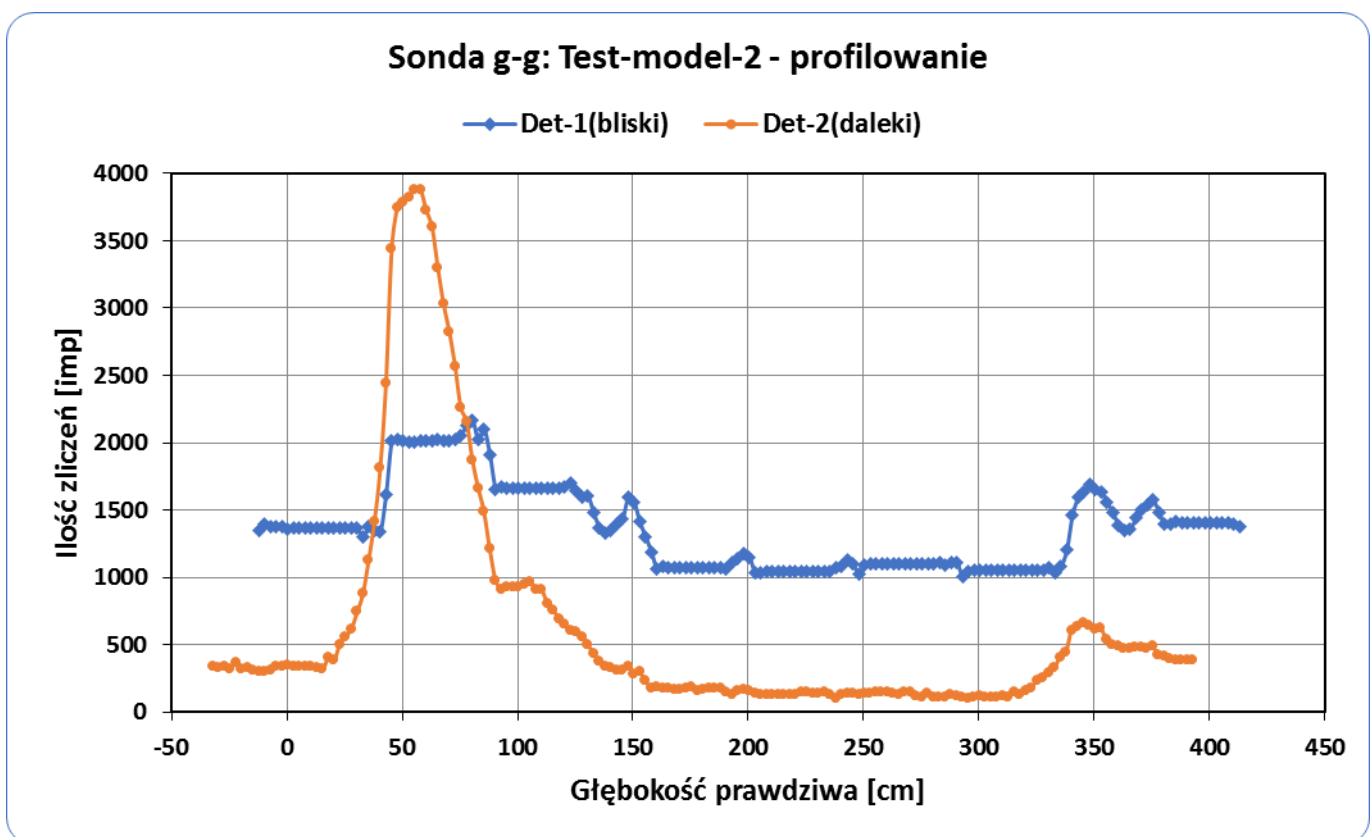
Na Rysunku 10 przedstawiono analogiczny do powyższego wykres, uzyskany dla Test-model-2. W tym modelu, w porównaniu do poprzedniego, znacznie zredukowano grubości warstw, tak, że wysokość całego modelu została pomniejszona prawie trzykrotnie. Sonda g-g wykazuje znacznie niższą rozdzielczość pionową niż sondy neutronowych i wiele kolejnych obliczeń przy przesuwaniu sondy wzdłuż grubych warstw nie wносиło niczego nowego. Widać to zresztą wyraźnie na wykresie profilowania Test-model-1. Po redukcji grubości warstw do postaci Test-model-2 możliwe stało się też ("możliwe", w sensie ilości czasu potrzebnego do przeprowadzenia obliczeń) profilowanie całości modelu, tj. od $z_s=0$ cm do $z_s=425$ cm, z krokiem 2.5 cm. Wykres jest wyraźnie zdominowany przez wielkość ilości zliczeń detektora dalekiego w obszarze warstwy wody. Wartości numeryczne liczb z Rysunku 10 zawarte są w Tabeli 4, w Appendix, na końcu raportu.

