

# WYKRYWANIE WYBUCHÓW JĄDROWYCH

KRZYSZTOF RZYMKOWSKI

Wykorzystanie broni jądrowej w końcowej fazie II wojny światowej spowodowało przyspieszenie badań nad sposobami zneutralizowania skutków jej działania, a w szczególności zminimalizowania strat wśród ludności i strat materialnych. Obrona przed bronią jądrową może być obroną czynną polegającą najogólniej rzecz biorąc na zniszczeniu broni przeciwnika lub obroną bierną, której celem jest ograniczenie własnych strat. Jednym z elementów obrony biernej jest wczesne wykrywanie ataku jądrowego i prognozowanie jego skutków.

Próbné wybuchy jądrowe (tzn. wybuchy następujące w wyniku reakcji jądrowych) prowadzone intensywnie w latach powojennych, oprócz podstawowego celu jakim było doskonalenie broni jądrowej, stały się również unikalnymi eksperymentami umożliwiającymi poznanie niektórych zjawisk fizycznych i przyrodniczych zachodzących pod wpływem bardzo wysokich temperatur, ciśnień, różnego rodzaju promieniowania, niemożliwych do uzyskania w warunkach laboratoryjnych. Ilość zebranych danych w trakcie tych eksperymentów, jak i liczne zagrożenia z nimi związane, spowodowały ograniczenie wybuchów doświadczalnych, aż do wprowadzenia całkowitego ich zakazu. Spowodowało to powołanie w 1997 roku międzynarodowej organizacji kontroli prób z bronią jądrową – Komisji Przygotowawczej Organizacji Traktatu o Całkowitym Zakazie Prób Jądrowych CTBTO (*Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty*) i powstanie międzynarodowego systemu kontroli.

## EWOLUCJA BRONI JĄDROWEJ

Historia powstania broni jądrowej jest ściśle powiązana z rozwojem fizyki jądrowej i dlatego w pewnym uproszczeniu można przyjąć, że pierw-

sze prace eksperymentalne i teoretyczne umożliwiające w przyszłości budowę broni jądrowej zostały zapoczątkowane przez E. Rutherforda (1919 r.) i A. Einsteina (1915 r.) Przełomowym etapem przygotowawczym były próby dokonywane przez E. Fermiego w 1934 r. i potwierdzona próba rozszczepienia jądra atomu uranu przez uczonych niemieckich O. Hahna, F. Strasmana w 1938 r. Pierwszą kontrolowaną reakcję jądrową przeprowadzono pod kierunkiem E. Fermiego w Stanach Zjednoczonych w 1942 r. Pierwszego doświadczalnego wybuchu jądrowego dokonano także w 1945 r. w Stanach Zjednoczonych. Podobne wybuchy zostały następnie dokonane w ZSRR w 1949 r. Próba z bronią jądrową została przeprowadzona przez Wielką Brytanię w 1952 r., przez Francję w 1960 r., a przez Chińską Republikę Ludową w 1962 r. Wstępne prace nad bronią jądrową opartą o zjawisko syntezy jądrowej rozpoczęto już w 1938 r., a pierwszą próbę przeprowadzono w 1954 r. W latach 1963-1970 sformułowano podstawowe (S.T. Cohen) wymagania dotyczące kolejnej odmiany broni jądrowej, której podstawowym czynnikiem rażącym było promieniowanie neutronowe.

Historycznie biorąc można wyodrębnić kolejne etapy rozwoju broni jądrowej.

W pierwszym etapie powstały, dzisiaj już uważane za klasyczne, bomby uranowe i plutonowe wykorzystujące reakcje rozszczepienia jąder atomowych. Zostały one bardzo dokładnie przebadane i należą do najszerzej rozprzestrzenionych typów broni jądrowej o konstrukcjach dostosowanych do różnych potrzeb taktycznych. Stanowią one największe zagrożenie dla ludności.

W etapie drugim powstały konstrukcje o powiększonej sile rażenia, wykorzystujące reakcję rozszczepienia, we wstępnej fazie wybuchu, do zwiększenia ilości neutronów powodujących zwielokrot-

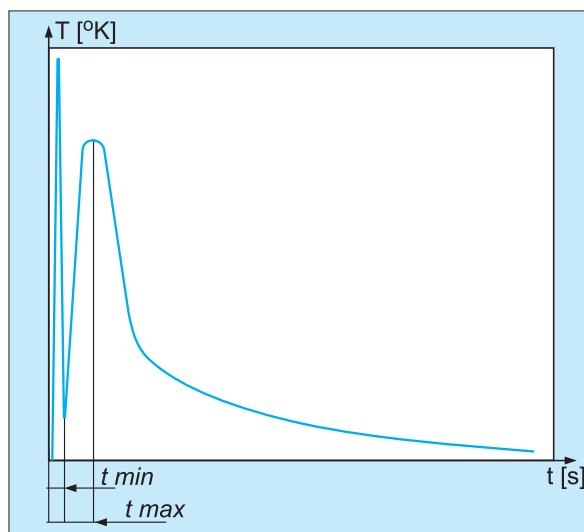
nienie wydajności reakcji rozszczepienia w głównym materiale wybuchowym lub wytworzenia warunków koniecznych do wywołania reakcji syntezy wyzwalającej znacznie większą moc w porównaniu do starszych rozwiązań. Tego rodzaju urządzenia wybuchowe nazywane bombami termojądrowymi, mogą osiągać wydajności energetyczne rzędu Mt (równoważnika TNT) Najsilniejszy doświadczalny wybuch tego rodzaju bomby wykonanej w Stanach Zjednoczonych wyniósł 15 Mt zaś analogiczna bomba zdetonowana w ZSRR osiągnęła 58 Mt. Dla porównania bomby zrzucone w czasie II wojny światowej posiadały moc o równoważniku trotylowym do 20 kt.

W trzecim etapie udoskonalania broni jądrowej skoncentrowano się przede wszystkim na sposobie niszczenia „siły żywej nieprzyjaciela” przy ograniczeniu szkód materialnych. Do tego celu wykorzystywane jest promieniowanie neutronowe powodujące szybkie zgony ludzi w schronach odpornych na promieniowanie cieplne i wysokie ciśnienie, a także w pojazdach pancernych. Konstrukcja tej broni jest zbliżona do broni termojądrowej. Źródłem promieniowania neutronowego i gamma jest reakcja syntezy. Badania nad tego rodzaju bronią rozpoczęto w 1963 r. w Stanach Zjednoczonych. Przerwano je w 1978 r., by ponownie je uruchomić w 1981 r. Broń jest objęta traktatem o zakazie prób jądrowych (CTBTO).

Czwarty etap badań nad bronią jądrową koncentruje się na udoskonaleniu i miniaturyzacji głowic jądrowych poprzez użycie wyrafinowanych technologii wykorzystujących sekwencję wybuchu jądrowego podobną do broni opracowanej w drugim etapie. Przewidywaną zaletą takiej broni jest niezwykle korzystny stosunek masy materiału wybuchowego do całkowitej masy urządzenia wybuchowego. Wydajność energetyczna takich urządzeń wybuchowych nie przekracza na ogół 100t TNT, co pozwala ominąć ograniczenia wynikające z traktatu o zakazie prób jądrowych. Broń jądrowa tego typu może być stosowana, szczególnie przy użyciu samonaprowadzających się środków przenoszenia broni, do niszczenia konkretnych nawet bardzo odległych celów. Nad tą bronią pracuje się w krajach o bardzo wysoko rozwiniętych technologiach.

