

RYSZARD ŁOMNICKI, WŁADYSŁAW PAWLAK, ERNEST POLESZAK  
Przedsiębiorstwo Geofizyki Morskiej i Lądowej Górnictwa Naftowego

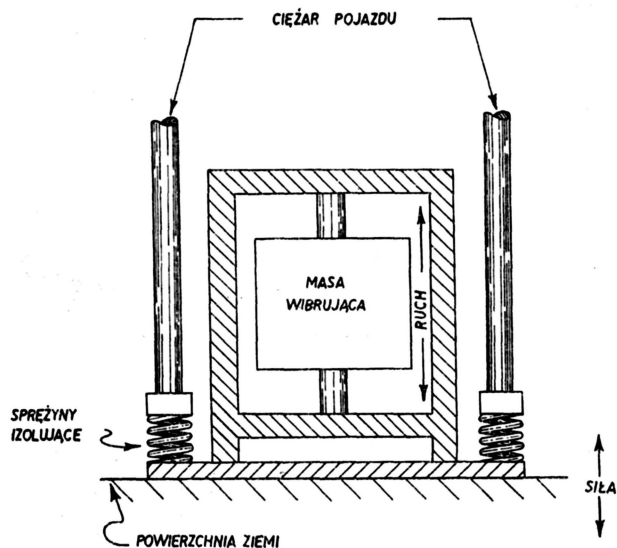
## WZBUDZANIE DRGAŃ SEJSMICZNYCH SYSTEMEM VIBROSEIS\* I JEGO PIERWSZE ZASTOSOWANIE W POLSCE

UKD 550.834.07.05:62-868 Vibroseis (73):681.3

Przy prowadzeniu prac sejsmicznych w Polsce na wielu obszarach wystąpiły liczne trudności związane ze stosowaniem materiałów wybuchowych jako źródła wzbudzenia fali sejsmicznej. Pogłębiły się one szczególnie przy stosowaniu wysokiej krotności profilowania sejsmicznego. Wiązały się one głównie z odwierceniem znacznej liczby otworów strzałowych, stosowaniem materiałów wybuchowych oraz zagrożeniem horyzontów wodonośnych, co w wielu rejonach wręcz uniemożliwiało prowadzenie prac sejsmicznych. Wyłoniła się zatem potrzeba odejścia od wzbudzenia fali sejsmicznej sposobem tradycyjnym, za pomocą

materiałów wybuchowych, i zastosowania bezwybuchowego źródła wzbudzenia. Według posiadanego rozoznania najlepszy w tym zakresie wydawał się być system Vibroseis, którego zastosowanie na świecie było coraz większe a wyniki uzyskiwane za jego pomocą nie odbiegały od wyników uzyskanych konwencjonalnie. Nie bez znaczenia były też względy ekonomiczne, gdyż koszt 1 km profilu sejsmicznego wykonanego systemem Vibroseis jest z reguły znacznie niższy niż w przypadku stosowania innych sposobów. Wynika to głównie z eliminacji wierceń, materiałów wybuchowych, mniejszego zatrudnienia, mniejszych szkód, zagrożenia bezpieczeństwa pracy, itp. W tej sytuacji podjęto decyzję zakupienia w St. Zj. kom-

\* Nazwa zastrzeżona przez Continental Oil Company, USA.



Ryc. 1. Zasada działania wibratora.  
Fig. 1. Principle of vibrator operation.

pletnych systemów Vibroseis, dla potrzeb górnictwa naftowego. Przedsiębiorstwo Geofizyki Morskiej i Lądowej Górnictwa Naftowego w Toruniu — pierwsze w Polsce rozpoczęło w 1976 r. — eksploatację tego systemu w pracach połowych. Na zakupiony zestaw urządzeń systemu Vibroseis składa się 5 wibratorów typu Y-1100 CC, produkcji firmy FAILING zamontowanych na pojeździe o napędzie hydraulicznym firmy BIRDWAGEN oraz komputerowy system połowy CFS-I produkcji firmy TEXAS INSTRUMENTS.

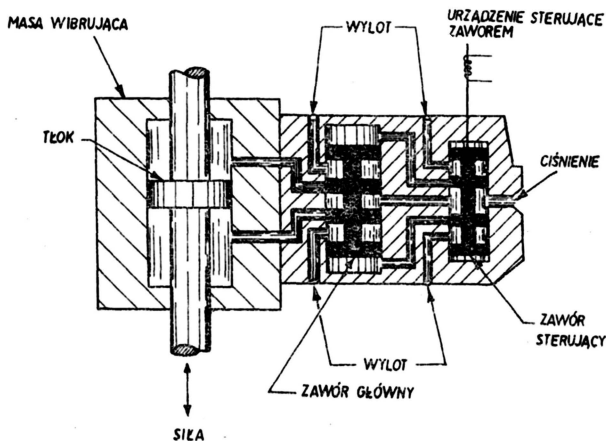
#### ZASADA DZIAŁANIA SYSTEMU VIBROSEIS

Metoda Vibroseis polega na wywołaniu drgań gruntu za pomocą masy drgającej wibratora. Masa ta wibruje z określoną z góry zmienną częstotliwością, w czasie określonego interwału czasowego. Wibracje masy przenoszone są do ziemi za pomocą docisniętej do gruntu płyty (ryc. 1). Ruch masy drgającej wywołany jest ciśnieniem hydraulicznym i sterowany w zakresie częstotliwości drgań przez hydrauliczny zawór sterujący. Zasadę sterowania pokazano na ryc. 2. Zawór sterujący sprawia, że ciśnienie oleju podawane jest raz z jednej raz z drugiej strony tłoka, powodując w ten sposób wibrację masy. Mówimy wówczas, że został wzbudzony „sweep”, tj. sygnał o określonej i zmiennej częstotliwości i określonym czasie trwania.

