

## Obraz falowy w miastach

Tadeusz Krynicki<sup>1</sup>, Sebastian Kowalczyk<sup>1</sup>, Radosław Mieszkowski<sup>1</sup>, Adam Wojas<sup>2</sup>



T. Krynicki

S. Kowalczyk

R. Mieszkowski

A. Wojas

Wave image in urban areas. *Prz. Geol.*, 58: 401–407.

*Abstract.* The paper presents analysis of factors influencing intensity of surface waves recorded in urban areas and methodology worked out for their measurement. Several examples of records of surface waves induced by different sources of vibrations are presented. The results of measurements show omnipresence of such waves. The wave record was executed using three-component geophones. The results of measurements show that induced vibrations may represent some hazard for buildings situated in distance up to 150 metres from their source.

**Keywords:** Seismic, surface waves, measurements of waves, cities, a menace

W tworzeniu obrazu falowego mogą brać udział różnego rodzaju fale sprężyste. Jednak w obrębie miast będą dominować fale powierzchniowe. Fale te rozchodzą się w przypowierzchniowej części ośrodka skalnego, którego górną granicę stanowi powierzchnia ziemi. Stąd ich nazwa.

Oddziaływanie fal powierzchniowych na infrastrukturę miejską jest wielorakie i prawie zawsze negatywne. Przypomnijmy, że to fale powierzchniowe, które powstają podczas trzęsień ziemi, powodują zniszczenia. Niemniej jednak istnieją możliwości wykorzystania fal powierzchniowych w badaniach geologiczno-inżynierskich (Krynicki, 2007).

Oceny zagrożeń falami powierzchniowymi budynków dokonuje się na podstawie polskiej normy (PN-85/B-02170, 1985). Jakkolwiek w polskiej normie mówi się o drganiach, to należy wyjaśnić, że drgania gruntu w punkcie pomiaru są falami.

W związku z tym, że pojęcie fali sprężystej jest znacznie szersze w porównaniu z drganiami gruntu, a wyniki badań sejsmicznych interpretowane są w kategoriach obrazu falowego, w dalszej części artykułu zachowamy terminologię przyjętą w sejsmice. Proces falowy jest bowiem zjawiskiem zachodzącym w czasie i przestrzeni, chociaż w przypadku fal powierzchniowych przestrzeń ta jest ograniczona powierzchnią ziemi i granicą występującą na niewielkiej głębokości, w przybliżeniu równej długości fali. Tak przynajmniej jest to przyjmowane w sejsmice. Twierdzenie to nie jest w pełni słuszne w warunkach miejskich, gdyż fale powierzchniowe rejestrowano na szóstym piętrze w oknie wychodzącym na ruchliwą ulicę (Krynicki i in., 2008).

Należy odnotować, że w Polsce w zasadzie nie wykonywano badań sejsmicznych w obrębie miast, stąd też danych o falach powierzchniowych jest wciąż mało. Dopiero w ostatnich latach, przede wszystkim w 2007 r., firma MINER-PBG przeprowadziła pomiary w kilkudziesięciu punktach w Warszawie i innych miastach.

### Czynniki wpływające na obraz falowy

Niewątpliwie miasta należą do obszarów, w których badania sejsmiczne są prowadzone w ograniczonym zakresie, a właśnie takie analizy dostarczają najpełniejszej informacji o występującym obrazie falowym. Niemniej istnieją podstawy do tego, aby sądzić, że niektóre ustalenia, dotyczące obrazu falowego rejestrowanego w sejsmice, mogą być pomocne podczas opracowywania charakterystyki fal występujących w obszarze zurbanizowanym.

Zgodnie z polską normą PN-85/B-02170 podstawowym parametrem, wyznaczającym wielkość oddziaływania fal powierzchniowych na ośrodek skalny i infrastrukturę, miejską jest ich intensywność.

Intensywność fal zależy od wielu czynników, a przede wszystkim od mocy źródła wzbudzenia, właściwości sprężystych ośrodka skalnego w punktach wzbudzenia i rejestracji fal, a także drogi przebiegu fal oraz odległości między tymi punktami. Znaczenie wymienionych czynników na ogół jest dobrze znane sejsmikom i uwzględniane w ocenie uzyskiwanych wyników badań.

Jednakże istnieją wyraźne różnice w obrazie fal powierzchniowych, rejestrowanych podczas głębokich badań sejsmicznych, i fal występujących w miastach. Wynikają one głównie z odmiennej charakterystyki źródeł wzbudzenia.