Biorąc pod uwagę, że eksplozje jądrowe są wywoływane przez reakcję rozszczepienia i syntezy materiału wybuchowego możliwe są następujące warianty konstrukcji broni jądrowej wykorzystujące różne rodzaje reakcji:

- wybuchy powstałe w wyniku bezpośredniego rozszczepienia materiału wybuchowego (uran-235, pluton-239);
- wybuchy powstałe w wyniku działania dwustopniowego – rozszczepienie materiału zapłonowego stwarzającego warunki do syntezy lekkich jąder atomowych;



Rys. 1. Promieniowanie termiczne kuli ognistej

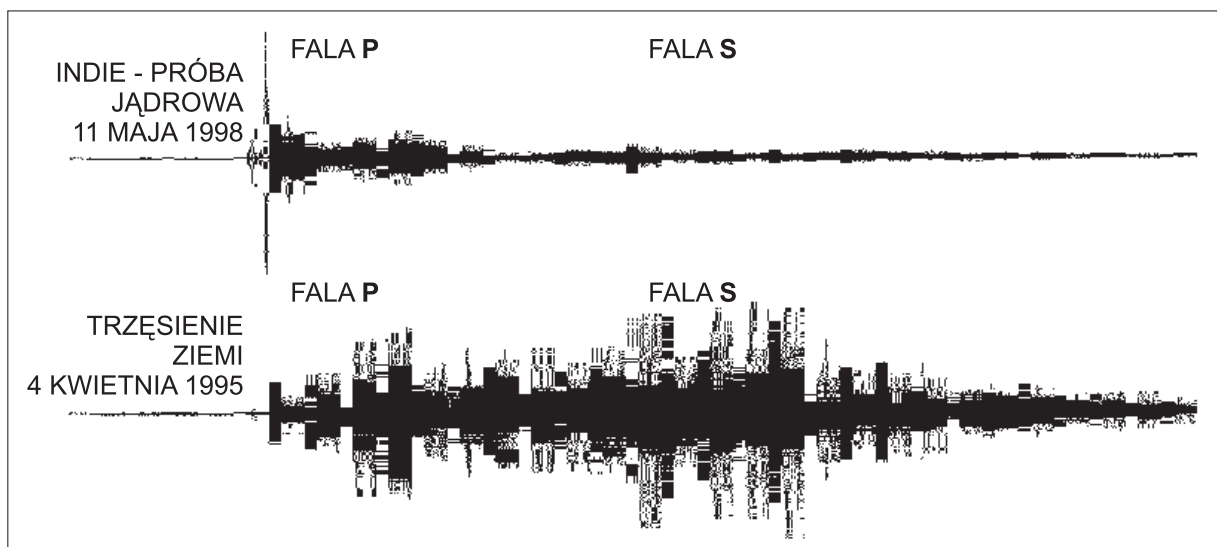
- wybuchy powstałe w wyniku działania trójstopniowego – rozszczepienie materiału zapłonowego-synteza materiału wybuchowego – aktywacja neutronami urządzenia wybuchowego;

Zupełnie innym zagrożeniem dla ludności jest potencjalna możliwość wykorzystania materiałów jądrowych do budowy bomby radiacyjnej tzw. „brudnej bomby” polegającej na radioaktywnym skażeniu terenu w wyniku zdetonowania przy pomocy konwencjonalnych materiałów wybuchowych ładunku zawierającego izotopy promieniotwórcze lub ataku na obiekt jądrowy, np. magazyny wypalonego paliwa, elektrownie jądrowe, zakłady przerobu paliwa jądrowego, itp. Pierwsze projekty militarnego zastosowania broni radiacyjnej powstały w latach pięćdziesiątych. Skuteczność broni zależy od rodzaju zastosowanych izotopów. Jej działanie jest opóźnione i długotrwałe. Ze względu na prostotę konstrukcji takiej broni i względną łatwość uzyskania izotopów promieniotwórczych istnieje obawa przed użyciem jej przez organizacje terrorystyczne.

## SYSTEMY WYKRYWANIA BRONI JĄDROWEJ

Systemy wczesnego wykrywania wybuchów jądrowych są ważnym elementem obrony bierniej.

Systemy wykrywania wybuchów jądrowych różnią się między sobą przede wszystkim przeznaczeniem, ponieważ inne są wymagania dla systemów wykrywania wycichów na polu walki i inne w warunkach pokojowych, gdzie głównym celem jest weryfikacja wypełniania zobowiązań wynikających z traktatów międzynarodowych. Systemy wojskowe muszą zapewnić jak najdokładniejszą informację o stanie rażonych elementów operacyjnych, pozwalającą na podjęcie decyzji o odtworzeniu zdolności bojowej zaatakowanych jednostek, o rozmiarach



Rys. 2. Sejsmogramy zarejestrowane w stacji sejsmicznej Nilore (Pakistan)

stref skażeń i ich wielkości oraz skutkach ataku głównie zakresu zniszczeń elementów o znaczeniu strategicznym. Systemy używane w warunkach pokojowych powinny umożliwić ustalenie miejsca i czasu próby jądrowej, mocy wybuchu, rodzaju materiałów użytych w eksplozji, wielkość obszaru skażonego oraz umożliwić prognozę późniejszych skutków wybuchu.

Systemy wykrywania wybuchów wykorzystują do ich detekcji oczywiście zjawiska fizyczne towarzyszące eksplozji tzn. promieniowanie świetlne (cieplne). Falę uderzeniową (zmianę ciśnienia) sygnał akustyczny, wstrząs sejsmiczny, fale radiowe (impuls elektromagnetyczny), promieniowanie jądrowe (początkowe i resztkowe).

Wojskowe urządzenia do wykrywania wybuchów jądrowych umieszczane były na samochodach wraz z radiostacją umożliwiającą łączność z punktem dowodzenia. Problemem było to, że ta łączność mogła być silnie zakłócona przez sam wybuch. Wojskowa stacja pomiarowa umożliwiała pomiar wydajności energetycznej wybuchu na podstawie fali świetlnej, kąta położenia kuli ognistej okręcającej jej wysokość i ewentualnie szybkość wznieszenia, azymut wybuchu (określenie miejsca wybuchu wymagało sprzężenia co najmniej dwóch stacji, rejestrację radioimpulsu, sygnału akustycznego). Ze względu na konieczność szybkiego przemieszczania się stacji nie wykorzystywano sygnałów sejsmicznych.

Systemy pracujące w warunkach pokojowych są obecnie rozprzeszczone na całej kuli ziemskiej i wykorzystują wszystkie dostępne metody pomiarowe umożliwiające określenie parametrów wybuchu.

