

STATYSTYCZNY CHARAKTER ROZPADU PROMIENIOTWÓRCZEGO

Marcin ZYCH

AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geofizyki
e-mail: zych@geol.agh.edu.pl

Streszczenie: Artykuł prezentuje ćwiczenie laboratoryjne i stanowisko do badania właściwości radiometrycznej sondy otworowej. Pomiary radiometryczne są obecnie istotną częścią geofizyki otworowej pozwalając na określenie wielu parametrów petrofizycznych skał jak gęstość, porowatość, itp. Stąd niezbędne jest, aby studenci kierunku Geofizyka na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH zapoznali się z podstawowymi problemami związanymi z tego typu pomiarami, na które ma wpływ rozpad promieniotwórczy (np. fluktuacje statystyczne), czy też budowa sondy geofizycznej (np. energetyczna zdolność rozdzielcza wykorzystanego detektora).

Słowa kluczowe: geofizyka jądrowa, geofizyka otworowa, rozkłady statystyczne, fluktuacje statystyczne.

1. WSTĘP

Integralną częścią profilowań geofizycznych (wśród których są profilowania: elektryczne, akustyczne, magnetyczne, grawimetryczne) są pomiary radiometryczne, które obejmują: pomiar naturalnego promieniowania gamma (PG(GR) – w jednostkach API), spektrometryczny pomiar naturalnego promieniowania gamma (sPG), gęstościowe profilowanie gamma – gamma (PGGg), profilowanie neutronowe w oparciu o pomiar neutronów termicznych (PNNt) oraz epitermicznych (PNNnt) oraz profilowanie spektrometryczne neutron – gamma (sPNG) [1, 2]. Otrzymane w ten sposób informacje pozwalają m.in. na obliczenie zawartości wielu pierwiastków co pozwala na rozróżnianie formacji skalnych (np. sonda GEM – firmy Haliburton, LithoScanner – Schlumberger) ocenę porowatości skał, gęstości, zailenia [1-5]. Wyniki tych badań poddane odpowiedniemu przetwarzaniu i interpretacji mogą wskazać potencjalne miejsca występowania węglowodorów oraz przyczynić się do oszacowania możliwości ich wydobycia [2].

Dlatego integralną obecnie częścią kształcenia przyszłych inżynierów na kierunku Geofizyka Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej (WGGiOŚ AGH) w Krakowie, jest zapoznanie studentów I stopnia studiów z jądrowymi metodami geofizycznymi. Zajęcia są prowadzone w ramach przedmiotu Geofizyka Otworowa II obejmującego zarówno wykłady i ćwiczenia laboratoryjne. Metody pomiarowe stosowane w geofizyce otworowej łączą w sobie szereg zagadnień inżynierskich, w tym m.in. wpływ różnych czynników zakłócających pomiar, przetwarzanie sygnału.

2. STANOWISKO POMIAROWE

Stanowisko do testowania sond geofizycznych zlokalizowane jest w Laboratorium Geofizyki Otworowej, Katedry Geofizyki, WGGiOŚ AGH w Krakowie. Obecnie do dyspozycji studentów jest udostępniona sonda SO-5-90-SN, będąca częścią zestawu do badań otworów wiertniczych o głębokości do 500 m. Cały zestaw został skonstruowany pod kierunkiem dr inż. Tomasza Zorskiego w latach 90-tych XX wieku [6,7].

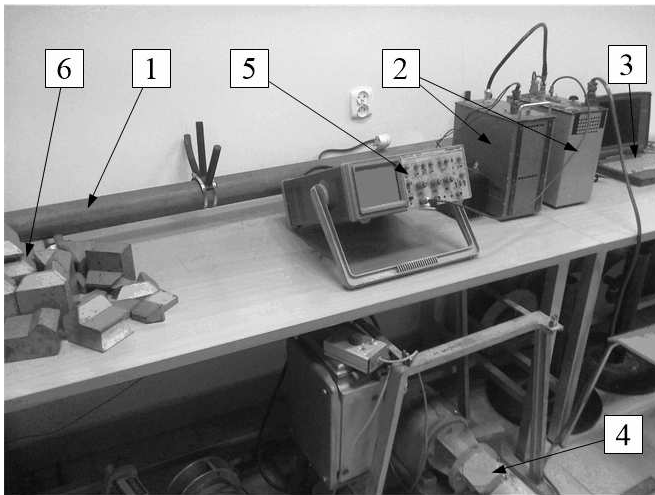
SO-5-90-SN jest otworowym spektrometrem gamma wyposażonym w kryształ scyntylacyjny BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) i w związku z tym może być wykorzystany do dwóch podstawowych typów badań:

- a) spektrometrycznego profilowania naturalnej promieniotwórczości,
- b) po umieszczeniu źródła neutronowego przetwornikowego Am-Be, do profilowań neutron – gamma.