Rysunek 11, choć formalnie zawiera te same dane co Rysunek 10, jest moim zdaniem bardzo poglądowy. Wykresy profilowania zostały na nim przedstawione nie w funkcji faktycznego, fizycznego położenia detektorów z_1 i z_2 , ale w funkcji położenia źródła z_s . Wskazania detektora nie tyle bowiem oddają własności ośrodka znajdującego się w danej chwili na wysokości detektora, ile własności tego obszaru, który w danej chwili znajduje się pomiędzy źródłem a detektorem. W celu łatwiejszego rozumienia co dzieje się na wykresach zliczeń, na rysunku zaznaczono dodatkowo profil gęstościowy Test-model-2 (jego oś wartości widoczna jest po prawej stronie rysunku). Patrząc na wykresy Rysunku 11 możemy sobie wyobrazić, że faktycznie patrzymy na monitor, na których prócz aktualnego położenia źródła sondy wyświetlają się jednocześnie aktualne, bieżące liczby zliczeń detektorów bliskiego i dalekiego, będących oczywiście w tym momencie gdzie indziej, tj. pod inną współrzędną. Trzeba przy tym pamiętać, że gdy źródło znajduje się na wykresie w punkcie np. $z_s=55$ cm, to detektor bliski znajduje się wówczas na tym wykresie ok. 10-12 cm "na lewo od źródła", a detektor daleki jeszcze bardziej na lewo i to aż o ok. 30 cm. Na wykresie Rysunku 11 widzimy więc, że gdy współrzędna źródła z_s osiąga wartość ok. 55 cm zliczenia detektora bliskiego zaczynają gwałtownie rosnać. Dzieje się tak dlatego, gdyż przy tym położeniu źródła, detektor bliski zaczyna "wychodzić z cienia warstwy KW" i całość obszaru pomiędzy źródłem a detektorem bliskim jest już wypełniona wodą. W tym samym momencie ($z_s=55$ cm) wskazania detektora dalekiego dopiero zaczynają rosnać, detektor daleki dopiero zaczyna odczuwać to, że źródło jest już na wysokości warstwy wody, on sam jest jeszcze ciągle pod wpływem warstwy KW o znacznie większej od wody gęstości. Na dalszym odcinku zmiennej z_s , aż do ok. 90 cm (koniec warstwy wody) wskazania detektora dalekiego systematycznie rosna - pomiędzy źródłem a detektorem dalekim systematycznie zwiększa się frakcja warstwy wody kosztem warstwy KW. W tym samym czasie na wykresie detektora bliskiego już nic ciekawego się nie dzieje, wskazania detektora są na stabilnym plateau. Z oczywistego powodu - pomiędzy źródłem a detektorem bliskim jest na tym odcinku przesuwu sondy cały czas to samo, tj. warstwa tej samej wody.