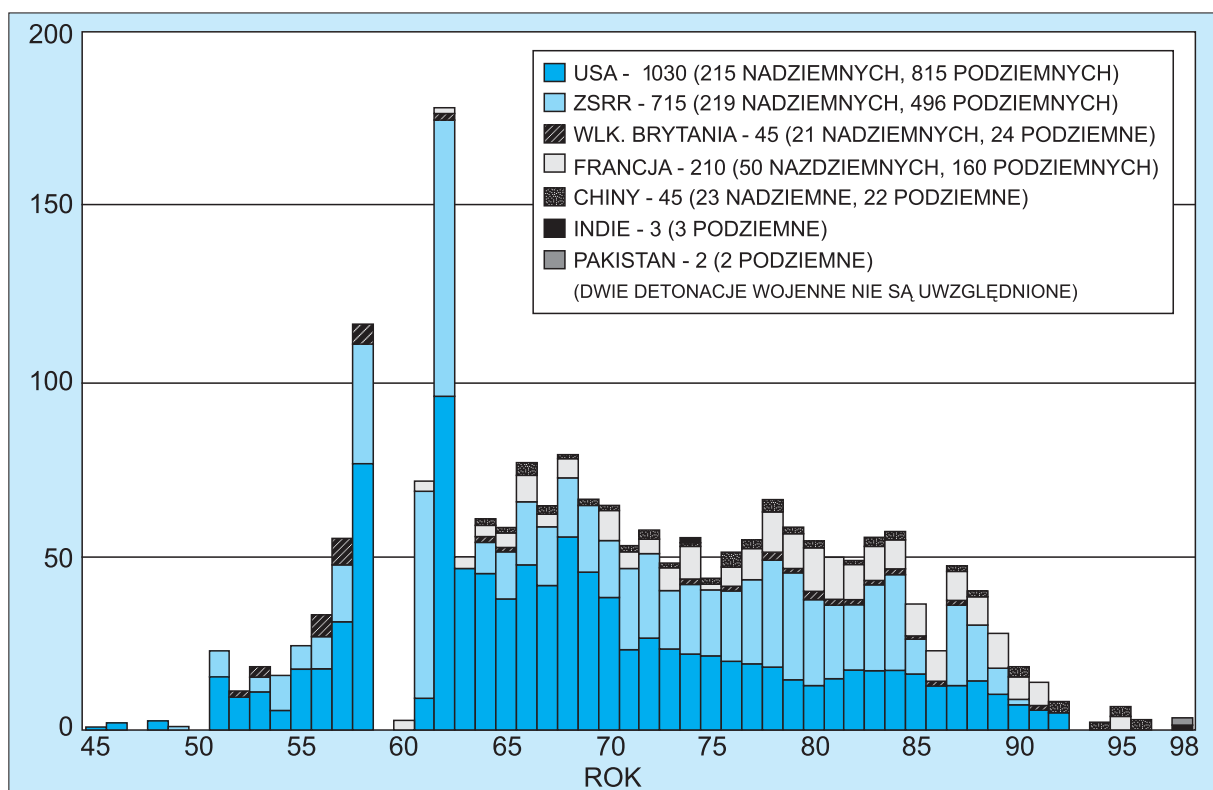
Ewentualne zamachy terrorystyczne dokonywane przy użyciu jakiegoś rodzaju bomby radiacyjnej mogą być względnie łatwo wykrywane przez międzynarodowe systemy wczesnego ostrzegania

i wykrywania awarii jądrowych jak np. Centrum ds. Zdarzeń Radiacyjnych w PAA.

## KLASYFIKACJA WYBUCHÓW JĄDROWYCH

Wybuchy jądrowe można klasyfikować uwzględniając ich różne właściwości np. czynniki rażące. Podstawowymi czynnikami rażącymi w klasycznej broni jądrowej są podmuch (fala uderzeniowa) i wstrząs stanowiące około 50% siły wybuchu oraz promieniowanie cieplne (około 30% siły wybuchu) i promieniowanie jonizujące (około 10% siły wybuchu). Podstawowym czynnikiem rażącym w neutronowej broni jądrowej jest promieniowanie stanowiące według niektórych danych aż 80% siły wybuchu. Innego rodzaju klasyfikacje uwzględniające przeznaczenie, siłę rażenia itp. stosuje się dla celów wojskowych.

Dla celów ochrony ludności przyjęto podział wybuchów jądrowych na powietrzne, naziemne, powierzchniowe, podziemne i nawodne, podwodne. Podziemne i podwodne nazywane są również podpowierzchniowymi. Ponieważ w praktyce może zachodzić szereg sytuacji pośrednich podział ten ma charakter umowny. Wybuchem powietrznym nazywany jest wybuch, w czasie którego centrum eksplozji znajduje się nad powierzchnią wody lub ziemi na takiej wysokości, że kula ognista w chwili osiągnięcia drugiego szczytu emisji nie dotyka powierzchni środowiska nad którym nastąpił wybuch. Cechą charakterystyczną powietrznych wybuchów jądrowych jest występowanie dwóch szczytów emisji energii cieplnej. W wybuchu podpowierzchniowym centrum eksplozji znajduje się pod powierzchnią środowiska, pod którym nastąpił wybuch. Należy podkreślić, że granice pomiędzy tymi wybuchami są umowne, ponieważ np. wybuch



Rys. 3. Przeprowadzone próby broni jądrowej

powierzchniowy może być traktowany również jako płytki wybuch podpowierzchniowy. Z punktu widzenia ochrony ludności istotne znaczenie ma przewidywanie zasięgu skażeń radioaktywnych, zniszczeń, przewidywanie kierunku przemieszczania się chmur radioaktywnych itp. Dlatego też poznanie zjawisk występujących w takich warunkach jest niezwykle istotne.

Dokonywane były również próby jądrowe na dużych wysokościach, praktycznie w przestrzeni kosmicznej. Jednak znaczenie ich z punktu widzenia ochrony ludności jest znikome, ponieważ brak jest fali uderzeniowej, promieniowanie cieplne (impuls świetlny) jest widoczny, ale nie ma właściwości niszczących, a promieniotwórcze pozostałości po bombie są bardzo rozproszone. Wybuchy te miały wpływ na odbiór radiowy co jest istotne w przypadku konfliktu.

### ZJAWISKA WYWOŁANE PRZEZ WYBUCHY JĄDROWE

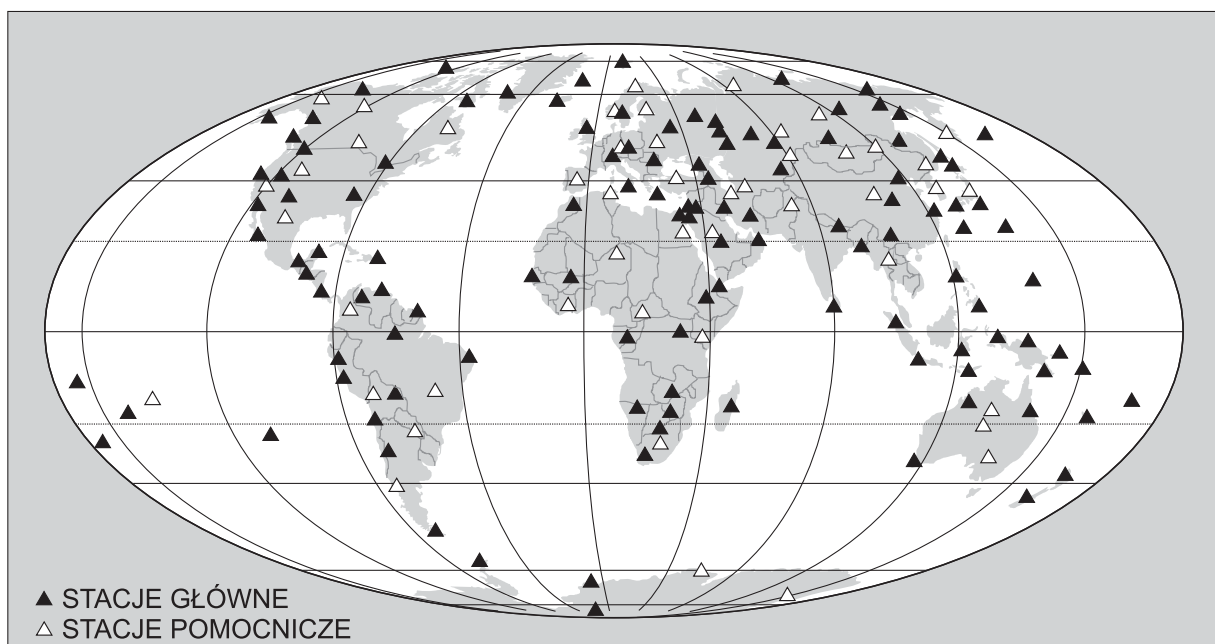
Szczegółowe opisy procesów fizycznych zachodzących w czasie wybuchu jądrowego są w dostępnej obecnie literaturze opisane dość szeroko. Dla celów wykrywania i oceny wydajności energetycznej wybuchów powietrznych i podpowierzchniowych najgroźniejszych dla ludności ze względu na duży zasięg wykorzystywane są przede wszystkim następujące zjawiska;