Źródłem fal powierzchniowych w warunkach miejskich są: ruch środków komunikacji miejskiej, samochodów osobowych i ciężarowych, praca maszyn i urządzeń, zwłaszcza budowlanych, fale głosowe, wiatr i in. Istnieje więc duża różnorodność źródeł wzbudzenia fal.

Intensywność fal wywołanych ruchem samochodów będzie zależeć nie tylko od masy samochodu, ale jego prędkości, liczby kół oraz stanu nawierzchni jezdni, a więc od wielkości i liczby szczelin oraz nierówności. Na warszawskich ulicach zmorą pozostają studzienki kanalizacyjne, których wylot z reguły nie pokrywa się z powierzchnią asfaltu. Koła samochodu uderzające o pokrywę studzienki będą wzbudzać fale powierzchniowe o intensywności proporcjonalnej do siły uderzenia.

W przypadku, gdy czas trwania fali wzbudzonej przez samochód będzie dłuższy od czasu potrzebnego na dojazd kolejnego samochodu do nierówności w jezdni, nastąpi

<sup>1</sup>Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; s.kowalczyk@uw.edu.pl; r.mieszkowski@uw.edu.pl

<sup>2</sup>MINER-PBG Sp. z o.o., ul. Jagiellońska 76, 03-301 Warszawa; minerpbg@wp.pl

nakładanie się fal powierzchniowych wywołanych poszczególnymi samochodami. Przypadek nakładania się fal może mieć też miejsce podczas przejazdu samochodu ciężarowego wieloosiowego przez nierówność. Nakładanie się fal powoduje wzrost ich intensywności lub wydłużenie czasu trwania fali, względnie jedno i drugie. W konsekwencji nastąpi wzrost tła intensywności fal powierzchniowych, zwłaszcza w szczycie komunikacyjnym. Jednakże na wykresach przedstawiających tło intensywności fal będą widoczne odchylenia wartości intensywności spowodowane przejazdem samochodów ciężarowych.

Ogólnie można przyjąć, że wielkość tła będzie korespondować z liczbą przejeżdżających samochodów. Natomiast odchylenia intensywności od rejestrowanego tła należy łączyć z ruchem pojazdów o większym tonażu.

Intensywność fal powierzchniowych zależy także od płynności ruchu drogowego. Na skrzyżowaniach ulic z zamontowaną sygnalizacją świetlną należy oczekiwać bardziej intensywnych fal powierzchniowych, gdyż hamujące i ruszające samochody zwiększają emisję fal dźwiękowych sprzyjających powstaniu fal powierzchniowych. W przypadku skrzyżowań jezdni samochodowych, na których są ułożone tory tramwajowe lub kolejowe, obraz falowy może być złożony wskutek interferencji fal wywołanych różnymi rodzajami pojazdów. Zagrożenie dla obiektów budowlanych mogą stanowić fale wzbudzone ruchem metra, zwłaszcza na tych odcinkach, gdzie tory ułożono niegłęboko.

Znaczący udział w tworzeniu obrazu falowego w obszarze miast mają maszyny i urządzenia pracujące wewnątrz budynków i poza nimi. Najbardziej intensywne fale powierzchniowe będą powstawać podczas wyburzania ścian i fundamentów budynków za pomocą spadającego ciężaru lub wskutek detonacji ładunków materiałów wybuchowych. Intensywność i wygląd fal powierzchniowych zależy od kształtu oraz głębokości wbijanych pali nośnych pod różnego rodzaju obiekty budowlane (Pałagin i in., 1989).

W budynkach produkcyjnych i naprawczych niektórych branży, np. metalowej i samochodowej, są uruchamiane prasy i obrabiarki, w wyniku czego powstają fale powierzchniowe o wysokiej intensywności. Fale powierzchniowe są także generowane podczas wykonywania wykopów i innych prac ziemnych.

Podczas sporządzania oceny stopnia zagrożenia budynków falami powierzchniowymi istotny jest parametr pochłaniania fal przez ośrodek skalny. Wielkość pochłaniania zależy od wielu czynników. Zatrzymajmy się na najbardziej znaczących w warunkach miejskich. Ustalono, że fale sejsmiczne są bardziej pochłanianie przez ośrodki charakteryzujące się małymi wartościami prędkości przebiegu fal. Dlatego osady porowate i w dodatku niezawadnione, tworząc strefę aeracji, będą istotnie osłabiać fale sprężyste. Z kolei np. beton, a także zawadnione lub zamrożone grunty oraz skały lite mają niskie współczynniki pochłaniania i dlatego rozchodzące się w nich fale zachowują wysoką intensywność, o ile ich źródło miało odpowiednią moc.