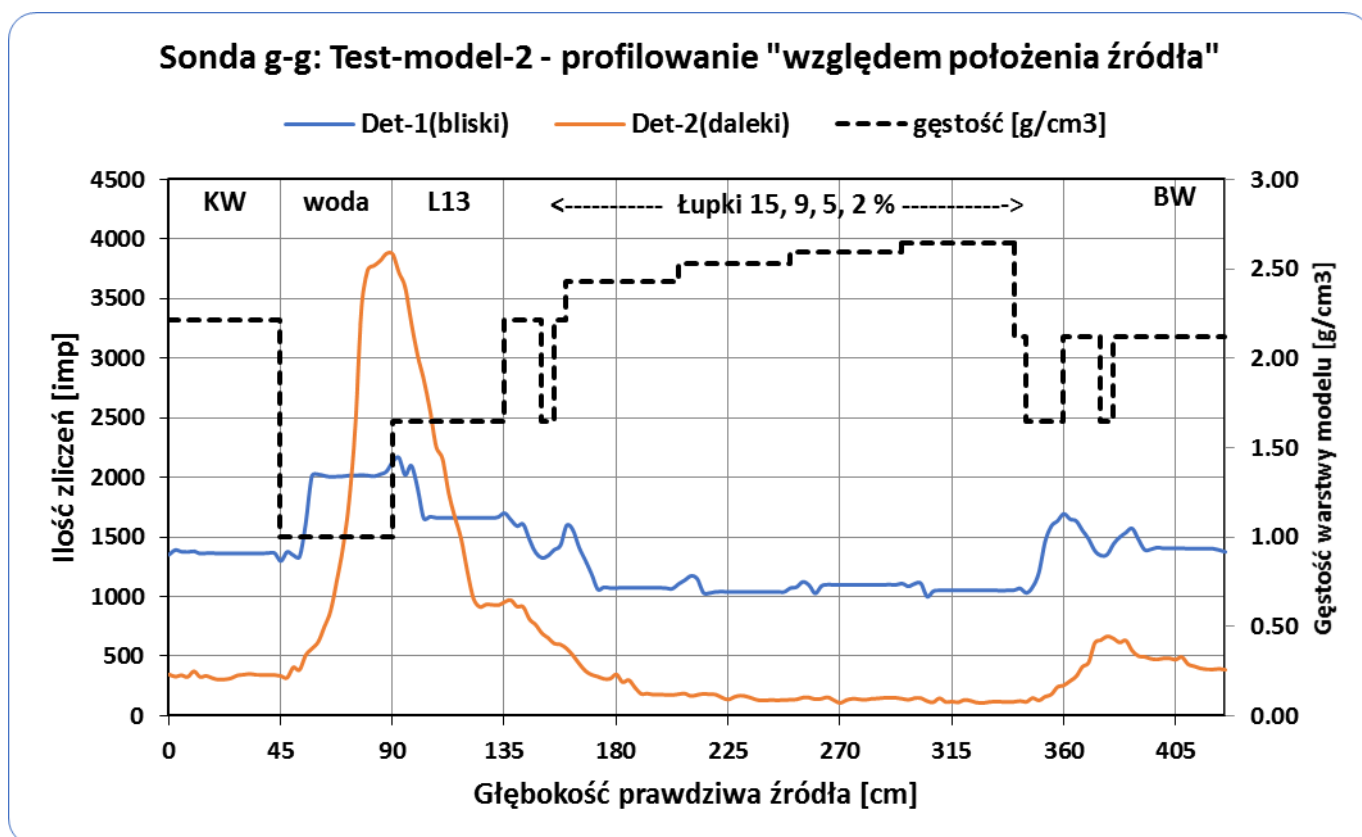
Przedstawione tabele i rysunki stanowią jedynie znikomą część uzyskanych wyników. Końcowe wersje wszystkich istotnych zbiorów, danych wejściowych i wyjściowych, zostały zapisane na zabezpieczonych nośnikach elektronicznych klastra serwerów *McRadiat* Zakładu Transportu Promieniowania (NZ54) IFJ PAN. Zbiory te zostaną przekazane uprawnionym pracownikom Katedry Geofizyki AGH – zleceniodawcy obliczeń, i jednocześnie ich projektanta i koordynatora w ramach projektu *Blue Gas*.



Rysunek 9. Profilowanie głębokościowe Test-model-1 na odcinku 750 - 1200 cm, z krokiem 5 cm.



Rysunek 10. Profilowanie Test-model-2 na pełnej głębokości modelu od 0 do 425 cm, z krokiem 2.5 cm.



Rysunek 11. Profilowanie głębokościowe Test-model-2 względem położenia źródła (opis wykresów w tekście rozdziału 5-d).

6. Wnioski

1. Wydaje się, iż najważniejsze zadanie, tj. kodowanie geometrii sondy gamma-gamma oraz innych jej parametrów w formacie wymaganym przez program MCNP, zostało wykonane poprawnie. Żaden z przeprowadzonych testów, a przebiegów MCNP w różnych wariantach wykonano grubo ponad 300, nie wykazał, jak dotychczas, poważniejszych uchybień. Uzyskane wyniki są spójne i wydają się być zrozumiałe, a tam gdzie można się było spodziewać określonych, znanych skądinąd wyników, uzyskane wyniki są zgodne z tymi oczekiwaniami. Nieprezentowane w tym raporcie rozkłady strumieni i ilości reakcji w detektorach (*tally 4*), wyznaczone w różnych ośrodkach, także wyglądają wiarygodnie. Ich analiza, w połączeniu z analizą wyników spektrometrycznych (*tally 8*), na pewno pomogłaby w lepszym rozumieniu wyników i eliminacji ewentualnych, dotychczasowych niezauważonych błędów. Jest to jednak zadanie bardzo pracochłonne i zdecydowanie wykracza poza ramy opisanych w raporcie testów.

2. Na początek cytuję:

"Łupki gazonośne są specyficznym ośrodkiem, w którym wiele parametrów jest poza zakresem tradycyjnie mierzonych przez geofizykę wartości dla tzw. złóż klasycznych, dla których sprzęt przez dziesięciolecia był optymalizowany. Symbolicznym przykładem może być porowatość, która tutaj jest bardzo niska (średnio ok 5%, rzadko w okolicy 10%), podczas gdy dla zwykłych

złóż sprawa zaczyna się na ogół od ok. 15% a kończy ok. 35%. Na to nakłada się znacznie bardziej skomplikowany skład mineralny, zatem i chemiczny, oraz duża niejednorodność ośrodka w niektórych partiach potencjalnego złoża (u nas takie partie stanowią ok. 20%). To wszystko prowadzi do potrzeby wyostrenia dokładności pomiarów (błąd w określeniu porowatości na poziomie 2%, przy jej wartości 5% to co innego niż dla powiedzmy 25%). Jeśli na to nałożymy niejednorodność geometryczną i zmienność składu chemicznego, to jesteśmy w całkiem innej rzeczywistości niż dotychczas." [9].