Kryształ scyntylacyjny, jako element detekcyjny jest połączony z fotopowielaczem, z którego impulsy elektryczne są formowane i wzmacniane poprzez układ analogowy, wykonany w standardzie TTL, formującym liniowo 20 μs sygnały z przerwą 60 μs . Układ pozwala na uzyskanie widma energii kwantów gamma w 100 kanałowym analizatorze. W trakcie wykonywania profilowania w otworze widmo dodatkowo stabilizuje się źródłem Cs-137 o niewielkiej aktywności (ok. 40 kBq).

Jednak do ćwiczeń, celem zobrazowania pracy sondy stosuje się wzorzec aktywności oparty o rudę torową (Th-232). Stanowisko pomiarowe jest przedstawione na rysunku 1. Składa się ono z sondy spektrometrycznej SO-5-90-SN (1) w stalowej obudowie, chroniącej przed agresywnym działaniem środowiska w otworze (wysokie ciśnienie, korozja, itp.) z zamocowanymi gumowymi decentralizatorami, umożliwiającymi dociśnięcie sondy do ściany otworu. Sonda jest podłączona poprzez kabel karotażowy z zasilaczem oraz przetwornikiem sygnału analogowo-cyfrowym (2), co umożliwia akwizycję danych na komputerze (3). Kabel karotażowy jest nawinięty na wyciąg (4), który w czasie pomiarów terenowych umożliwia przemieszczanie sondy w otworze. Oscyloskop (5) pozwala studentom obserwować pojawianie się w sposób przypadkowy impulsów napięciowych, których pierwotnym źródłem są oddziaływania kwantów gamma z kryształem scyntylacyjnym BGO – detektorem sondy. Kwanty te pochodzą w głównej mierze z rozpadu izotopów

promieniotwórczych, zawartych we wzorcu aktywności umieszczonym w domku ołowianym (6).



Rys. 1. Zdjęcie stanowiska pomiarowego: 1 – sonda spektrometryczna SO-5-90-SN, 2 – zasilacz, przetwornica wysokiego napięcia wraz z przetwornikiem sygnału analogowo-cyfrowym, 3 – komputer wraz programem analizatora widma, 4 – wyciąg sony z kablem karotażowym, 5 – oscyloskop, 6 – domek ołowiany z umieszczonym wewnątrz wzorcem aktywności (ruda torowa)

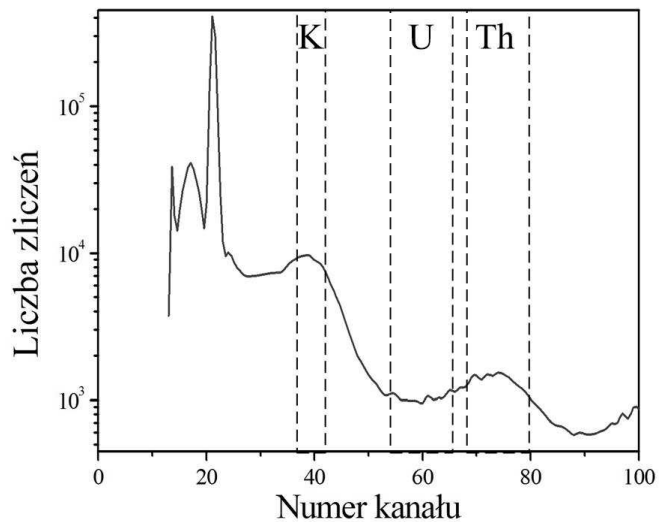
3. PRZEBIEG ĆWICZENIA

Ćwiczenie „Statystyczny charakter rozpadu promieniotwórczego” jest wykonywane w ciągu dwóch jednostek lekcyjnych. Studenci mogą przystąpić do pomiarów po uprzednim instruktażu stanowiskowym oraz ze względu na wymogi ochrony radiologicznej i BHP, właściwym ustawieniu przez prowadzącego wzorca torowego. Na wyposażeniu laboratorium jest również radiometr Thermo Fisher Scientific FH-40, który pozwala pokazać, że aktywność źródła, wykorzystane osłony oraz odległość od źródła promieniowania spełniają normy określone w Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego (Dz.U. 2005, nr 20, poz. 168) oraz Rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 12 lipca 2006 r. w sprawie szczegółowych warunków bezpiecznej pracy ze źródłami promieniowania jonizującego (Dz. U. 2006, nr 140, poz. 994).