Stosowane są dwa rodzaje sweepów — wzrastający (upsweep) i malejący (downsweep). Ilustruje je ryc. 3. W praktyce nie wzbudza się pojedynczego sweepu, lecz całą ich grupę, która jest sumowana po zarejestrowaniu przez aparaturę sejsmiczną. Otrzymuje się wówczas sumogram (stock). Przedstawiono go na ryc. 4. Jest on z reguły nieczytelny i wymaga dalszej obróbki.

Następna faza to korelacja sweepu generowanego ze sweepem odbitym. Wynikiem tej operacji jest korelogram (ryc. 5), który można traktować jak sejsmogram uzyskany sposobem tradycyjnym. Funkcja korelacyjna na korelogramie zaznacza się jako szereg impulsów o wyraźnej zgodności fazowej, które stanowią odpowiednik konwencjonalnych refleksów.

Ogólnie, można stwierdzić daleko idącą analogię wyników uzyskiwanych sposobem tradycyjnym i Vibroseis. Można posłużyć się następującym przykładem. Jeśli wzbudzimy falę sejsmiczną za pomocą materiałów wybuchowych to powinniśmy zarejestrować wąski, mocno wyrażony impuls (ryc. 6a). W rzeczywistości impuls ten miał taki kształt, jak na ryc. 6b, wskutek filtracyjnego działania ośrodka ziemskiego. Jeśli zarejestrujemy nasz sygnał aparaturą



Ryc. 2. Sposób sterowania wibratorem.  
Fig. 2. Vibrator control.

sejsmiczną i zastosujemy niezbędny filtr elektryczny to impuls przybierze postać jak na ryc. 6c. Należy zaznaczyć, że impuls ten będzie się śledził jeśli zastosujemy filtrację pasmową zarówno 20—50 Hz, jak i 50—100 Hz. Świadczy to o tym, że nasz impuls nie zawiera jakiegokolwiek jednej częstotliwości, lecz całe ich widma. Ryc. 6d, e, f przedstawiają widma przytoczonych sygnałów. Wąski impuls sejsmiczny zawiera wszystkie częstotliwości, podczas gdy sygnał przefiltrowany utracił niskie i wysokie składowe widma. Przykład ten stanowi ilustrację znanej zależności pomiędzy kształtem impulsu a jego widmem. Fakt ten jest praktycznie wykorzystywany w technice Vibroseis.

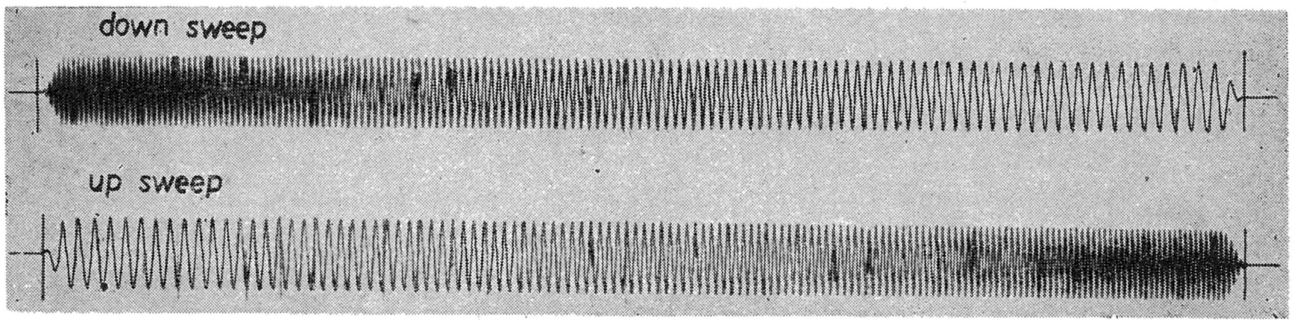
Dla zilustrowania tego posłużymy się przykładem. Weźmy impuls sejsmiczny wzbudzony konwencjonalnie, na który składają się składowe widma od  $F_1$  do  $F_4$ . Impuls taki można również otrzymać wzbudzając kolejno poszczególne częstotliwości widma (ryc. 7). Wzbudzając w ten sposób uzyskujemy regularny sweep. Można zatem przyjąć, że wzbudzanie fali sejsmicznej systemem Vibroseis jest w pełni dopuszczalne i w niczym nie narusza zasad sejsmicznych. Ilustracją tego jest ryc. 8. Na ryc. 8a przedstawiono prosty przypadek rejestracji pojedynczej trasy sejsmicznej, uzyskanej sposobem konwencjonalnym, na której widoczne są 3 refleksy. Analogiczny zapis przedstawiono na ryc. 8f, z tym że zapis ten uzyskano techniką Vibroseis. Poszczególne etapy pracy przedstawiają pozostałe zapisy ryc. 8: b) sweep generowany, c i d) sweeepy odbite od poszczególnych granic sejsmicznych, e) sumogram, g) początek rejestracji (zero time).