Uzyskane wyniki wydają się w pełni potwierdzać zasadność powyższych uwag. Faktycznie, z wykonanych obliczeń wynika jednoznacznie, iż skały łupkowe wyraźnie odbiegają swym charakterem od pozostałych skał, przynajmniej od rozpatrywanych w raporcie wzorców ceramicznych. Niepokoi zwłaszcza bardzo słaba reakcja liczby zliczeń sondy g-g na istotne zmiany w porowatości łupków. Profilowanie zaproponowanych modeli testowych prawie nie zauważa tych zmian. Wydaje się, iż konieczne będzie przewartościowanie dotychczasowych założeń, być może konieczna okaże się zmiana struktury modelowego ośrodka skalnego, czy też utworzenie osobnego modelu - tylko dla potrzeb sondy gamma-gamma.

Wniosek końcowy.

Niewątpliwie także w roboczych, tj. nie tylko testowych jak dotychczas, obliczeniach projektu, konieczne będzie zdecydowane poprawienie statystyki zliczeń. Choć obecne ich ilości całkowicie wystarczają dla skał i materiałów typu wzorce ceramiczne stanowiska pomiarowego w Zielonej Górze, zdecydowanie nie wystarczają dla skał łupkowych. Generalnie, statystykę można poprawić na dwa sposoby: zwiększając czas obliczeń lub poprawiając ich efektywność. Wydaje się, że na tym drugim polu jest jeszcze sporo do zrobienia. Klasyczne metody redukcji wariancji stosowane w obliczeniach MC nie są zalecane w przypadku obliczeń spektrometrycznych (*tally 8*), są niebezpieczne, mogą prowadzić do niespodziewanych i trudnych do zauważenia błędów. Są jednak także prostsze metody poprawy efektywności obliczeń, można po prostu zredukować te rachunki, które niczego nie wnoszą, lub wnoszą niewiele do meritum problemu. Na tym polu zostało przeprowadzonych kilka testów, których wyniki nie zostały przedstawione w niniejszym raporcie. Wyniki tych testów są obiecujące. Okazuje się, iż można zredukować ilość emitowanych cząstek źródła nawet o czynnik 10, tracąc przy tym jedynie ok. 5-10% wartości odpowiedzi detektorów, zarówno bliskiego jak i dalekiego. I co najważniejsze, zachowując kształty rozkładów, proporcje zliczeń i inne, fizycznie istotne relacje. Niewątpliwie, rzecz godna rozważenia przed dalszym etapem, roboczych już obliczeń projektu.

Literatura

1. <http://infolupki.pgi.gov.pl/pl/technologie/program-blue-gas-polski-gaz-lupkowy>
2. X-5 Monte Carlo Team, MCNP—a general Monte Carlo N-particle transport code, version 5. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987, 2003, <https://mcnp.lanl.gov>
3. Wiadomość prywatna. Opracowanie dla sondy neutronowej zostanie wydane jako raport IFJ PAN: Urszula Wiącek, *Symulacja Monte-Carlo odpowiedzi otworowej sondy geofizycznej neutron-neutron w ceramicznym ośrodku modelowym stanowiska kalibracyjnego w Zielonej Górze*, Raport Nr 2086/AP, Kraków, grudzień 2015, www.ifj.edu.pl/publ/reports/2015/
4. D. Dworak, U. Woźnicka, T. Zorski, U. Wiącek, *Numerical modeling of the gamma–gamma density tool responses in horizontal wells with an axial asymmetry*, Appl. Rad. Isotopes, 69 (2011) 268.
5. T. Zorski, U. Woźnicka, U. Wiącek, K. Kowalik, D. Dworak, *Numerical modeling of influence of horizontal borehole surrounding heterogeneity on the response of the gamma-gamma density tool* (in Polish), IFJ Report, 2030/AP (2009)
6. T. Cywicka-Jakiel, J. Łoskiewicz, G. Tracz, *The optimisation of the fast neutron and gamma-ray transmission set-up for moisture measurement of coke*. Applied Radiation and Isotopes **58** (2003) 137-142.
7. A. Drabina, T. Zorski, U. Woźnicka, *Monte Carlo simulation of density gamma–gamma tool response in horizontal well with filtration zone* (in Polish). Unpublished materials of Oil and Gas Institute, Kraków, Poland, 2007.
8. U. Woznicka, T. Cywicka-Jakiel, A. Drabina, D. Dworak, *Computer Modeling of Neutron-Neutron and Neutron-Gamma Borehole Tools* (in Polish), Proc. of the 8th Polish Sci-Tech. Conf. "Application of Borehole Geophysics Methods in Oil Mining, Seismic, and Geology", Szymbark, Poland, 23-26 September 2002, (GEOFIZYKA, Torun) (2002) 77.
9. dr Tomasz Zorski, Katedra Geofizyki AGH, informacja prywatna.