W obszarze miast osady przypowierzchniowe są bardziej zróżnicowane pod względem właściwości sprężystych, a zatem i wielkości pochłaniania fal, w porównaniu z osadami występującymi na terenach niezabudowanych. Spowodowane jest to wykonywaniem wykopów, a także obecnością rur, kabli, nasypów, tuneli, podziemnych gara-

ży, fundamentów itp. Dlatego obliczone współczynniki pochłaniania fal w warunkach miejskich mogą być obarczone znacznym błędem. Błąd można zmniejszyć jedynie poprzez zagęszczenie punktów pomiarów intensywności fal. Niezbędne też są dane o infrastrukturze podziemnej. W związku z tym, że w obrębie miast wykonano niewiele pomiarów fal powierzchniowych, problemem pochłaniania fal nie będzie szerzej omawiany.

Podczas oceny intensywności fal powierzchniowych trzeba brać pod uwagę warunki występujące w miejscu ustawienia geofonów. Zależność wielkości amplitudy rejestrowanych fal od rodzaju i stanu fizycznego gleby, na powierzchni której rozstawiono geofony, została dawno zauważona w badaniach sejsmicznych.

Podczas pomiarów fal powierzchniowych, prowadzonych na obszarze zurbanizowanym, geofony najczęściej są umieszczane na betonowych lub kamiennych fundamentach, murach, posadzkach itp., czyli na podłożu niebędącym ośrodkiem skalnym. Wynika to z dwóch przyczyn, a mianowicie braku dostępu do powierzchni gruntów naturalnych oraz potrzeby określania wielkości drgań, jakim są poddawane fundamenty lub inne elementy konstrukcji budowlanych. W celu polepszenia kontaktu geofonów z powierzchnią podłoża zaleca się ustawiać geofony na warstewce plasteliny, ułożonej na betonie, asfalcie itp., stanowiącej swego rodzaju podstawkę o podobnych parametrach fizycznych (Pałagin i in., 1989).