#### KORELACJA

Funkcja korelacyjna jest miarą koherencji (podobieństwa) dwóch sygnałów. Można to zapisać następująco:

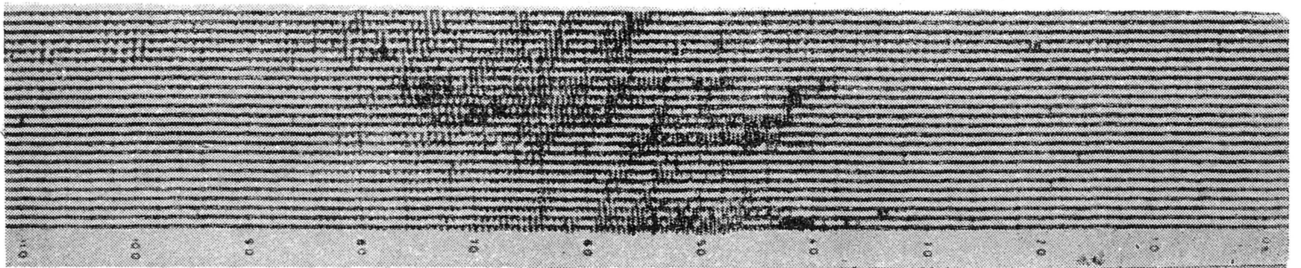
$$\Phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) y(t + \tau) dt$$

Jeśli za  $x(t)$  weźmiemy sygnał generowany, a za  $y(t)$  sygnał zarejestrowany, zaś  $\tau$  oznacza przesunięcie sygnałów względem siebie — to otrzymamy wówczas funkcję korelacyjną sygnału sejsmicznego, której wykres podano na ryc. 9. Funkcja ta kształtem swojego wykresu jest zbliżona do znanego impulsu Ricker'a i może być uważana za impuls (refleks) sejsmiczny. Zawiera ona informację o podobieństwie korelowanych sygnałów w zakresie wspólnych dla obu sygnałów częstotliwości. Inaczej mówiąc, jeżeli korelować będziemy sygnał A o częstotliwości 10—80



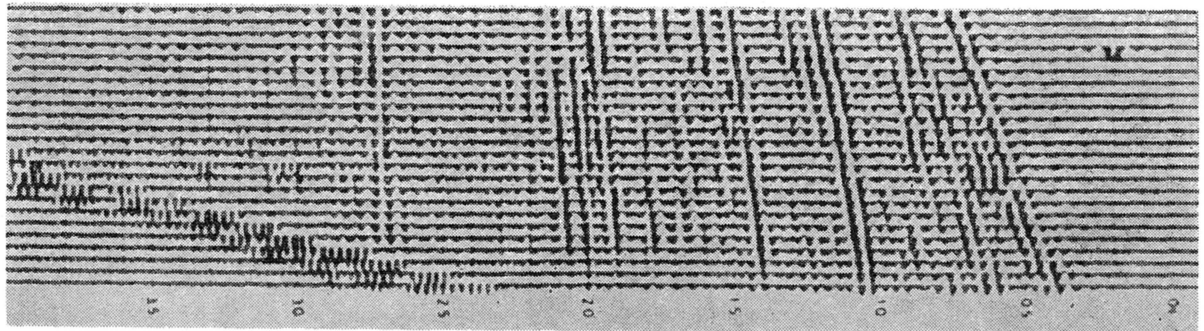
Ryc. 3. Sweep wzrastający (upsweep) i malejący (downsweep).

Fig. 3. Upsweep and downsweep.



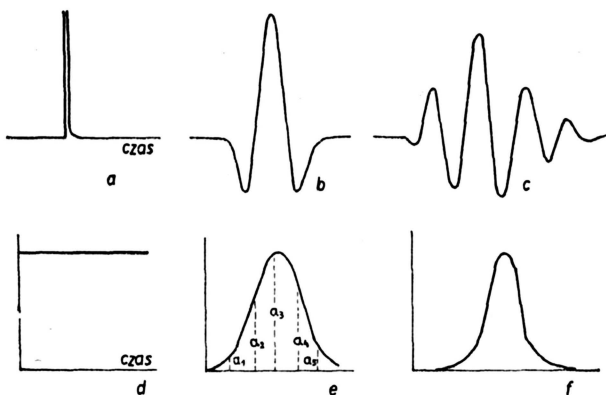
Ryc. 4. Sumogram.

Fig. 4. Stacking.



Ryc. 5. Korelogram.

Fig. 5. Correlogram.



Ryc. 6. Impuls sejsmiczny i jego widmo.

Fig. 6. Seismic wavelet and its spectrum.

Hz z sygnałem B — o częstotliwości 5—30 Hz, to wspólne dla obu sygnałów częstotliwości będą 10—30 Hz i tylko w tym przedziale możliwa będzie ich korelacja. Funkcja korelacyjna charakteryzuje się następującymi podstawowymi parametrami.

1. **Definicja.** Jest to stosunek centralnej minimalnej amplitudy do sąsiedniej minimalnej amplitudy (ryc. 10);

$$D = \frac{A_1}{A_2}$$

Charakteryzuje ona nam wyrazistość funkcji korelacyjnej. Wartość definicji wzrasta w miarę powiększania się pasma częstotliwościowego, mierzonego w oktawach. W praktyce definicja jest zadowalająca już przy dwóch oktawach.

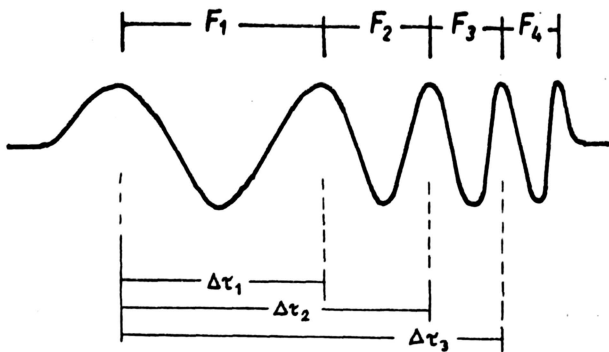
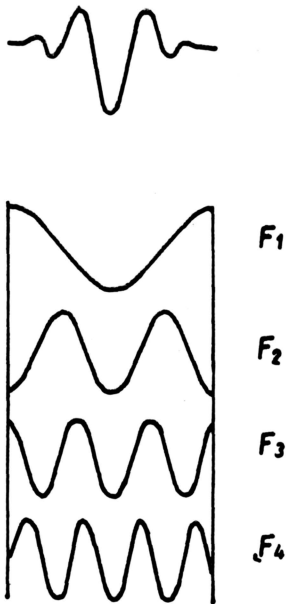
2. **Rozdzielczość.** Jest to szerokość centralnego minimum funkcji korelacyjnej (ryc. 11) mierzona w sekundach. Można ją zawęzić przez podwyższenie częstotliwości korelowanych sygnałów.