Appendix.

Tabela 4. Wynik symulacji profilowania sondy gamma-gamma w modelu testowym o pomniejszonej grubości warstw, Test-model-2. Opis danych w tekście (rozdziały 3 i 5).

Profilowanie Test-model-2 - wyniki												
no	z_s	Aktualna warstwa			Detektor-1 (bliski)				Detektor-2 (daleki)			
	[cm]	source	det_1	det_2	z_1	Det_1	err_1	Eff_1	z_2	Det_2	err_2	Eff_2
		[cm]				[cm]	[imp]	[imp]	[%]	[cm]	[imp]	[imp]
1	0	KW	KW	KW	-12	1353	37	92.3	-32.2	345	19	93.5
2	2.5	KW	KW	KW	-9.5	1392	37	92.2	-29.7	327	18	94.8
3	5	KW	KW	KW	-7	1379	37	92.5	-27.2	338	18	94.7
4	7.5	KW	KW	KW	-4.5	1376	37	91.8	-24.7	324	18	95.6
5	10	KW	KW	KW	-2	1382	37	92.1	-22.2	372	19	95.6
6	12.5	KW	KW	KW	0.5	1363	37	92.3	-19.7	324	18	93.1
7	15	KW	KW	KW	3	1366	37	92.3	-17.2	333	18	95.1
8	17.5	KW	KW	KW	5.5	1366	37	92.3	-14.7	314	18	94.9
9	20	KW	KW	KW	8	1364	37	92.3	-12.2	301	17	91.8
10	22.5	KW	KW	KW	10.5	1365	37	92.3	-9.7	304	17	94.4
11	25	KW	KW	KW	13	1364	37	92.3	-7.2	313	18	92.3
12	27.5	KW	KW	KW	15.5	1364	37	92.3	-4.7	337	18	94.1
13	30	KW	KW	KW	18	1364	37	92.3	-2.2	343	19	95.0
14	32.5	KW	KW	KW	20.5	1364	37	92.3	0.3	350	19	93.8
15	35	KW	KW	KW	23	1365	37	92.3	2.8	342	18	93.2
16	37.5	KW	KW	KW	25.5	1364	37	92.3	5.3	341	18	93.2
17	40	KW	KW	KW	28	1367	37	92.4	7.8	341	18	93.2
18	42.5	KW	KW	KW	30.5	1366	37	92.4	10.3	340	18	93.2
19	45	KW	KW	KW	33	1301	36	91.9	12.8	332	18	92.7
20	47.5	woda	KW	KW	35.5	1376	37	92.8	15.3	317	18	96.1
21	50	woda	KW	KW	38	1349	37	92.5	17.8	404	20	96.0
22	52.5	woda	KW	KW	40.5	1335	37	90.5	20.3	384	20	96.2
23	55	woda	KW	KW	43	1616	40	91.4	22.8	507	23	94.1
24	57.5	woda	woda	KW	45.5	2015	45	93.1	25.3	562	24	94.1
25	60	woda	woda	KW	48	2027	45	93.1	27.8	618	25	93.8
26	62.5	woda	woda	KW	50.5	2015	45	93.0	30.3	745	27	94.5
27	65	woda	woda	KW	53	2006	45	93.0	32.8	879	30	94.9
28	67.5	woda	woda	KW	55.5	2009	45	93.0	35.3	1131	34	95.9
29	70	woda	woda	KW	58	2011	45	93.0	37.8	1415	38	94.8
30	72.5	woda	woda	KW	60.5	2018	45	93.0	40.3	1812	43	95.9
31	75	woda	woda	KW	63	2018	45	93.0	42.8	2447	49	95.6
32	77.5	woda	woda	woda	65.5	2022	45	93.1	45.3	3443	59	96.2
33	80	woda	woda	woda	68	2018	45	93.0	47.8	3748	61	96.5
34	82.5	woda	woda	woda	70.5	2011	45	93.0	50.3	3782	61	96.5
35	85	woda	woda	woda	73	2028	45	93.1	52.8	3823	62	96.6
36	87.5	woda	woda	woda	75.5	2052	45	93.2	55.3	3883	62	96.7
37	90	woda	woda	woda	78	2133	46	93.3	57.8	3879	62	96.7
38	92.5	L13	woda	woda	80.5	2167	47	93.3	60.3	3724	61	97.0
39	95	L13	woda	woda	83	2022	45	92.1	62.8	3601	60	96.5
40	97.5	L13	woda	woda	85.5	2100	46	93.4	65.3	3300	57	96.7
41	100	L13	woda	woda	88	1911	44	92.7	67.8	3029	55	96.5