- promieniowanie cieplne (impuls świetlny) – mierzony jest czas osiągnięcia minimum promieniowania pozwalający wyznaczyć wydajność energetyczną wybuchu
- impuls elektromagnetyczny – badana jest współbieżność z sygnałem świetlnym w celu potwierdzenia, że obserwowany wybuch jest wybuchem jądrowym
- fala poddmuchu (uderzeniowa) – mierzony jest czas dojścia czoła fali uderzeniowej w celu określenia odległości
- fale sejsmiczne – mierzone są: czas dojścia czoła fali sejsmicznej w celu potwierdzenia odległości od centrum wybuchu oraz energia fali sejsmicznej, która wraz z obliczoną wydajnością energetyczną wybuchu umożliwi określenie jego rodzaju i określenie wysokości na której on nastąpił.

### PROMIENIOWANIE CIEPLNE – IMPULS ŚWIETLNY

Promieniowanie emitowane podczas wybuchu jądrowego w zakresie światła widzialnego jest wykorzystywane do określenia jego wydajności energetycznej. Mechanizm tworzenia się kuli ognistej stanowiącej źródło sygnału świetlnego jest następujący;

**Faza I – źródło pierwotne** – wysoka temperatura (dochodząca do kilkunastu milionów stopni)



Rys. 4. Stacje sejsmiczne CTBTO

powstała w wyniku reakcji jądrowych powoduje powstanie plazmy; zjonizowane pary materiału bomby nazywane źródłem pierwotnym stanowią centrum wybuchu.

**Faza II – wzrost radiacyjny kuli ognistej** – wyzwolona energia jest emitowana w postaci promieniowania elektromagnetycznego obejmującego szerokie spektrum od podczerwieni do promieniowania rentgenowskiego; fotony promieniowania rentgenowskiego są pochłaniane w warstwie powietrza; powodują silne nagrzanie i zjonizowanie tej warstwy powietrza w pobliżu źródła pierwotnego; przekazują energię dalszym warstwom powietrza; powodują powiększanie się kuli ognistej. Jednocześnie kula powstała z par bomby rozpręża się zbliżając się do zewnętrznej warstwy kuli ognistej utworzonej przez promieniowanie rentgenowskie. Gdy przestanie się wydzielać energia z reakcji jądrowych, szybkość rozprzestrzeniania się kuli gwałtownie spada i temperatura w jej wnętrzu maleje, prędkość przekazywania energii przez promieniowanie i prędkość rozszerzania się gazów wyrównują się.

**Faza III – przejście od wzrostu radiacyjnego do uderzeniowego, tzn. przejście od wzrostu kuli ognistej spowodowanego promieniowaniem do powstania fali uderzeniowej** – z chwilą kiedy warstwa sprężonego powietrza powstała wokół centrum wybuchu połączy się z warstwą czoła fali powstałej w wyniku promieniowania, powierzchnia kuli ognistej staje się czołem fali uderzeniowej, której właściwości rażące zależą od mocy wybuchu. Ze względu na wysoką temperaturę czoło tej fali stanowi rodzaj ekranu przesłaniającego bardziej rozżarzone wnętrze.

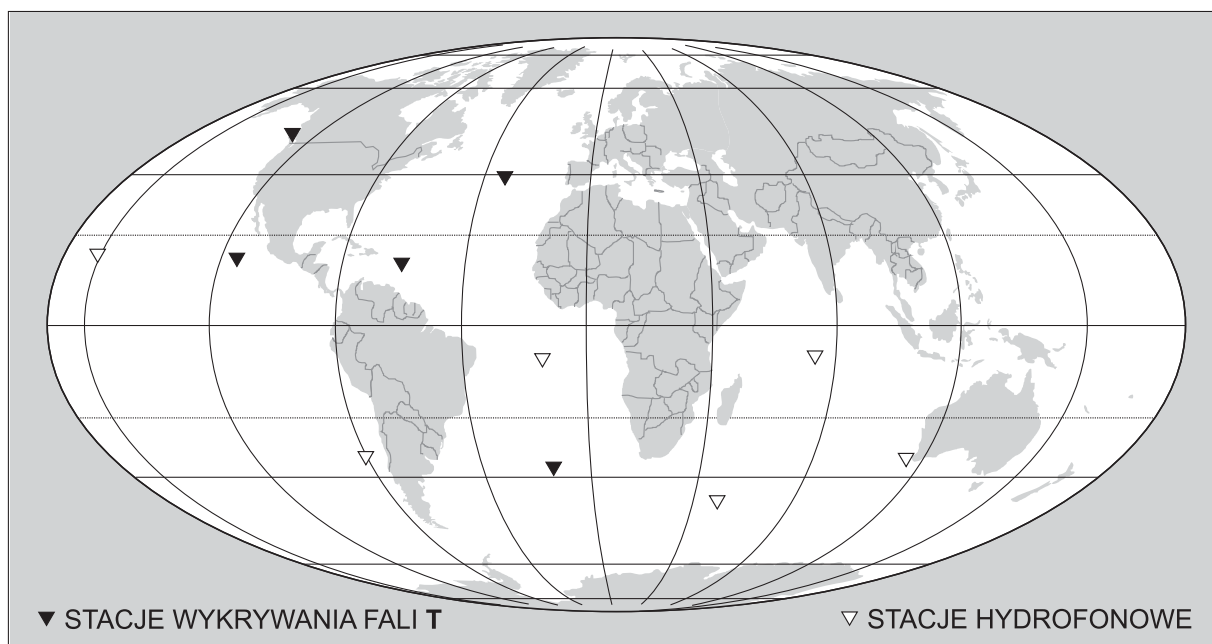
**Faza IV – wzrost kuli ognistej wywołany przez falę uderzeniową** – kula ognista w tej fazie składa się z dwóch koncentrycznych obszarów: wewnętrznego o bardzo wysokiej temperaturze i zewnętrznego stanowiącego warstwę jarzącego się powietrza. Kula wewnętrzna powiększa się, przy czym, wskutek obniżania się temperatury zmienia się zakres widma promieniowania. W miarę oddalania się fali uderzeniowej od centrum wybuchu jej temperatura powierzchni maleje do około 2000°K i przestaje świecić odsłaniając wnętrze kuli – pierwsze minimum.

**Faza V kula ognista po oderwaniu się fali uderzeniowej** – stają się widoczne obszary wnętrza kuli ognistej nazywanej późną kulą ognistą i wzrasta natężenie promieniowania cieplnego aż do osiągnięcia maksimum około 6000°K – 8000°K, (obserwowana temperatura powierzchni Słońca wynosi około 6000°K), a następnie opada na skutek strat energii na promieniowanie i ochładzanie się gazów. Zanik kuli następuje po czasie zależnym od mocy wybuchu (tzw. drugie minimum).