3. **Szerokość.** Jest to czas trwania funkcji korelacyjnej (ryc. 12). Można ją wyliczyć według formuły:

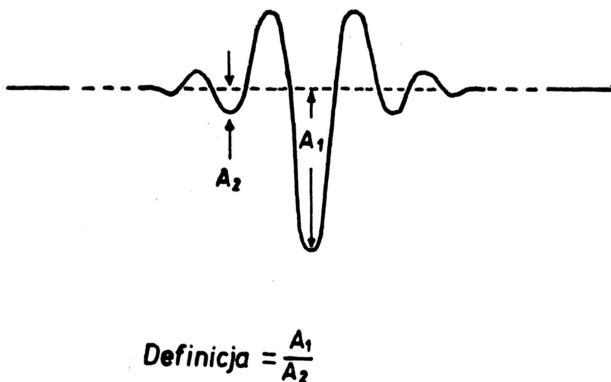
$$T = \frac{1}{2 \text{ szerokość pasma}}$$

Z procesem korelacji związane są pewne nie uniknione zakłócenia, z których najważniejsze to tzw. ghost. Polega on na tym, że w czasie pracy wibratora, oprócz zadanych częstotliwości, generuje się również harmoniczne wyższego rzędu. W procesie korelacji korelują się one z częstotliwościami sweepu użytkowego, w zakresie wspólnych z nim częstotliwości. Wyraża się to pojawieniem na korelogramie liczących, kolejno po sobie następujących maksimów, tworzących jakby nowy sweep. Czas pojawienia się ghostu można w przybliżeniu określić za pomocą następującej formuły:

$$T = \frac{F_N \cdot t_s}{F_P - F_K}$$



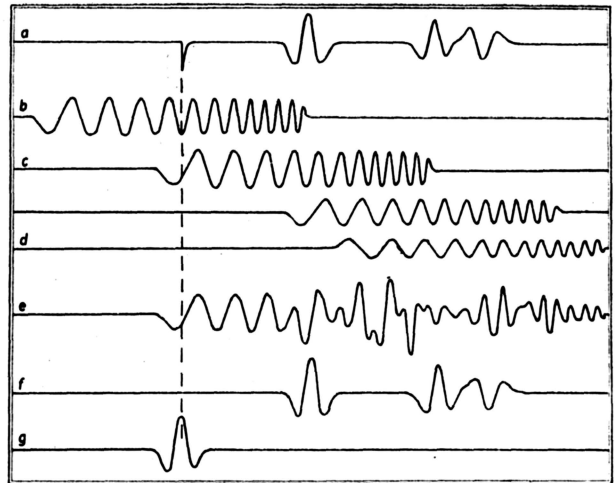
Ryc. 7. Impuls sejsmiczny i jego częstotliwości.  
Fig. 7. Seismic wavelet and its frequencies.



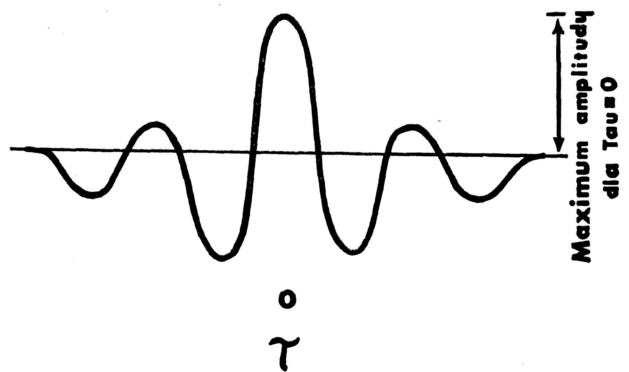
Ryc. 10. Definicja funkcji korelacyjnej.  
Fig. 10. Definition of correlation function.

gdzie:

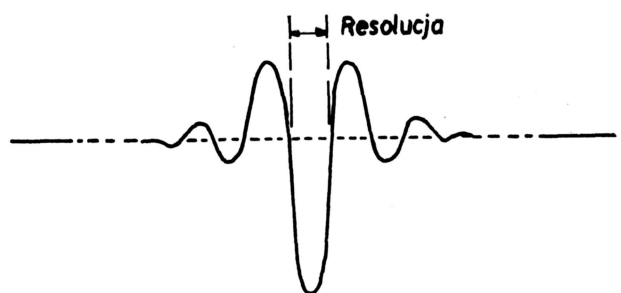
- $T$  — czas pojawienia się ghostu
- $F_N$  — najniższa częstotliwość sweeputu
- $F_K$  — końcowa częstotliwość sweeputu
- $F_P$  — początkowa częstotliwość sweeputu
- $t_s$  — czas trwania sweeputu



Ryc. 8. Porównanie zapisów trasy sejsmicznej uzyskanych sposobem konwencjonalnym i Vibroseis.  
Fig. 8. Seismic record of dynamite energy source in comparison with that of Vibroseis.



Ryc. 9. Funkcja korelacyjna.  
Fig. 9. Correlation function.