42	102.5	L13	L13	woda	90.5	1658	41	92.3	70.3	2824	53	96.5
43	105	L13	L13	woda	93	1672	41	92.3	72.8	2567	51	95.8
44	107.5	L13	L13	woda	95.5	1663	41	92.3	75.3	2260	48	96.4
45	110	L13	L13	woda	98	1663	41	92.3	77.8	2160	46	96.1
46	112.5	L13	L13	woda	100.5	1663	41	92.3	80.3	1874	43	97.4
47	115	L13	L13	woda	103	1662	41	92.3	82.8	1667	41	97.4
48	117.5	L13	L13	woda	105.5	1661	41	92.3	85.3	1490	39	97.1
49	120	L13	L13	woda	108	1661	41	92.3	87.8	1215	35	96.4
50	122.5	L13	L13	L13	110.5	1661	41	92.3	90.3	982	31	94.9
51	125	L13	L13	L13	113	1663	41	92.3	92.8	913	30	94.4
52	127.5	L13	L13	L13	115.5	1662	41	92.3	95.3	932	31	94.1
53	130	L13	L13	L13	118	1662	41	92.3	97.8	931	31	94.1
54	132.5	L13	L13	L13	120.5	1669	41	92.2	100.3	927	30	94.1
55	135	L13	L13	L13	123	1702	41	92.2	102.8	953	31	94.0
56	137.5	KW	L13	L13	125.5	1647	41	92.2	105.3	970	31	94.4
57	140	KW	L13	L13	128	1594	40	91.6	107.8	916	30	95.9
58	142.5	KW	L13	L13	130.5	1608	40	92.0	110.3	913	30	94.8
59	145	KW	L13	L13	133	1481	38	92.0	112.8	810	28	94.8
60	147.5	KW	KW	L13	135.5	1372	37	92.4	115.3	763	28	95.4
61	150	KW	KW	L13	138	1327	36	91.8	117.8	692	26	96.2
62	152.5	L13	KW	L13	140.5	1345	37	92.2	120.3	653	26	94.4
63	155	L13	KW	L13	143	1394	37	91.6	122.8	605	25	94.2
64	157.5	KW	KW	L13	145.5	1431	38	91.9	125.3	597	24	94.6
65	160	KW	KW	L13	148	1599	40	91.6	127.8	562	24	94.5
66	162.5	Lu15	L13	L13	150.5	1561	40	91.9	130.3	506	22	95.5
67	165	Lu15	L13	L13	153	1414	38	92.4	132.8	436	21	95.2
68	167.5	Lu15	KW	KW	155.5	1306	36	91.5	135.3	375	19	94.2
69	170	Lu15	KW	KW	158	1192	35	91.5	137.8	343	19	95.3
70	172.5	Lu15	Lu15	KW	160.5	1063	33	90.9	140.3	327	18	94.8
71	175	Lu15	Lu15	KW	163	1081	33	91.0	142.8	308	18	93.9
72	177.5	Lu15	Lu15	KW	165.5	1074	33	90.9	145.3	309	18	95.4
73	180	Lu15	Lu15	KW	168	1074	33	90.9	147.8	345	19	93.5
74	182.5	Lu15	Lu15	L13	170.5	1076	33	91.0	150.3	280	17	92.7
75	185	Lu15	Lu15	L13	173	1076	33	91.0	152.8	298	17	93.7
76	187.5	Lu15	Lu15	KW	175.5	1077	33	91.0	155.3	234	15	95.1
77	190	Lu15	Lu15	KW	178	1077	33	91.0	157.8	182	13	94.3
78	192.5	Lu15	Lu15	Lu15	180.5	1077	33	91.0	160.3	184	14	94.4
79	195	Lu15	Lu15	Lu15	183	1077	33	91.0	162.8	175	13	94.1
80	197.5	Lu15	Lu15	Lu15	185.5	1076	33	91.0	165.3	177	13	94.1
81	200	Lu15	Lu15	Lu15	188	1073	33	90.9	167.8	173	13	94.0
82	202.5	Lu15	Lu15	Lu15	190.5	1068	33	90.9	170.3	172	13	94.0
83	205	Lu15	Lu15	Lu15	193	1108	33	90.9	172.8	179	13	94.2
84	207.5	Lu_9	Lu15	Lu15	195.5	1139	34	91.0	175.3	184	14	94.4
85	210	Lu_9	Lu15	Lu15	198	1175	34	90.7	177.8	164	13	93.2
86	212.5	Lu_9	Lu15	Lu15	200.5	1152	34	90.5	180.3	173	13	93.5
87	215	Lu_9	Lu15	Lu15	203	1035	32	90.7	182.8	182	13	92.9
88	217.5	Lu_9	Lu_9	Lu15	205.5	1032	32	90.9	185.3	178	13	95.7
89	220	Lu_9	Lu_9	Lu15	208	1042	32	91.0	187.8	176	13	91.2
90	222.5	Lu_9	Lu_9	Lu15	210.5	1043	32	91.1	190.3	150	12	94.3
91	225	Lu_9	Lu_9	Lu15	213	1041	32	91.1	192.8	134	12	96.4
92	227.5	Lu_9	Lu_9	Lu15	215.5	1041	32	91.1	195.3	156	12	94.0