Pomiary wykonuje się w dwóch częściach. Pierwsza część to pomiar trwający 10 min pozwalający na uzyskanie energetycznego widma różniczkowego fotonów gamma emitowanych z wzorca aktywności (rysunek 2). Uzyskane widmo pozwala stwierdzić, iż wzorec aktywności, którego zasadniczym składnikiem jest ruda torowa, zawiera także istotną ilość potasu oraz niewielką ilość uranu.

Zebrane widmo spektrometryczne charakteryzuje się na tyle dobrym ukształtowaniem charakterystycznych „pików” pochodzących z rozpadu rodziny Th-232, że na podstawie podanych w instrukcji do ćwiczenia tabel z izotopami oraz ich energiami można wykonać kalibrację energetyczną spektrometru. Ponadto w instrukcji znajdują się również wykresy widm energetycznych potasu K-40 oraz rodziny uranowej (U-238). Stąd studenci mogą wydzielić trzy okna energetyczne odpowiadające oknom dla potasu (K), uranu (U), toru (Th) [2,6-8]. Ta część ćwiczenia umożliwia studentom zapoznanie się z kształtem widma promieniowania gamma, stanowiąc tym samym punkt

wyjścia do lepszego objaśnienia metody trójoknowej wyznaczania zawartości K, U, Th w badanych warstwach skalnych. Oznaczenie koncentracji K, U, Th jest treścią innego ćwiczenia oraz wykładu z Geofizyki Otworowej II, gdyż są to istotne parametry w badaniach otworowych, pozwalające na identyfikację formacji skalnych.



Rys. 2. Widmo różniczkowe promieniowania gamma pochodzącego z wzorca aktywności, otrzymane w wyniku pomiaru trwającego 10 min, z podziałem na trzy okna energetyczne: potasowe – K, uranowe – U, torowe – Th

Drugim etapem ćwiczenia jest zebranie 50 widm z użyciem tego samego wzorca aktywności, ale z czasem pomiaru równym jedynie 5 s. Na podstawie tak otrzymanych danych są wydzielane okna o wysokiej (wartość średnia liczby zliczeń > 50) oraz o niskiej liczbie zliczeń (wartość średnia liczby zliczeń < 20). Stąd po zakończeniu części eksperymentalnej można przystąpić do opracowania rozkładów statystycznych liczby zliczeń w pojedynczych kanałach – osobno dla okien o wysokiej i niskiej, średniej liczbie zliczeń. Ze względu na format oraz strukturę plików (pliki tekstowe), w których zapisuje się dane, łatwo jest je zaimportować do większości komercyjnych i niekomercyjnych programów (typu: MS EXCEL, STATISTICA, GRAPHER, Pakiet R, MATLAB, SciLab), gdzie można prowadzić dalsze analizy oraz przygotować ich wizualizację. Obecny program studiów na kierunku Geofizyka jest tak przygotowany, aby studenci mogli zapoznać się z tego typu programami, gdyż stosowanie szeregu metod pomiarowych w geofizyce otworowej oraz analizy rdzeni wiertniczych generuje dużą liczbę danych, stąd niezbędna staje się wiedza i umiejętności z zakresu „data mining”.

4. OPACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

Opracowanie wyników w dalszej części artykułu zademonstrowano przy wykorzystaniu programu STATISTICA 13, który jest dostępny na licencji w AGH oraz MS EXCEL.