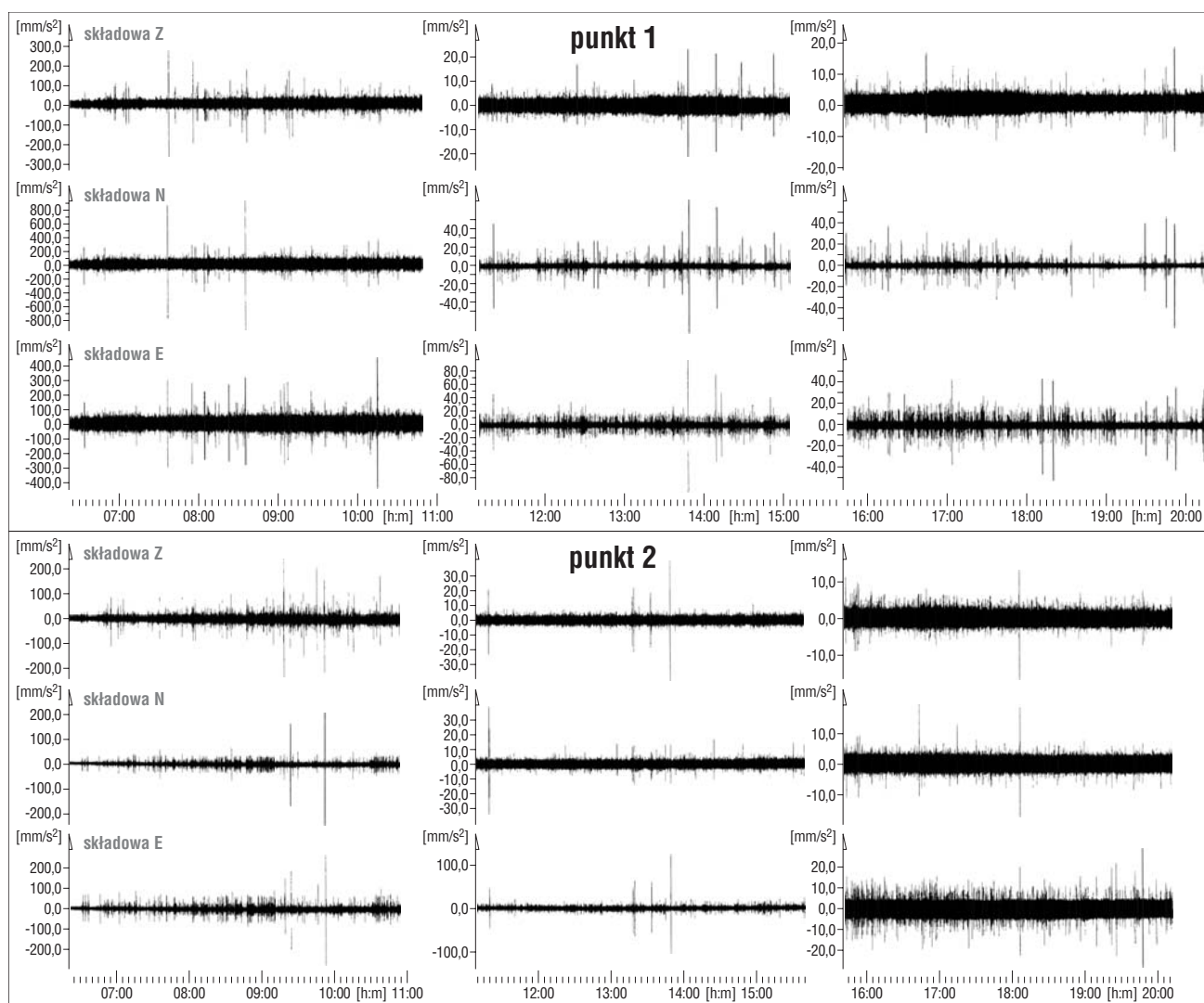
Poczynione w sejsmice ustalenia, dotyczące zależności wielkości amplitud fal od takich czynników, jak charakterystyka źródła wzbudzenia, długość drogi przebiegu fali, warunków ustawienia geofonów, nie mogą być w prosty sposób przeniesione na pomiary fal powierzchniowych w obrębie miast. Wynika to z większej różnorodności i niewystarczająco jeszcze poznanych źródeł wzbudzenia (różne typy samochodów, praca różnych urządzeń i in.), podobnie jak i zróżnicowanych warunków przebiegu fal (warstwy geologiczne i warunki hydrogeologiczne zaburzone infrastrukturą podziemną, o której wiadomości są niepełne) itp. Dlatego badania fal powierzchniowych w obrębie miast powinny być wykonywane z zastosowaniem specjalnej metodyki zapewniającej uwzględnienie w maksymalnym stopniu tej różnorodności czynników i warunków. Warto nadmienić, że odpowiedni program badań fal powierzchniowych został opracowany w Zakładzie Geofizyki i Mechaniki Ośrodków Ciągłych Wydziału Geologii UW.

### Metodyka pomiarów i interpretacji fal powierzchniowych

Niezależnie od rodzaju i miejsca pomiarów geofizycznych stosowana metodyka prac terenowych powinna zapewnić osiągnięcie celu badań.

Zgodnie z polską normą PN-85/B-02170 celem pomiarów fal powierzchniowych jest ustalenie wielkości oddziaływania drgań przenoszonych przez podłoże na budynki. Do oceny zagrożeń budynków drganiami polska norma zaleca pomiar trzech składowych fal: Z — pionowej, N — północnej i E — wschodniej, wzajemnie do siebie prostopadłych.

Jak dotąd najwięcej pomiarów fal powierzchniowych na terenach miejskich, a zwłaszcza w Warszawie, wykonała firma MINER-PBG. Firma ta ma na wyposażeniu aparaturę terenową FLAS DATA LOGGER i geofony typu



Ryc. 1. Obraz falowy zarejestrowany przy rondzie Daszyńskiego w Warszawie w 2 punktach. Składowe fal: Z — pionowa, N — północna, E — wschodnia (ryc. 1–7 wg firmy MINER)

CSPBG-3D, zaprojektowane i wyprodukowane przez Instytut Geofizyki PAN.