Powstawanie dwóch szczytów emisji promieniowania jest charakterystyczną cechą wybuchów powietrznych do wysokości około 30 km. Na wysokości 110 km obserwowano pojedynczy błysk. Sygnał świetlny może być odbierany przez aparaturę wykrywającą wybuchy nawet bez bezpośredniej widoczności kuli ognistej tzn. gdy wybuch nastąpił poza horyzontem. Wydajność energetyczna wybuchu jest określona wzorami empirycznymi

$$t_{min} = 0,0025 \sqrt{W} \quad t_{max} = 0,0032 \sqrt{W}$$

gdzie  $W$  oznacza wydajność energetyczna wybuchu (kt TNT)



Rys. 5. Stacje hydroakustyczne CTBTO

### IMPULS ELEKTROMAGNETYCZNY

Impuls elektromagnetyczny powstaje w pierwszej fazie tworzenia się kuli ognistej bezpośrednio po detonacji wskutek oddziaływania promieniowania z materią i powstania plazmy w centrum wybuchu i jest generowany przez elektron rozproszenia Comptonowskiego i fotoelektrony. Impuls wywołuje bardzo krótkotrwałe i silne natężenia pola elektromagnetycznego mogące spowodować czasowe unieruchomienie wszelkich urządzeń elektronicznych. Wybuchy mające na celu tego rodzaju działania są wykonywane na dużych wysokościach (przeprowadzono próby na wysokości 400 km). Odbiór szeroko pasmowy (od 3 Hz do 3 kHz) sygnału wraz z sygnałem świetlnym informują o możliwym wybuchu jądrowym i uruchamiają pozostałe układy systemu wykrywania.

### FALA PODMUCHU (FALA UDERZENIOWA)

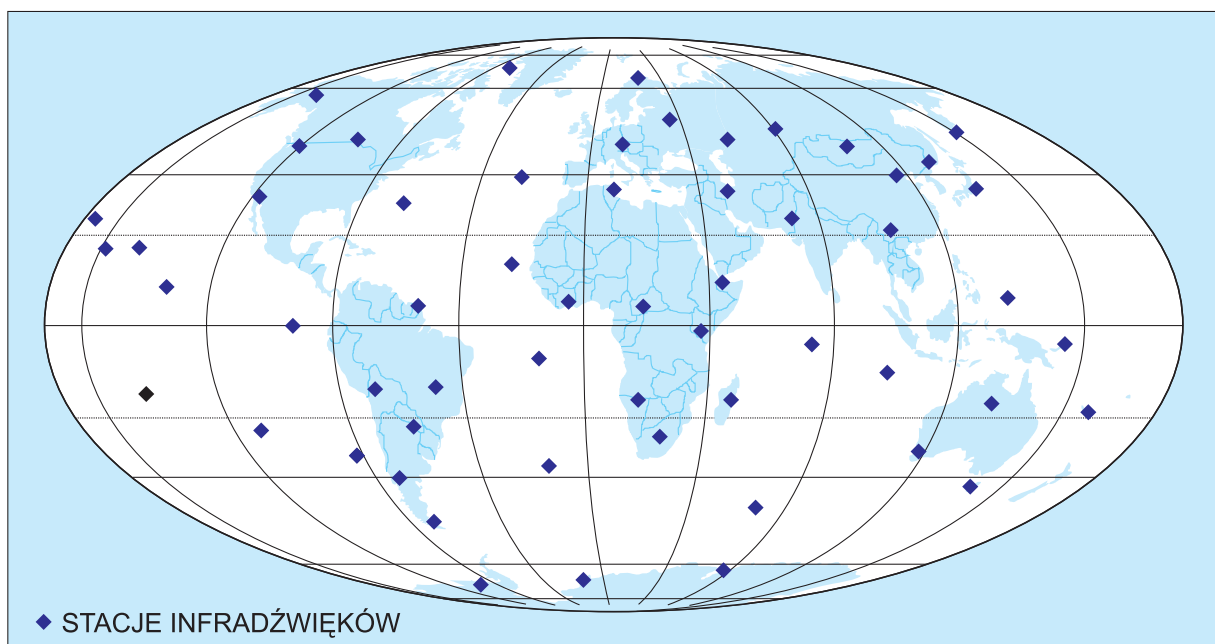
Fala uderzeniowa stanowi obok promieniowania cieplnego najważniejszy składnik rażącego wybuchu jądrowego. Początkowo fala uderzeniowa rozchodzi się z prędkością znacznie przewyższającą szybkość rozchodzenia się dźwięku i wynosi około 30 km/s, a w miarę rozprzestrzeniania się jej szybkość maleje i staje się falą dźwiękową i może rozchodzić się na znaczne odległości. Rozprzestrzenianiu się fali uderzeniowej może towarzyszyć zjawisko tzw. Fali Macha. Fala uderzeniowa, zderzając się z gęstym ośrodkiem ulega odbiciu. Wartość odbitego ciśnienia zależy od siły uderzenia fali padającej i jej kąta padania. Mierząc ciśnienie w pewnej odle-

głości od centrum wybuchu w oddaleniu od powierzchni ziemi obserwuje się dwa uderzenia: jedno pochodzące od bezpośredniej fali uderzeniowej, a drugie od fali odbitej. Niekiedy czoła obu fal łączą się i obserwowane jest wówczas jedno uderzenie. Obszar w którym następuje to uderzenie nazywane jest obszarem Macha.

W stacjonarnych stacjach wykrywania wybuchów jądrowych stosowanych w międzynarodowym systemie czułe przyrządy pomiarowe (mikrobarografy) wykrywają zmiany ciśnienia rzędu ułamków mikrobarów. Urządzenia te wykrywają zachodzące zmiany umożliwiając zapis danych zbieranych w ciągu 30 s. Częstotliwość wykrywanych infradźwięków wynosi 6 Hz. Podstawowym problemem w wykrywaniu tych zmian jest wyodrębnienie sygnałów pochodzących od wybuchów od tła naturalnego (wirów powietrznych, anomalii pogodowych, intensywnych opadów), ale też od sygnałów emitowanych przy erupcji wulkanów, samolotów, pożarów, a nawet meteorów. W celu wyeliminowania tych zakłóceń stosuje się zestawy detektorowe pracujące we wspólnej sieci, a zebrane dane są analizowane i korelowane z innymi stacjami systemu.

### FALE SEJSMICZNE

Siła wstrząsu ziemi wywołanego wybuchem jądrowym zależy przede wszystkim od wydajności energetycznej wybuchu oraz oddalenia centrum wybuchu od powierzchni ziemi. Zjawiska występujące przy wybuchach powierzchniowych i podpowierzchniowych, a w szczególności przy wybuchach dokonywanych na dużych głębokościach w których