Po wczytaniu danych do wybranego programu, należy zgodnie z instrukcją do ćwiczenia oraz wcześniejszymi ustaleniami wyekstrahować te wartości z plików, które są związane z dwoma oknami: potasowym (K) oraz uranowym (U). Okno potasowe, ze względu na wysoką liczbę zliczeń (średnia liczba zliczeń = 74), służy do zademonstrowania faktu, iż w tego typu sytuacji rozkład liczby zliczeń będzie

zbliżony do rozkładu normalnego (Gaussa). Hipoteza ta będzie następnie sprawdzana przy pomocy testu χ^2 . Natomiast okno uranowe (niska liczba zliczeń) służy do zademonstrowania rozkładu dyskretnego Poissona.

Dla przedstawionych w artykule danych przyjęto, że okno K rozciąga się pomiędzy 35 a 39 kanałem (obejmując pik dla linii 1460.75 keV izotopu K-40), natomiast okno U pomiędzy kanałem 54 a 64 (w przypadku kryształu BGO ten zakres energii powinien zawierać oba piki generowane przez linie 1729.60 keV i 1764.51 keV izotopu Bi-214 - należącego do szeregu U-238).

Celem otrzymania histogramów ustalono liczbę k - liczbę przedziałów histogramowanej liczby zliczeń, zgodnie z zależnościami [9-11]:

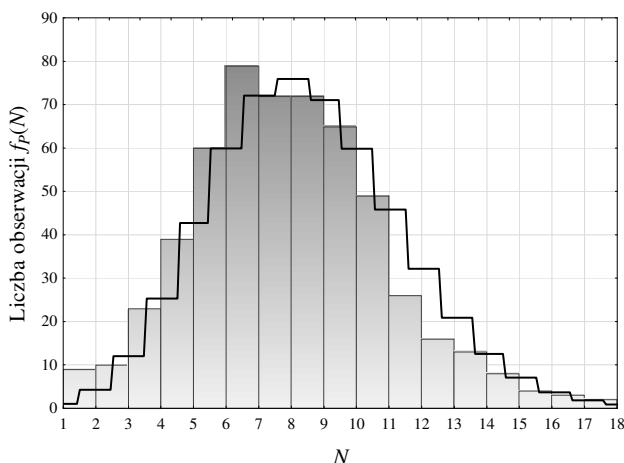
$$k \leq N_{max} - N_{min}, \quad (1)$$

lub:

$$k \leq \sqrt{n}, \quad (2)$$

gdzie: N_{max} - maksymalna liczba zliczeń w pojedynczym kanale danego okna energetycznego, N_{min} - minimalna liczba zliczeń w pojedynczym kanale tego samego okna, n - liczba wszystkich obserwacji, czyli liczba kombinacji „nr kanału - nr pomiaru” dla danego okna (dla okna K: $n = 250$ (5 kanałów \times 50 pomiarów), dla okna U: $n = 550$ (11 kanałów \times 50 pomiarów)).

Dla okna U ustalono, że największa liczba zliczeń wyniosła: $N_{max} = 18$ cpch (count per channel - zliczeń na kanał), zaś minimalna $N_{min} = 1$ cpch. Dlatego maksymalna liczba przedziałów do wykonania wykresu słupkowego, który jest przedstawiony na rysunku 3 jest równa 17.



Rys. 3. Histogram zmiennej losowej N [cpch] - liczby zliczeń w pojedynczych kanałach okna U, dla 50 pomiarów widma wzorca o czasie pomiaru 5s. Do wykresu dopasowano rozkład Poissona

W przypadku rozkładu Poissona, który najlepiej charakteryzuje fluktuacje statystyczne istotne jest zbadanie przez studentów, czy estymator odchylenia standardowego s liczony zgodnie z zależnością [9-11]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - N_{sr})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (3)$$

gdzie: N_i - kolejna obserwacja liczby zliczeń, N_{sr} - średnia liczba zliczeń, jest równy, bądź zbliżony do wartości obliczonej zgodnie z [9-11]:

$$s_p = \sqrt{N_{sr}}. \quad (4)$$

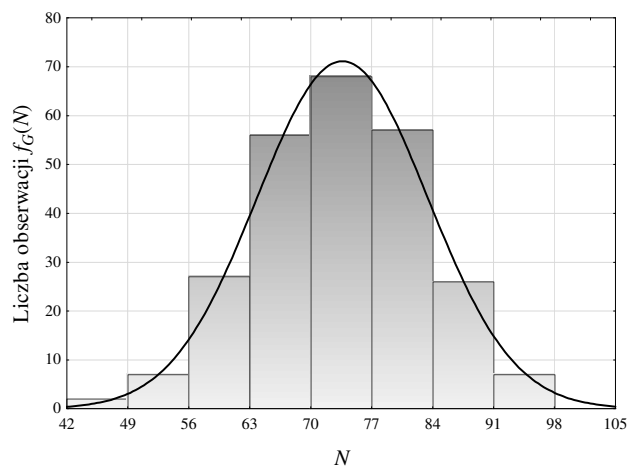
Wzór (4) wynika bezpośrednio z funkcji opisującej rozkład Poissona [9-11]:

$$f_p(N) = \frac{\lambda^N}{N!} e^{-\lambda}, \quad (5)$$

gdzie: $\lambda = N_{sr}$.

Dla prezentowanych eksperymentów otrzymano wartość średnią w oknie U - $N_{sr} = 8$ cpch, estymator odchylenia standardowego $s = 3$ cpch, zaś $s_p = 2.8 \approx 3$ cpch. Zbliżone wartości s i s_p potwierdzają hipotezę, że otrzymany rozkład empiryczny można uważać za aproksymatę rozkładu Poissona.

Z kolei dla energetycznego okna K, gdzie występuje wysoka liczba zliczeń rozkład przedstawia się inaczej, co ilustruje rysunek 4.



Rys. 4. Histogram zmiennej losowej N [cpch] - liczby zliczeń w pojedynczych kanałach okna K, dla 50 pomiarów widma wzorca o czasie pomiaru 5s. Do wykresu dopasowano rozkład normalny

Uwzględniając wartość maksymalną liczby zliczeń, która dla okna K $N_{max} = 98$ cpch, a minimalna $N_{min} = 43$ cpch, to na podstawie zależności (1) należałoby ustalić maksymalną liczbę klas na 55. Jednak takie podejście spowoduje, że sporo przedziałów będzie pustych. Ostatecznie ustalono, iż dla celów tego ćwiczenia wystarczy przyjąć niewielką liczbę przedziałów histogramu, liczbę klas, $k = 8$. Następnie wykonano obliczenia dla testu χ^2 , gdzie testowano na poziomie istotności $\alpha = 0.1$, czy otrzymany rozkład może być opisany rozkładem normalnym (Gaussa). Zgodnie z [9, 10], dla liczby stopni swobody $df = 4$ otrzymano wartość $\chi^2 = 0.97819$, czyli mniej od wartości krytycznej, która wynosi 1.06362 (wg danych zamieszczonych w [10]). Oznacza to, że otrzymany rozkład z 90% prawdopodobieństwem jest rozkładem normalnym. Przy czym przyjęcie α , na tym stosunkowo wyższym niż zazwyczaj poziomie, w tego typu eksperymentach prowadzonych przez studentów jest dopuszczalne, ma charakter głównie poglądowy, pokazując w praktyce działanie centralnego twierdzenia granicznego oraz zastosowanie testu istotności χ^2 .

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Możliwość zobaczenia z bliska sondy geofizycznej w Laboratorium Geofizyki Otworowej, zapoznanie się z jej budową oraz jej przetestowanie pozwala studentom I stopnia studiów oraz jej kierunku geofizyka na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH na praktyczną weryfikację treści podawanych na wykładzie z przedmiotu Geofizyka Otworowa II oraz wcześniejszych kursów z zakresu przedmiotów podstawowych.

W ćwiczeniu „Statystyczny charakter rozpadu promieniotwórczego” studenci poznają szereg ważnych aspektów, związanych z pomiarami radiometrycznymi. Do najważniejszych można zaliczyć:

- zapoznanie z budową spektrometrycznej sondy otworowej,
- zbadanie statystycznego charakteru zjawisk związanych z rozpadem promieniotwórczym,
- opracowanie statystyczne wyników pomiarów – praktyczne zastosowanie rozkładów statystycznych,
- zachowanie ostrożności w posługiwaniu się źródłami promieniotwórczymi (elementy ochrony radiologicznej).