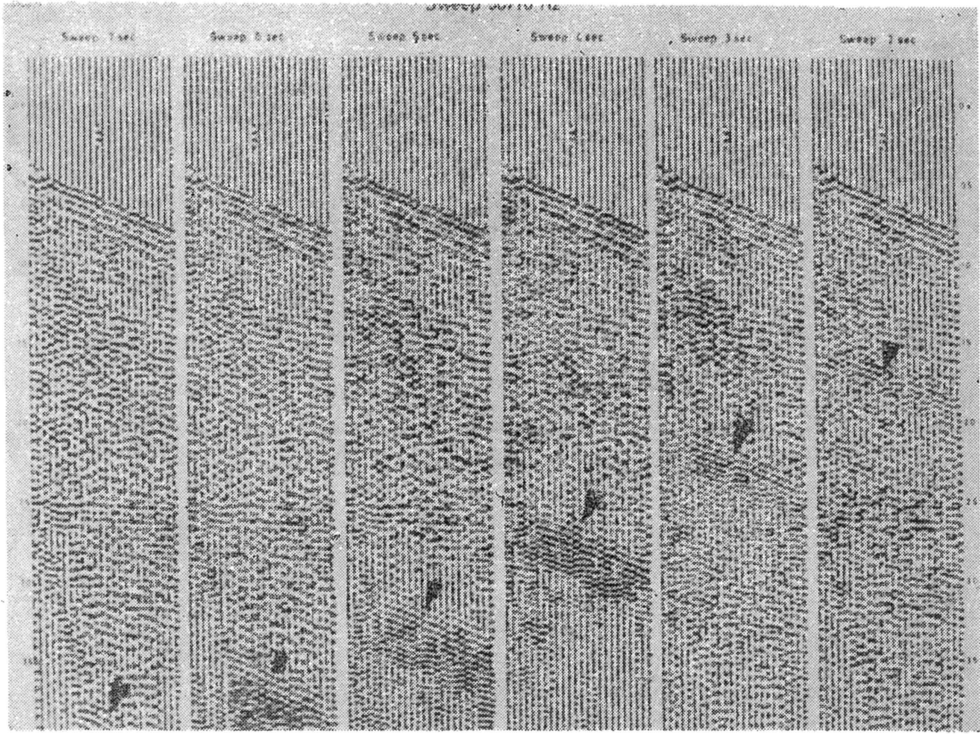


Ryc. 11. Rezolucja funkcji korelacyjnej.  
Fig. 11. Resolution of correlation function.

Zadowalającym sposobem walki z ghostem jest wydłużanie czasu trwania sweeputu. Dzięki temu można przesunąć ghost poniżej interesującej nas części zapisu sejsmicznego. Ryc. 13 przedstawia występowanie ghostu i jego przesuwanie w dół, w zależności od długości stosowanego sweeputu.

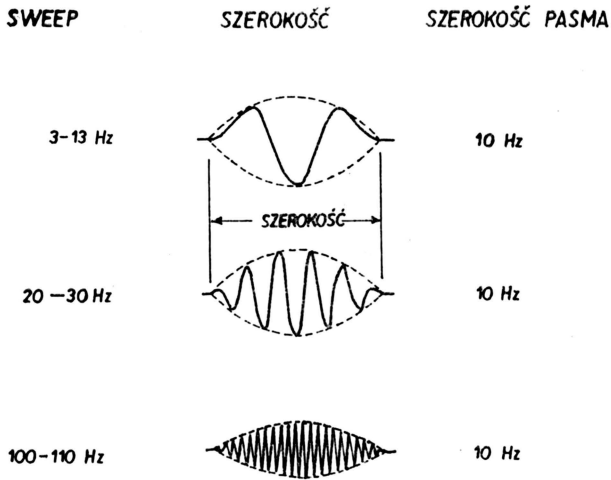
#### METODYKA PRAC POŁOWYCH SYSTEMEM VIBROSEIS

Wzbudzając falę sejsmiczną na powierzchni ziemi wywołujemy, oprócz fali użytecznej, wiele fal zakłócających, które należy skutecznie eliminować. W tym



Ryc. 13. Ghost i jego przesuwanie poza zapis użyteczny.

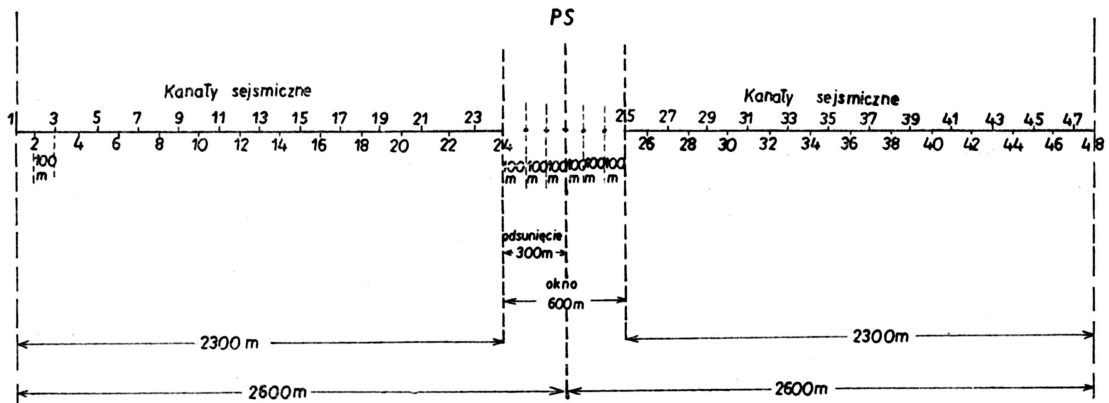
Fig. 13. Displacement of ghost outside of useful record.



Ryc. 12. Szerokość funkcji korelacyjnej.  
Fig. 12. Width of correlation function.

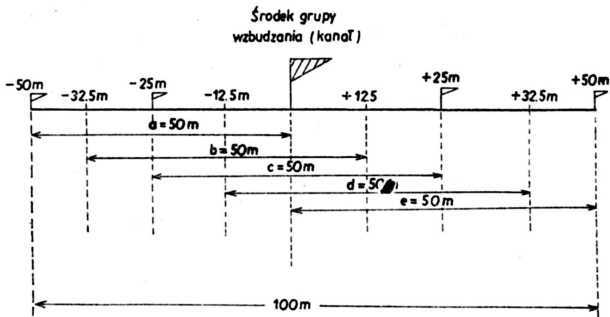


Ryc. 14. Wykres skuteczności stosowanej długości bazy grupowania.  
Fig. 14. Effectiveness of geophone pattern length.