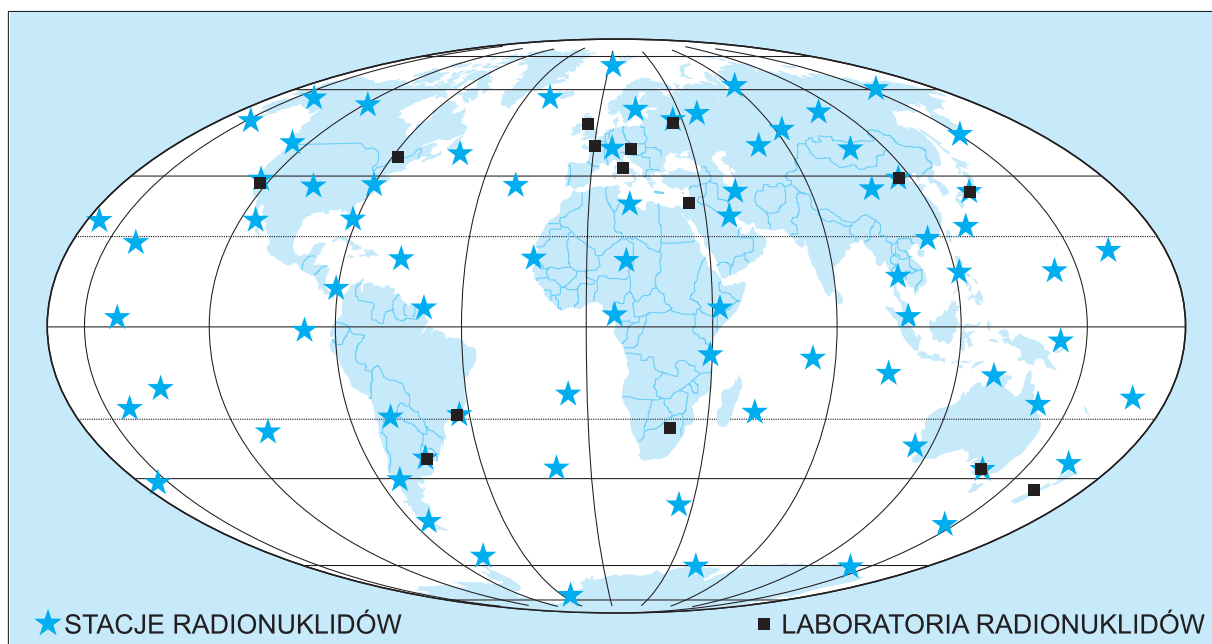


Rys. 6. Stacje wykrywania infradźwięków CTBTO

większa część energii wybuchu zamieniana jest na wstrząs sejsmiczny, różnią się bardzo znacznie od zjawisk zachodzących przy wybuchach powietrznych. Przy wybuchu powietrznym fala sejsmiczna powstaje w wyniku uderzenia czoła fali uderzeniowej o powierzchnię ziemi. Fala sejsmiczna może przenosić bardzo dużą energię i wywoływać silne wstrząsy nawet na bardzo znacznych odległościach. Wielkość powstałych wstrząsów zależy od rodzaju powierzchni i podpowierzchniowych warstw ziemi, od rodzaju których zależy również szybkość i zakres propagacji fali sejsmicznej. Przy wybuchu powietrznym, gdy fala uderzeniowa jest silna fala sejsmiczna może przenosić się szybciej od czoła fali uderzeniowej lub być w stosunku do niego opóźniona. Zależy to od lokalnych warunków propagacji tzn. głównie od gęstości warstwy przenoszącej zaburzenie sejsmiczne. Gdy szybkość fali uderzeniowej osiągnie szybkość dźwięku, fala sejsmiczna na ogół wyprzedza falę uderzeniową. Propagacja fal sejsmicznych jest bardzo złożona ze względu na zróżnicowanie warstw geologicznych i w skrajnych przypadkach może się zdarzyć, że czujnik odbierze falę sejsmiczną pochodzącą od tego samego wybuchu, ale z różnych kierunków. W pewnych odległościach od centrum wybuchu identyfikacja pochodzenia wstrząsu nie powinna sprawiać trudności, natomiast duże trudności mogą powstać w odległościach tysięcy kilometrów. Dlatego do pełnej identyfikacji powinna być zbudowana sieć odbioru sygnałów sejsmicznych. Zakłócenia identyfikacji mogą być spowodowane trzęsieniami ziemi, wybuchami w kopalniach, a ze względu na wielką czułość aparatury nawet pracami budowlanymi. Wykrywane częstotliwości wynoszą od 0,5 Hz do 8 Hz.

Jedną z metod identyfikacji (odróżnienia wybuchu od trzęsienia ziemi) jest analiza fal sejsmicznych fali podłużnej P (Primary) i fali podłużnej S (Secondary). Fale sejsmiczne P drgają w kierunku rozchodzenia się (podobnie do fali dźwiękowej) i są one bardzo szybkie (około 5 km/s), fale podłużne S wywołują drgania prostopadłe do kierunku rozchodzenia w płaszczyźnie pionowej lub poziomej (z szybkością około 3 km/s). Wybuch jądrowy wywołuje silniejszą falę P i słabszą S w przeciwieństwie do trzęsienia ziemi, P jest słabsza, S silniejsza. Identyfikację przeprowadza się na podstawie sejsmogramu uwzględniając częstotliwość i lokalne warunki propagacji. Stacje sejsmiczne pracują w sieci co pozwala określić miejsce wybuchu.

Z systemem wykrywania wstrząsów sejsmicznych jest powiązana sieć wykrywania wybuchów nad powierzchnią wody i podwodnych pomagająca jednocześnie w ich identyfikacji. Sieć tworzy system czujników podwodnych (hydrofonów) rozmieszczonych w różnych punktach oceanów, z których dane są przesłane kablami do najbliższych stacji obserwacyjnych. Przewidywana jest również łączność satelitarna między stacjami. Systemy hydroakustyczne są niezwykle czułe i pozwalają identyfikować wybuchy z dużą precyzją. Wiadomo, że np. wybuchy podwodne wysyłają specyficzne sygnały tzw. oscylacje pęcherzykowe. Systemy odbierają fale o znacznie wyższej częstotliwości niż stacje sejsmiczne, co dodatkowo ułatwia identyfikację np. wybuchów dokonywanych nad powierzchnią wody. Umożliwiają one również odbiór najsłabszej i najwolniejszej fali sejsmicznej, fali T (Tertiary), co pozwala wykrywać bardzo słabe trzęsienia ziemi, nie rejestrowane przez sejsmografy na lądzie a nawet odległe wybu-



Rys. 7. Stacje wykrywania radionuklidów CTBTO

chy. Tego rodzaju czujniki naprowadziły obserwatorów między innymi na podejrzenie, że okręt podwodny KURSK zatonął w wyniku eksplozji.