93	230	Lu_9	Lu_9	Lu15	218	1041	32	91.1	197.8	167	13	96.5
94	232.5	Lu_9	Lu_9	Lu15	220.5	1042	32	91.1	200.3	159	13	93.5
95	235	Lu_9	Lu_9	Lu15	223	1042	32	91.1	202.8	142	12	94.0
96	237.5	Lu_9	Lu_9	Lu_9	225.5	1042	32	91.1	205.3	127	11	92.7
97	240	Lu_9	Lu_9	Lu_9	228	1041	32	91.1	207.8	128	11	91.4
98	242.5	Lu_9	Lu_9	Lu_9	230.5	1040	32	91.1	210.3	129	11	92.1
99	245	Lu_9	Lu_9	Lu_9	233	1042	32	91.1	212.8	128	11	92.1
100	247.5	Lu_9	Lu_9	Lu_9	235.5	1041	32	91.1	215.3	130	11	92.2
101	250	Lu_9	Lu_9	Lu_9	238	1073	33	91.1	217.8	132	11	92.3
102	252.5	Lu_5	Lu_9	Lu_9	240.5	1082	33	90.4	220.3	135	12	95.7
103	255	Lu_5	Lu_9	Lu_9	243	1126	34	90.0	222.8	150	12	94.3
104	257.5	Lu_5	Lu_9	Lu_9	245.5	1099	33	90.4	225.3	151	12	93.2
105	260	Lu_5	Lu_9	Lu_9	248	1029	32	89.7	227.8	137	12	93.8
106	262.5	Lu_5	Lu_5	Lu_9	250.5	1091	33	90.5	230.3	141	12	96.6
107	265	Lu_5	Lu_5	Lu_9	253	1102	33	90.7	232.8	153	12	90.5
108	267.5	Lu_5	Lu_5	Lu_9	255.5	1100	33	90.7	235.3	128	11	93.4
109	270	Lu_5	Lu_5	Lu_9	258	1100	33	90.7	237.8	106	10	94.6
110	272.5	Lu_5	Lu_5	Lu_9	260.5	1100	33	90.7	240.3	129	11	92.8
111	275	Lu_5	Lu_5	Lu_9	263	1100	33	90.7	242.8	141	12	97.9
112	277.5	Lu_5	Lu_5	Lu_9	265.5	1101	33	90.7	245.3	137	12	93.8
113	280	Lu_5	Lu_5	Lu_9	268	1101	33	90.7	247.8	132	11	94.3
114	282.5	Lu_5	Lu_5	Lu_5	270.5	1101	33	90.7	250.3	140	12	92.1
115	285	Lu_5	Lu_5	Lu_5	273	1101	33	90.7	252.8	143	12	92.3
116	287.5	Lu_5	Lu_5	Lu_5	275.5	1101	33	90.7	255.3	148	12	92.5
117	290	Lu_5	Lu_5	Lu_5	278	1102	33	90.7	257.8	148	12	92.5
118	292.5	Lu_5	Lu_5	Lu_5	280.5	1101	33	90.7	260.3	148	12	92.5
119	295	Lu_5	Lu_5	Lu_5	283	1111	33	91.0	262.8	141	12	92.2
120	297.5	Lu_2	Lu_5	Lu_5	285.5	1088	33	89.7	265.3	132	11	91.7
121	300	Lu_2	Lu_5	Lu_5	288	1110	33	90.7	267.8	146	12	92.4
122	302.5	Lu_2	Lu_5	Lu_5	290.5	1113	33	90.5	270.3	146	12	94.8
123	305	Lu_2	Lu_5	Lu_5	293	1002	32	89.1	272.8	121	11	92.4
124	307.5	Lu_2	Lu_2	Lu_5	295.5	1047	32	90.5	275.3	112	11	92.6
125	310	Lu_2	Lu_2	Lu_5	298	1054	32	90.5	277.8	145	12	91.8
126	312.5	Lu_2	Lu_2	Lu_5	300.5	1053	32	90.5	280.3	114	11	93.4
127	315	Lu_2	Lu_2	Lu_5	303	1054	32	90.5	282.8	117	11	91.4
128	317.5	Lu_2	Lu_2	Lu_5	305.5	1054	32	90.5	285.3	111	11	95.7
129	320	Lu_2	Lu_2	Lu_5	308	1054	32	90.5	287.8	131	11	97.0
130	322.5	Lu_2	Lu_2	Lu_5	310.5	1054	32	90.5	290.3	124	11	92.5
131	325	Lu_2	Lu_2	Lu_5	313	1054	32	90.5	292.8	108	10	91.5
132	327.5	Lu_2	Lu_2	Lu_2	315.5	1054	32	90.5	295.3	105	10	89.7
133	330	Lu_2	Lu_2	Lu_2	318	1054	32	90.5	297.8	114	11	89.8
134	332.5	Lu_2	Lu_2	Lu_2	320.5	1054	32	90.5	300.3	118	11	90.1
135	335	Lu_2	Lu_2	Lu_2	323	1052	32	90.5	302.8	115	11	89.8
136	337.5	Lu_2	Lu_2	Lu_2	325.5	1054	32	90.4	305.3	113	11	89.7
137	340	Lu_2	Lu_2	Lu_2	328	1056	32	90.5	307.8	115	11	89.8
138	342.5	BW	Lu_2	Lu_2	330.5	1070	33	90.5	310.3	122	11	93.8
139	345	BW	Lu_2	Lu_2	333	1033	32	90.3	312.8	115	11	93.5
140	347.5	L13	Lu_2	Lu_2	335.5	1084	33	91.4	315.3	147	12	93.0
141	350	L13	Lu_2	Lu_2	338	1205	35	92.2	317.8	127	11	93.4
142	352.5	L13	BW	Lu_2	340.5	1463	38	92.2	320.3	158	13	94.0
143	355	L13	BW	Lu_2	343	1593	40	92.0	322.8	178	13	89.0