Ryc. 15. Stosowana geometria schematu obserwacji.

Fig. 15. Profile geometry application.

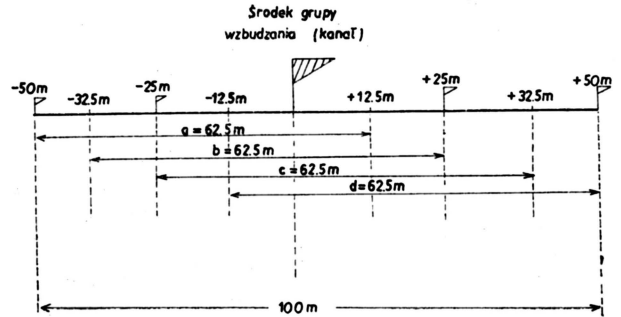


Waga grupy 123454321

Każdy vibrator wykonuje 20 sweepów co 2,5 m każdy.

Ryc. 16. Schemat wzbudzania przy 5 vibratorach.

Fig. 16. Source arrangement using 5 vibrators.

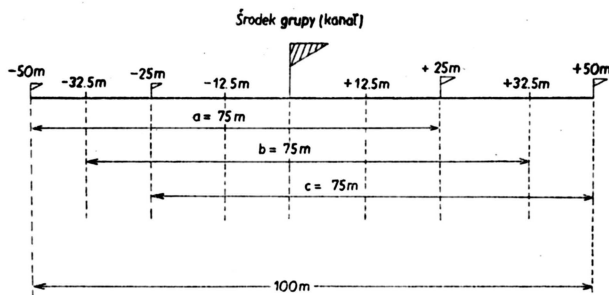


Waga grupy: 123444321

Każdy vibrator wykonuje 20 sweepów co 3,1 m każdy.

Ryc. 17. Schemat wzbudzania przy 4 vibratorach.

Fig. 17. Source arrangement using 4 vibrators.



Waga grupy: 123333321

Każdy vibrator wykonuje 20 sweepów co 3,7 m każdy.

Ryc. 18. Schemat wzbudzania przy 3 vibratorach.

Fig. 18. Source arrangement using 3 vibrators.

celu konieczne jest stosowanie metodyki badań bardziej złożonej niż metody konwencjonalne. Chodzi tu szczególnie o większą ilość grupowanych geofonów i wyższą krotność profilowania sejsmicznego, staranny dobór parametrów grupy i rozstawu. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę z tego, że nawet najlepiej dobrane parametry nie mogą być idealne i stanowią z reguły świadomy kompromis. Przykładem tego może być chociażby dobór długości bazy grupowania geofonów i vibratorów. Optymalna długość bazy grupowania powinna zabezpieczać wystarczającą przepuszczalność fali użytecznej oraz dostateczne tłumienie fal zakłócających. Ryc. 14 przedstawia wykres skuteczności stosowanej bazy grupowania. Najkorzystniejsze parametry grupy według tego wykresu używamy wówczas, gdy mamy duży procent przepuszczenia fali użytecznej, ale jednocześnie procent przepuszczania fal zakłócających jest niewielki. Warunki takie spełnia zależność:

$$\text{dla fal użytecznych} > \frac{\text{Długość bazy grupowania}}{\text{Długość fali}} > 1 \text{ dla fal zakłócających}$$

Oba te parametry są w jawnej sprzeczności ze sobą i wymagają rozwiązania kompromisowego.

Nie bez znaczenia są tu również względy ekonomiczne i techniczne, gdyż w praktyce można stosować ograniczoną liczbę elementów grupowania. W pracach polowych, wskutek pogorszenia się stosunku sygnał/zakłócenie, zachodzi często potrzeba zmiany liczby stosowanych elementów. Ważna jest również ocena, jakiej poprawy należy się w związku z tą zmianą spodziewać. Oceny tej można dokonać za pomocą współczynnika złożoności grupy, który wynosi:

$$Z = g \cdot s \cdot w$$

gdzie:

- $g$  — ilość geofonów na kanał,
- $s$  — ilość sweepów na 1 PS z pojedynczego vibratora,
- $w$  — ilość pracujących vibratorów.