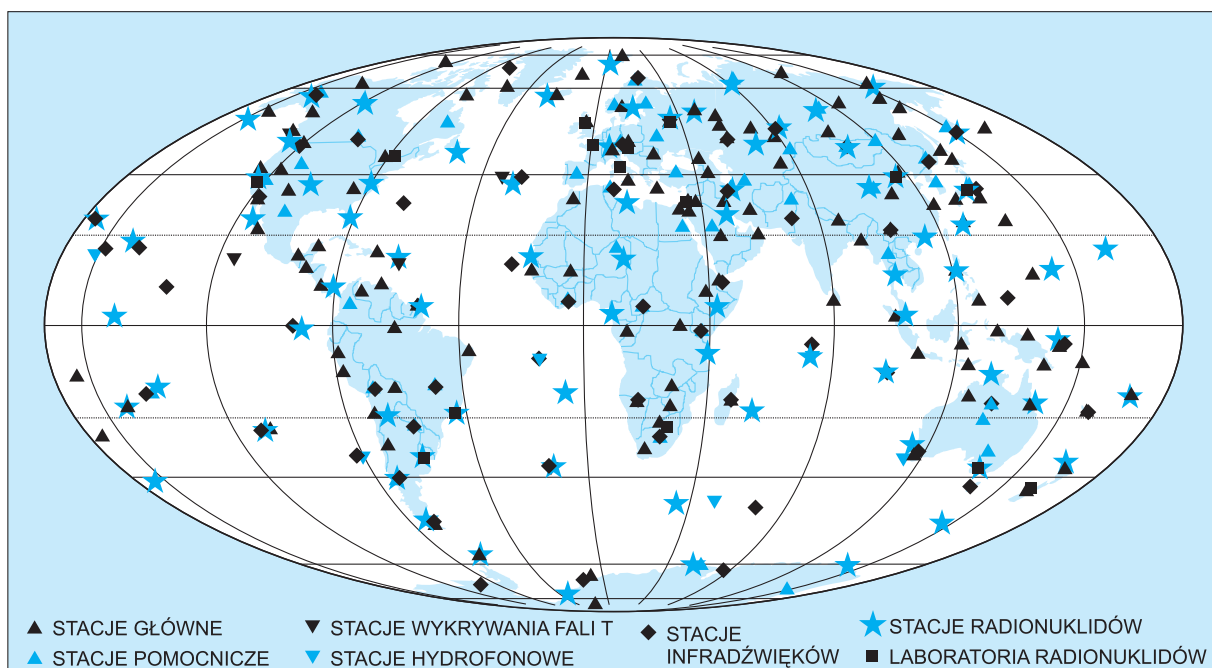
### PROMIENIOWANIE JĄDROWE

Szczególną cechą wybuchów jądrowych jest emisja promieniowania jądrowego składającego się z promieni  $\gamma$  neutronów, cząstek  $\beta$  niewielkiej ilości cząstek  $\alpha$ , jak również promieniowania rentgenowskiego. Dla celów ochrony ludności przyjmuje się

umownie, że promieniowanie jądrowe jest emitowane w dwóch etapach:

- początkowe promieniowanie jądrowe składające się głównie z promieniowania  $\gamma$  i neutronów powstałych w wyniku rozszczepienia,
- resztkowe promieniowanie jądrowe składające się z promieniowania  $\beta$  i promieniowania  $\gamma$  z substancji radioaktywnych będącymi produktami rozszczepienia.

Za granicę podziału przyjmuje się okres 1 min po wybuchu, tzn. promieniowanie przed upływem minuty od chwili wybuchu jest promieniowaniem

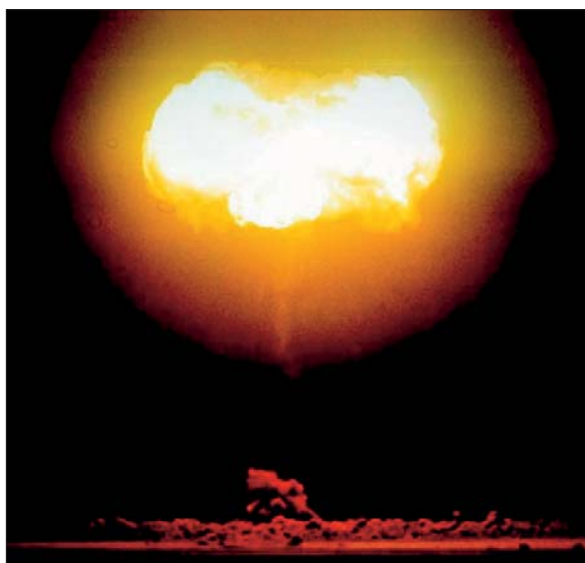


Rys. 8. Światowa sieć stacji wykrywania wybuchów jądrowych CTBTO





Fot. 1. Faza I wybuchu jądrowego



Fot. 2. Faza II wybuchu jądrowego



Fot. 3. Faza III wybuchu jądrowego

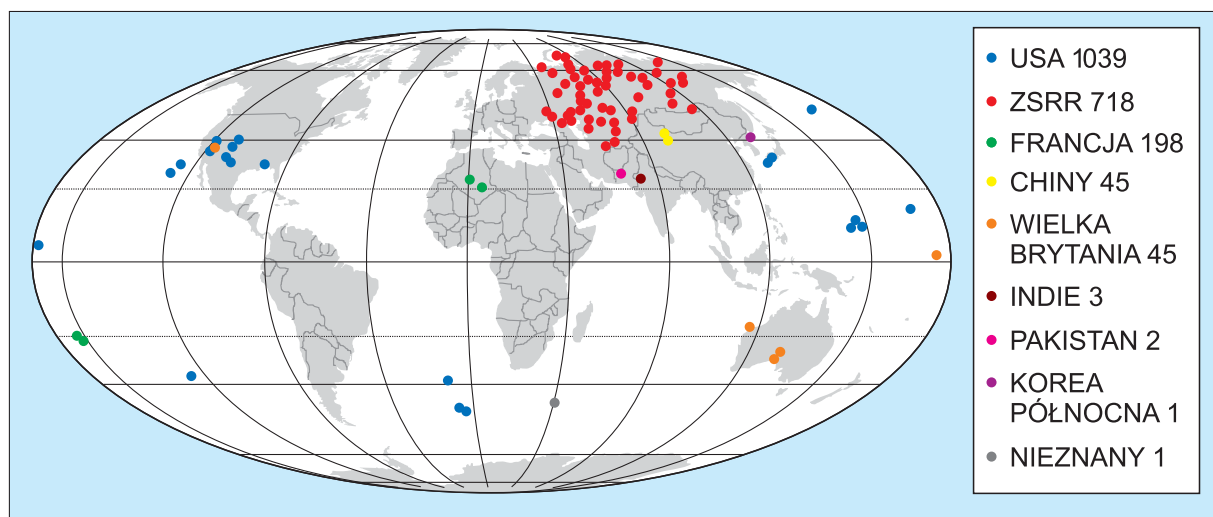
początkowym, po tym czasie promieniowaniem resztkowym. Energia promieniowania początkowego stanowi około 35% całkowitej emitowanej energii. Charakter źródła promieniowania resztkowego zależy od wielu parametrów, np. od stopnia wpływu reakcji rozszczepienia lub syntezy na siłę wybuchu.

Dla celów wykrywania wybuchów jądrowych oraz dla celów ochrony ludności przyjmuje się, że promieniowanie resztkowe jest emitowane przez pyły radioaktywne, pary, resztki materiału urządzenia wybuchowego docierające do ziemi w dwóch etapach. Opad wczesny docierający do powierzchni ziemi spowodowany opadem cięższych cząstek radioaktywnych, (stanowiących około 80% całkowitego opadu) w ciągu 24 godz. Od chwili wybuchu opad opóźniony składający się z bardzo małych praktycznie niewidocznych cząstek o niewielkim stężeniu przenoszony jest nawet na znaczne odległości. Opady mogą przemieszczać się daleko od miejsca wybuchu skażając odległe tereny. Znajomość czasu i kierunku przemieszczania się chmury radioaktywnej ma zasadnicze znaczenie dla prognozowania skażenia terenów opadami, jak i pozwala na weryfikację parametrów wybuchu. Przy silnych wybuchach znaczna część całkowitego opadu jest wynoszona poza atmosferę. O wybuchu jądrowym świadczą duże stężenie izotopów  $Cs^{137}$ ,  $H^3$ ,  $C^{14}$ ,  $Sr^{90}$ ,  $I^{131}$  jak również pojawienie się innych (około 300), rzadko występujących izotopów. Najpowszechniej są mierzone izotopy Cs i Sr, szczególnie niebezpieczne dla ludzi, których długi czas rozpadu ułatwia ich wykrywanie. Systemy wykrywania stosują różne metody wyodrębniania najbardziej charakterystycznych dla wybuchów jądrowych nawet śladowych ilości izotopów. Tak np. wykryto niewielkie ilości plutonu i technetu w osadach morskich w pobliżu wybrzeży Kanady pochodzących z bomb zrzuconych na Nagasaki i Hiroszimę. Jednoznacznym potwierdzeniem wybuchów podziemnych jest wykrycie nawet niewielkich ilości radioaktywnych izotopów gazów szlachetnych (ksenonu, argonu, kryptonu).