Aparatura umożliwia jednoczesny pomiar fal w dwóch punktach. Punkty pomiarowe mogą być lokalizowane zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz budynków. Istnieje możliwość wyboru długości czasu rejestracji fal w przedziałach od zera do kilkunastu sekund oraz od zera do kilkunastu godzin. Jest to duża zaleta aparatury, szczególnie podczas prac prowadzonych w obszarze miast.

W dowolnie wybranych punktach pomiarowych aparatura rejestruje w sposób ciągły trzy składowe (Z, N, E) wszystkich fal dochodzących do geofonów, niezależnie od ich intensywności (ryc. 1). Amplitudy poszczególnych składowych fal są automatycznie regulowane w aparaturze i przedstawione w odpowiedniej skali. Dołączony do aparatury terenowej program pozwala na obliczenie rzeczywistej wielkości amplitud fal zarejestrowanych w punktach pomiarowych.

Wyniki pomiarów są przedstawione na kartach zawierających wykresy zapisu składowych Z, N, E oraz rozkład przyspieszeń drgań gruntu (w  $m/s^2$ ) uzyskanych w paśmie częstotliwości od 1 Hz do 100 Hz.

Na kartach pomiarów są zaznaczone granice szkodliwości A–D, przy czym granica A jest dolną granicą odczuwalności drgań przez obiekt. Poniżej granicy A drgania są

nieszkodliwe i nie stanowią żadnego zagrożenia dla konstrukcji budynku. Drgania powyżej granicy D są katastrofalne dla obiektów, gdyż mogą doprowadzić do ich zawalenia. Granice pośrednie oznaczają skutki drgań opisane szczegółowo w polskiej normie.

Do obliczeń wielkości drgań wybiera się fale powierzchniowe o największych amplitudach.

#### Przykłady zapisu obrazu falowego występującego w miastach

Pomiary fal powierzchniowych, wykonane w kilku miastach przez firmę MINER-PBG, miały na celu ustalenie wielkości zagrożeń budynków drganiami generowanymi różnymi źródłami. Cel badań formułowali zleceniodawcy, którzy jednak nie byli zainteresowani ustaleniem przyczyn wpływających na charakter obrazu falowego. Dlatego podany w artykule opis wyników pomiarów nie zawiera wszystkich danych, które ułatwiłyby jednoznacznie interpretację obrazu falowego, z wyjątkiem określenia samej intensywności fal w wybranym punkcie pomiarowym.

Stosunkowo duży zakres pomiarów fal powierzchniowych wykonano w sąsiedztwie skrzyżowania ulic Towarowej z ulicą Prosta w Warszawie, stanowiącego



północno-zachodnią część ronda Daszyńskiego. Budynek usytuowany jest w odległości około 150 m od skrzyżowania tych ulic. Rejestrację fal prowadzono w różnych pomieszczeniach budynku, będącego siedzibą banku, oraz w kilku miejscach na zewnątrz budynku, tuż przy jego fundamencie.

Przykład wielogodzinnego zapisu składowych Z, N i E fal powierzchniowych, uzyskanego częściowo wewnątrz budynku, a przede wszystkim poza nim, ilustruje rycina 1.

Na osi odciętych ryciny podano godziny rejestracji, natomiast na osi rzędnych amplitudy przyspieszeń fal powierzchniowych. Przypomnijmy, że aparatura terenowa automatycznie wybiera skalę pionową. Dlatego podczas oceny intensywności fal, przedstawionych na rycinie 1, ten fakt należy brać pod uwagę. W związku z tym, że rejestracje fal prowadzono przez ponad 12 godzin, skala pozioma wykresów składowych Z, N i E jest bardzo ściśnięta, co w jakiejś mierze utrudnia wyodrębnienie pojedynczych fal na wykresach, z wyjątkiem tych najbardziej intensywnych.

Jednakże takie ściśnięcie zapisu ułatwia ocenę zmian intensywności fal zachodzących w czasie. Jest to szczególnie dobrze widoczne na zapisie składowej Z (ryc. 1, punkt 1). Szerokość wykresów — ścieżek zapisu wyraża ogólne tło intensywności danej składowej. Szerokość ścieżki składowej Z (ryc. 1, punkt 1) stopniowo wzrasta od godziny 6:35 do godziny 13:00. W przedziałach czasu od 13:15 do 14:20 oraz szczególnie od 16:45 do 18:00 ścieżka składowej Z wyraźnie się rozszerza, co niewątpliwie należy wiązać ze zwiększonym ruchem pojazdów. Daje się również zauważyć ściwienie ścieżki zapisu składowej Z, np. w godzinach 7:20–7:30, 8:35–8:50, 14:20–15:00, 16:20–16:45. Trzeba odnotować, że brzegi ścieżki składowej Z, podobnie jak i innych składowych, są nierówne, co oznacza, że jej szerokość zmienia się nieregularnie. Tłumaczyć to można chwilowym wahnięciem natężenia ruchu pojazdów, spowodowanym np. regulacją świetlną. Jest to możliwe do ustalenia, jeśli zastosuje się odpowiednią metodykę pomiarów.