144	357.5	L13	L13	Lu_2	345.5	1637	40	92.3	325.3	240	15	95.6
145	360	L13	L13	Lu_2	348	1696	41	92.3	327.8	253	16	93.4
146	362.5	BW	L13	Lu_2	350.5	1652	41	92.3	330.3	290	17	93.9
147	365	BW	L13	Lu_2	353	1636	40	92.0	332.8	329	18	94.8
148	367.5	BW	L13	Lu_2	355.5	1557	39	91.5	335.3	410	20	94.3
149	370	BW	L13	Lu_2	358	1485	39	92.4	337.8	445	21	93.7
150	372.5	BW	BW	BW	360.5	1386	37	91.6	340.3	611	25	94.7
151	375	BW	BW	BW	363	1346	37	91.3	342.8	634	25	94.5
152	377.5	L13	BW	L13	365.5	1355	37	91.3	345.3	665	26	95.0
153	380	L13	BW	L13	368	1443	38	91.9	347.8	647	25	94.7
154	382.5	BW	BW	L13	370.5	1500	39	91.6	350.3	614	25	94.8
155	385	BW	BW	L13	373	1539	39	92.1	352.8	630	25	94.3
156	387.5	BW	L13	L13	375.5	1574	40	91.5	355.3	545	23	93.6
157	390	BW	L13	L13	378	1483	39	92.4	357.8	500	22	93.5
158	392.5	BW	BW	BW	380.5	1395	37	91.7	360.3	493	22	95.0
159	395	BW	BW	BW	383	1398	37	91.7	362.8	477	22	95.4
160	397.5	BW	BW	BW	385.5	1414	38	91.8	365.3	471	22	94.0
161	400	BW	BW	BW	388	1407	38	91.7	367.8	480	22	95.0
162	402.5	BW	BW	BW	390.5	1406	37	91.7	370.3	481	22	97.0
163	405	BW	BW	BW	393	1406	37	91.7	372.8	470	22	94.9
164	407.5	BW	BW	L13	395.5	1406	37	91.7	375.3	491	22	95.0
165	410	BW	BW	L13	398	1405	37	91.7	377.8	431	21	95.1
166	412.5	BW	BW	BW	400.5	1405	37	91.7	380.3	414	20	94.1
167	415	BW	BW	BW	403	1404	37	91.7	382.8	396	20	93.8
168	417.5	BW	BW	BW	405.5	1405	37	91.7	385.3	388	20	93.7
169	420	BW	BW	BW	408	1404	37	91.7	387.8	387	20	93.7
170	422.5	BW	BW	BW	410.5	1393	37	91.5	390.3	392	20	93.6
171	425	BW	BW	BW	413	1377	37	91.6	392.8	384	20	93.7