Autorzy uważają, że dla pełniejszego zrozumienia procesów związanych z pomiarami geofizycznymi istotny jest dalszy rozwój oferty ćwiczeń dla studentów. Stąd projektowane jest również ćwiczenie wykorzystujące obliczenia numeryczne w środowisku MCNP6 (Monte Carlo N-Particle Transport Code). Program ten służy do obliczeń związanych z transportem promieniowania w materii, opierając się o metodę statystyczną Monte Carlo oraz rozbudowane biblioteki danych jądrowych. MCNP6 pozwala na otrzymanie sygnałów zbliżonych do rzeczywistych. Uwzględniając duże koszty wykonywania pomiarów geofizycznych w otworach wiertniczych, program ten, poprzez obliczenia dla profilowań za pomocą sond radiometrycznych, pozwala na weryfikację danych dla ośrodków skalnych o znanej strukturze geologicznej, oraz symulację dla innych, często teoretycznych warunków pomiarowych [2, 12].

Praca została sfinansowana ze środków na działalność statutową Katedry Geofizyki AGH (No 11.11.140.645).

6. BIBLIOGRAFIA

1. Jarzyna J., Bała M., Zorski T.: Metody geofizyki otworowej. Pomiary i interpretacja, Wydawnictwa AGH, Kraków 1999.

2. Jarzyna J. (red.), Wawrzyniak-Guz K. (red.): Adaptacja do warunków polskich metodologii wyznaczania sweet spot'ów na podstawie korelacji pomiarów geofizycznych z rdzeniami wiertniczymi. Zadanie 10 w Projekcie MWSSSG: Metodologia wyznaczania sweet spot'ów na podstawie własności geochemicznych, petrofizycznych, geomechanicznych w oparciu o korelację wyników badań laboratoryjnych z pomiarami geofizycznymi i model generacyjny 3D, Drukarnia GOLDRUK Wojciech Golachowski, Kraków 2017.
3. Radke R.J., et al.: A new capture and inelastic spectroscopy tool takes geochemical logging to the next level, SPWLA 53rd Annual Logging Symposium, Cartagena, June 2012.
4. Jacobson L.A., Guo W., Dorffer D., Kwong S.: Cased-hole porosity measurements using pulsed neutron logging tools, SPWLA 54rd Annual Logging Symposium, New Orleans, June 2013.
5. Galford J., Truax J., Hrametz A., Haramboure C.: A new neutron-induced gamma-ray spectroscopy tool for geochemical logging, SPWLA 50rd Annual Logging Symposium, Woodland, June 2009.
6. Pałka K., Zorski T.: Otworowy spektrometr gamma SO-5-90-SN i pomiary doświadczalne wykonane przy jego użyciu w gazonośnej formacji mioceńskiej przedgórza Karpat, GEOPETROL 2004, INiG, Zakopane, wrzesień 2004, s. 729-735.
7. Cywicka-Jakiel T., Zorski T.: Ocena możliwości wyznaczania koncentracji Si, Ca i Fe w gazonośnych utworach miocenu przedgórza Karpat, metodą otworowej spektrometrii gamma, na podstawie pomiarów doświadczalnych i obliczeń MCNP, GEOPETROL 2004, INiG, Zakopane, wrzesień 2004, s. 803-812.
8. Hendriks H.G.M., Limburg J., de Meijer R.J.: Full-spectrum analysis of natural γ -ray spectra, Journal of Environmental Radioactivity, Nr 3 (53), 2001, s. 365-380.
9. STATISTICA 13: Electronic Manual, Dell 2016.
10. StatSoft: Electronic Statistic Textbook, StatSoft Inc. 2011, www.statsoft.pl/textbook/stathome.html.
11. Górecki T.: Podstawy statystyki z przykładami w R, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2011.
12. Woźnicka U., Dworak D., Wiącek U., Zorski T.: Geofizyczne profilowania neutronowe w asymetrycznych formacjach cienkowarstwowych. Symulacje komputerowe na przykładzie sondy NNTE, IFJ PAN, Kraków 2012.

STATISTICAL NATURE OF RADIOACTIVITY DECAY

This article presents a laboratory standpoint for testing the properties of a probe for radiometric measurements. Radiometric measurements are now an important part of well logging, allowing for determination of many petrophysical parameters of rocks such as density, porosity, etc. It is therefore essential that students of Geophysics at the Department of Geology, Geophysics and Environmental Protection AGH-UST find out the basic problems related to such measurements, which are affected by radioactive decay (e.g. statistical fluctuations) or the construction of a geophysical probes (e.g. the energetic resolution of the detector used).

Keywords: nuclear geophysics, well logging, statistical distribution, statistical fluctuations.