Uzyskaną poprawę stosunku sygnał/zakłócenie możemy określić jako

$$I = \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}$$

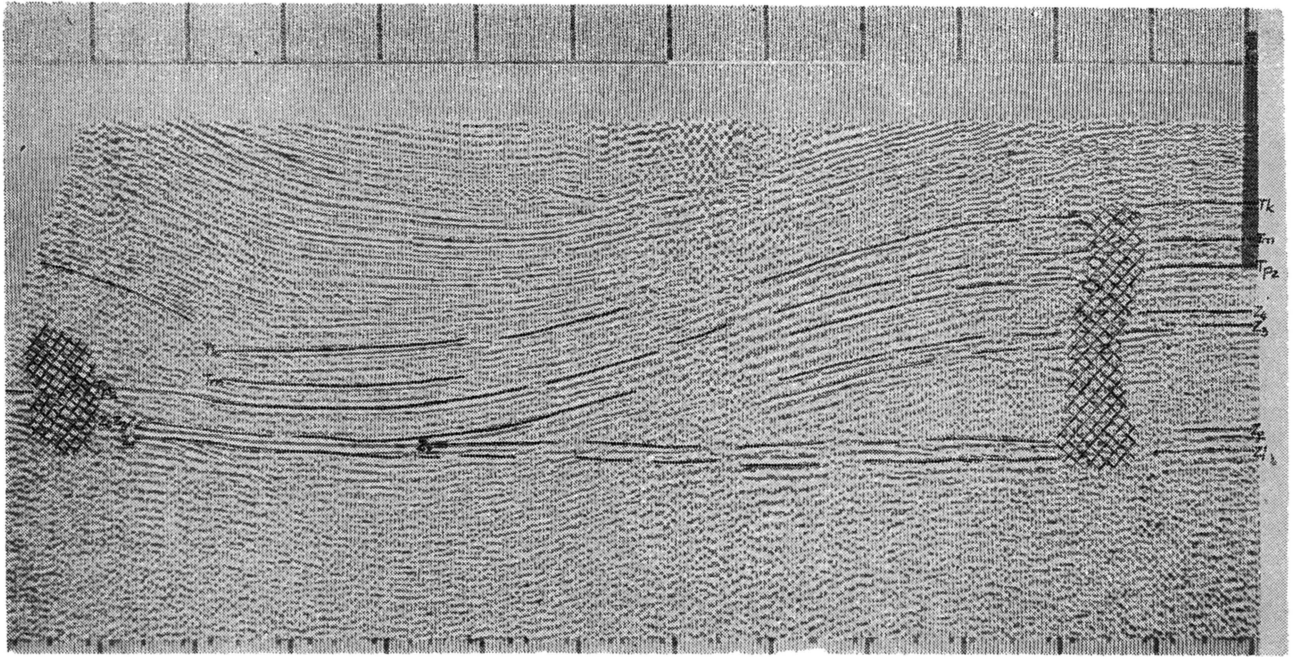
gdzie:

- $Z_2$  — współczynnik złożoności grupy po dokonanej zmianie,
- $Z_1$  — współczynnik złożoności grupy przed zmianą.

Na podstawie omówionych zasad zaprojektowano metodykę prac polowych dla systemu Vibroseis w Polsce. Pierwsze prace tym systemem wykonane zostały w synklinorium mogileńskim, w rejonie Oborniki Wlkp. — Wągrowiec. Biorąc pod uwagę warunki geologiczne oraz możliwości techniczne i ekonomiczne ustalono następujące warunki i parametry rozstawu sejsmicznego:

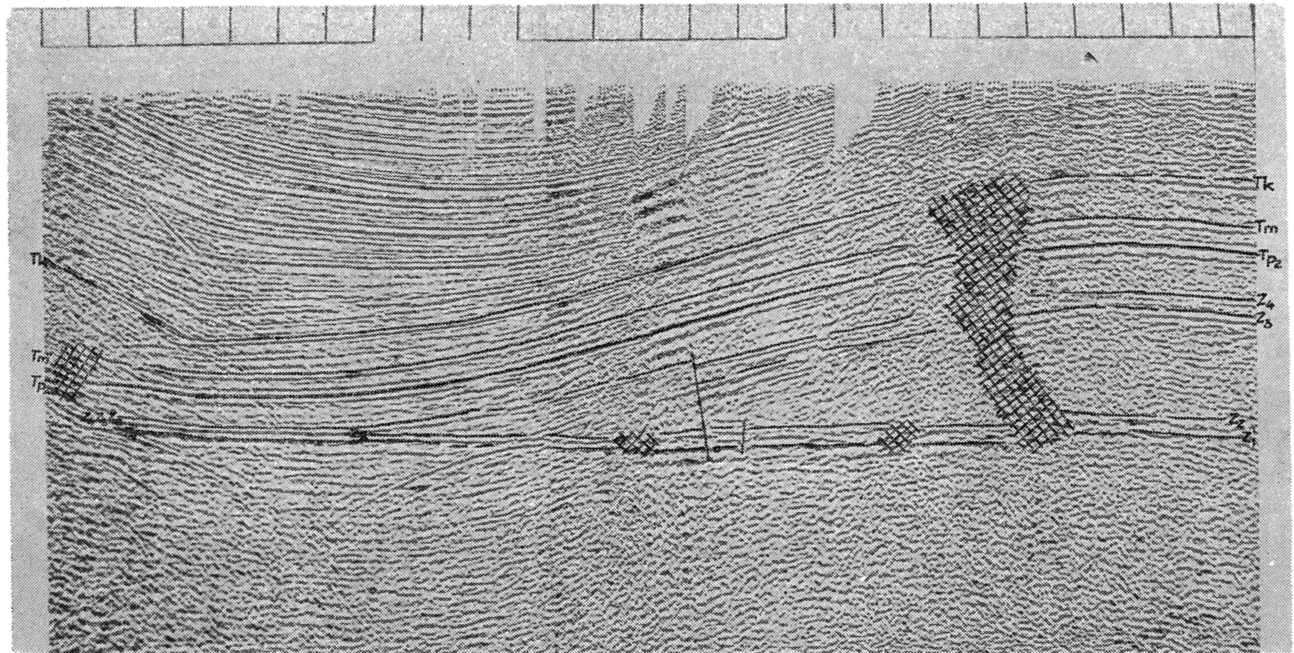
aparatura sejsmiczna	— 48-kanałowa typ DFS-IV sprzężona z komputerem CFS-I
wzbudzenie	— centralne
odsunięcie R	— 300 m
okno	— 600 m
odległość między kanałami	— 100 m
odległość najdalszej trasy $X_{max}$	— 2600 m
ilość grupowanych geofonów/ /kanał	— 40
odległość między geofonami w grupie	— 5 m
krotność profilowania sejsmicznego	— 2400%
maksymalna ilość vibratorów	— 5
minimalna ilość vibratorów	— 3
ilość sweepów na 1 PS	— 80—100
długość bazy grupowania	— 100 m
długość bazy wibrowania	— 100 m
rodzaj sweepu	— sweepdown
częstotliwość sweepu	— 48—12 Hz
długość sweepu	— 12 s