Stacje pomiarowe rozprzeszczerzone w różnych miejscach kuli ziemskiej pozwalają potwierdzić zaistnienie wybuchu, a nawet określić jego typ i rodzaj użytego materiału.

#### TRAKTAT O CAŁKOWITYM ZAKAZIE PRÓB JĄDROWYCH (COMPREHENSIVE NUCLEAR-TEST-BAN TREATY CTBTO)

Duża ilość doświadczalnych wybuchów jądrowych (około 2000 od detonacji pierwszej próbnej bomby jądrowej 16 lipca 1945 w Stanach Zjednoczonych do 29 lipca 1996 w Chinach) spowodowała



Rys. 9. Lokalizacja prób jądrowych CTBTO



Fot. 4. Faza IV wybuchu jądrowego



Fot. 5. Faza V wybuchu jądrowego

wyraźne zwiększenie zagrożeń skażeniem substancjami promieniotwórczymi w niektórych rejonach świata i zmobilizowała opinię publiczną do żądania wprowadzenia ograniczeń prób jądrowych. Pierwsze ograniczenia dotyczące wybuchów powietrznych wprowadzono w 1963 roku. Próby podziemne rozpoczęte w 1951 roku były prowadzone do roku 1996, tzn. do chwili podpisania Traktatu o Całkowitym Zakazie Prób Jądrowych. Traktat ten powołał jednocześnie międzynarodową organizację CTBTO z siedzibą w Wiedniu. Zadaniem CTBTO jest kontrola wypełniania warunków Traktatu. Traktat podpisało początkowo 177, a w chwili obecnej 180 państw, z czego 148 go ratyfikowało. By Traktat mógł zacząć obowiązywać, konieczna jest ratyfikacja przez wszystkich jego uczestników. Polska ratyfikowała Traktat – 25 maja 1999 roku.

W celu realizacji kontroli warunków Traktatu CTBTO rozbudowuje Międzynarodowy System Monitorowania (*International Monitoring System – IMS*), docelowo tworzący sieć 321 stacji pomiarowych i 16 laboratoriów analizy radionuklidów rozmieszczonych po całym świecie w taki sposób, aby pokryty był cały obszar gdzie mogłyby być przeprowadzane próby. Rozmieszczenie punktów pomiarowych zostało uzgodnione i zapisane w Aneksie do Traktatu. Część stacji jest trudno dostępna i jest sterowana zdalnie. W systemie wykorzystywane są najnowsze technologie, a stacje pomiarowe są stale modernizowane. Stacje monitorowania z których dane przekazywane są bezpośrednio do centrali w Wiedniu i stanowią sejsmiczną sieć podstawową – docelowo 50 (obecnie działa 38). Do systemu monitorowania należą także stacje krajowe sejsmiczna sieć pomocnicza – docelowo 120 (obecnie działa 83) zbierające dane przechowywane w systemach krajowych i udostępniane na żądanie do Międzynarodowego Centrum Danych w Wiedniu. System posiada stacje monitorowania zbierające dane

sejsmiczne (170), hydroakustyczne (11), infradźwiękowe (60) i stacje wykrywania radionuklidów (80).

W przypadku podejrzenia, że nastąpiła detonacja materiału jądrowego w określonym obszarze organizowana jest międzynarodowa specjalna (*On Site Inspection*) inspekcja w terenie składająca się ze specjalistów z różnych dziedzin, której zadaniem jest ustalenie czy taka eksplozja rzeczywiście miała miejsce.

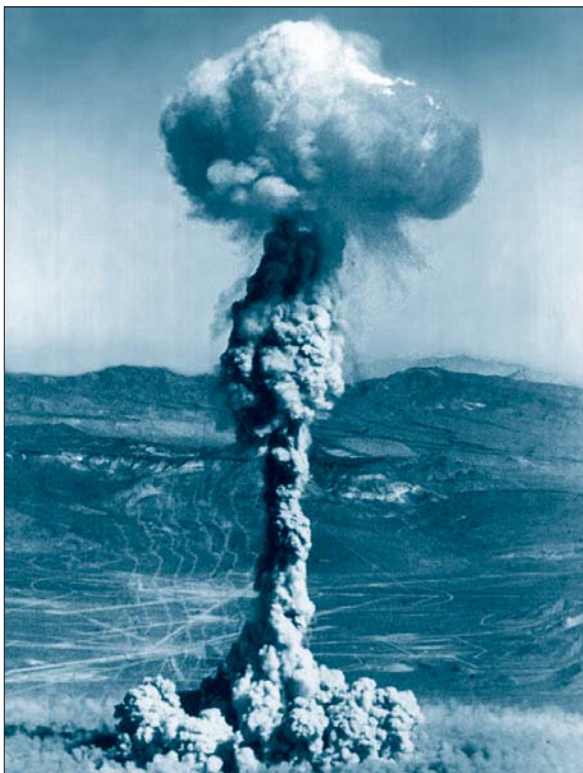
Mimo, że Traktat jeszcze formalnie nie obowiązuje, prace nad organizacją infrastruktury reżimu weryfikacyjnego CTBO sieci trwają i nawet są organizowane specjalne ćwiczenia, aby zwiększyć efektywność systemu w których biorą udział specjaliści wielu dziedzin nauki z Państw Sygnatariuszy.

dr Krzysztof Rzymkowski  
STOWARZYSZENIE EKOLOGÓW NA RZECZ ENERGII  
NUKLEARNEJ SEREN, WARSZAWA

## LITERATURA

[1] Jezierski Grzegorz, Energia jądrowa wczoraj i dziś. WNT Warszawa 2005

- [2] Kubowski Jerzy, Broń jądrowa. WNT Warszawa 2008  
 [3] Andre Gsponer, Jean-Pierre Hurni, Skróty raportu (J. Kubowski). Czwartą generacją broni jądrowej PTJ 4/2002  
 [4] CBTO Bulletin Nr 3 Austria 2001  
 [5] CTBTO: Annual Report 2006  
 [6] Rzymkowski Krzysztof, Powietrzne i powierzchniowe wybuchy jądrowe, Przegląd Obrony Cywilnej Warszawa 1985  
 [7] Gladstone S, Skutki działania broni jądrowej T1/2 PTJ 1963  
 [8] Effects of Nuclear weapons Tests. Scientific Facts <http://glasstone.blogspot>  
 [9] Irvine T, Bubble acoustic Vibration data.com 2002  
 [10] Guz Zbigniew, Pododdziały wykrywania wybuchów jądrowych Biuletyn Chemik nr 2/2007  
 [11] Inrasound monitoring system Katalog BIOAGE s.r.l Lamezia Terme Italy  
 [12] Monitoring System CBTO [apansa.gov.au](http://apansa.gov.au)  
 [13] T.G.Varghese, Vijai Kumar, Detection and Location of an Atmospheric Nuclear Explosion by Microbarograph Arrays Nature 225 1970  
 [14] Richard Lanza, Nuclear Techniques for Explosive Detection: Current Prospects and Requirements for future development MIT Cambridge IEEE 2005  
 [15] Mikhailova N.N, Sokolova I.N, Kazakhstan national monitoring system of nuclear explosions and earthquakes CTBTO org.  
 [16] W.R.Walter, Seismic Monitoring Techniques put to a test I Livermore National Laboratory 1998  
 [17] Marti W Lawrence, Maria Galindo Arranz, A Global Monitoring System for CTBTO Plans and Progress ICA/ASA 98 Seattle 1998



Fot. 6. Wybuch powietrzny faza końcowa



Fot. 7. Wybuch podwodny