Ryc. 15 ilustruje geometrię stosowanego schematu obserwacji, a ryc. 16, 17, 18 przedstawiają schemat wzbudzania przy zastosowaniu 5, 4 i 3 vibratorów. Na ryc. 19 przedstawiono profil sejsmiczny, wykonany i opracowany po raz pierwszy w Polsce, z za-



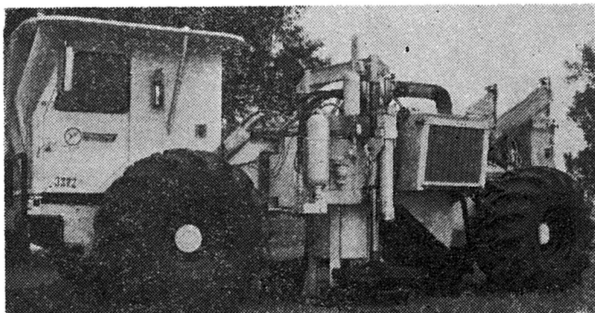
Ryc. 19. Przekrój sejsmiczny wykonany systemem Vibroseis.

Fig. 19. Seismic section after Vibroseis system application.



Ryc. 20. Przekrój wykonany sposobem konwencjonalnym.

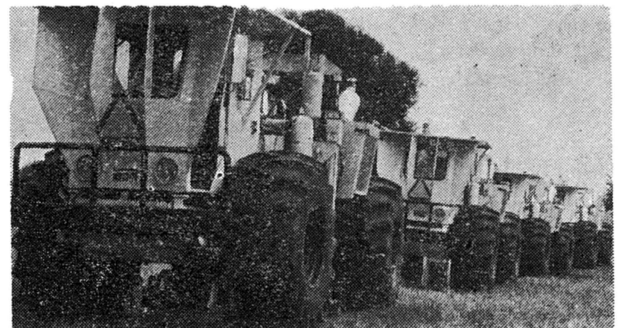
Fig. 20. Seismic section after use dynamite source of energy.



Ryc. 21. Pojedynczy vibrator przy pracy.

Fot. B. Taberski

Fig. 21. Single vibrator in field operation. (Photo by B. Taberski).



Ryc. 22. Zespół vibratorów przy pracy

Fot. B. Taberski

Fig. 22. Set of vibrator energy sources in field operation. Photo by B. Taberski).

stosowaniem techniki Vibroseis. Ten sam profil, wykonany systemem konwencjonalnym, przedstawiono dla porównania na ryc. 20. Ryc. 21 przedstawia pojedynczy wibrator przy pracy, ryc. 22 zaś — grupę wibratorów.

#### WNIOSKI

Jak widać z porównania ryc. 19 i 20 — wykonano po raz pierwszy w Polsce prace sejsmiczne przy użyciu systemu Vibroseis wykazały niemal pełną identyczność wyników otrzymanych systemem konwencjonalnym i systemem Vibroseis. Potwierdzone zostały w pełni zalety tego ostatniego, do których należą:

- a) wzbudzanie częstotliwości wyłącznie użytecznych sejsmicznie;
- b) eliminacja strat energii na cele niesejsmiczne;
- c) możliwość sterowania widmem fali wzbudzonej;
- d) poprzez proces korelacji możliwość odzyskania

#### SUMMARY

The Vibroseis system produces — by means of a vibrator — continuous soil vibration of controlled, alternate-in-time frequency. The procedure is called „sweep” generation. Mutual correlation of generated and reflected sweeps gives a correlogram. There is a close correlation between the generated signal spectrum and the shape of the correlation function. The basic parameters of the function are definition, resolution and width. The use of vibration-generating technique is accompanied by a number of disturbances, the most important one is the so called „ghost”. In field operations the Vibroseis system requires exceptionally careful selection of observation parameters.

In 1976, the system was first used in Poland in the area of Oborniki Wielkopolskie — Wągrowiec. The results obtained fully confirm the advantages of the Vibroseis system and justify its wide application.

- sygnałów użytecznych, których amplituda jest na poziomie zakłóceń;
- e) eliminacja prac wiertniczych i strzałowych z badań sejsmicznych;
  - f) niższy koszt 1 km profilu;
  - g) możliwość prowadzenia prac w rejonach gęstej zabudowy przemysłowej;
  - h) mniejsze zatrudnienie w grupie polowej;
  - i) możliwość prowadzenia prac sejsmicznych w rejonach, gdzie wiercenie jest utrudnione, bądź wręcz niemożliwe (rejonny skaliste, pustynne);
  - j) znaczne ograniczenie szkód w środowisku naturalnym;
- k) większa kultura pracy.

W podsumowaniu można stwierdzić, że system Vibroseis w pełni zdał egzamin w pracach sejsmicznych na terenie Polski, a jego zastosowanie powinno się stale zwiększać.

#### РЕЗЮМЕ

Принципы действия системы Вибросейс основаны на возбуждении при помощи вибратора непрерывной вибрации почвы с управляемой изменяющейся во времени частотой. Этот процесс называется генерированием колебаний. Колебания генерированное и отраженное подвергаются действию взаимной корреляции, в результате чего получается корелограмм. Существует тесная зависимость между спектром генерированного сигнала и формой корреляционной функции: определение, разрешенность и ширина. С применением вибраторов, как источников возбуждения, связано возникновение ряда помех, из которых самые главные — это „гхост”.

В полевых работах система Вибросейс требует особенно тщательного подбора параметров наблюдения. В 1976 г. описываемая система применялась впервые в Польше в районе Оборники Влпк. — Вонгровец. Полученный до сих пор опыт вполне подтвердил преимущество системы Вибросейс и целесообразность её применения в возможно большом пределе.