Nieregularność brzegów ścieżek potęguje obecność linii pionowych, mających różne długości i zmienne zagęszczenie. Taki zapis obrazu falowego jest szczególnie

dobrze widoczny na wykresach składowych N i E, uzyskanych w godzinach popołudniowych (ryc. 1, punkt 1).

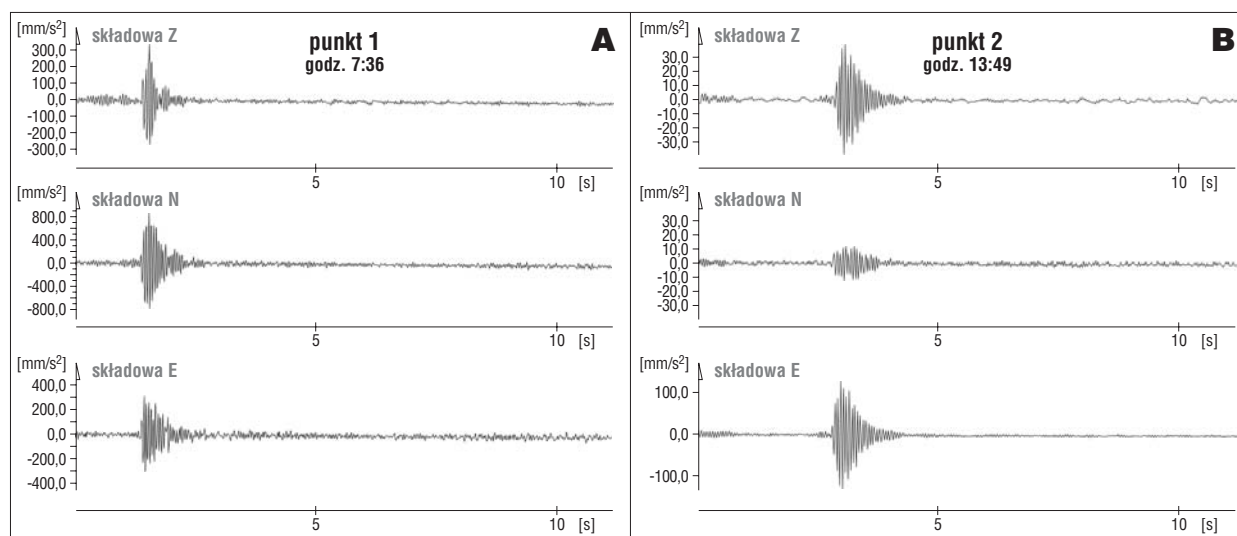
Poszczególne linie pionowe, często trudne do wyodrębnienia w przyjętej skali poziomej, należy traktować jako składowe fal powierzchniowych. Długość linii oznacza wielkość amplitudy przyspieszenia danej fali, równoznacznej z jej intensywnością. Źródłem tych fal prawdopodobnie są przejeżdżające samochody osobowe. Obserwowane skupienia linii wskazują, że samochody przejeżdżały w niewielkich odstępach czasowych, a zatem i odległość między nimi była mała. Najdłuższe linie na wykresach występują rzadziej i nieregularnie, przy czym nie zawsze jednocześnie na wszystkich składowych. Linie te oznaczają fale najintensywniejsze, wywołane ruchem pojazdów ciężkich. Fale o dużej intensywności zarejestrowano o godzinie 7:36, 13:45, 15:40 i 19:45 (ryc. 1, punkt 1). Między godziną 8:35 a godziną 13:46 fale intensywne nie występują.

Podobne uwagi poczynić można również w odniesieniu do obrazu falowego przedstawionego na rycinie 1 w punkcie 2. Szerokość ścieżek zapisu składowych Z, N i E fal powierzchniowych wskazuje, że liczba i intensywność fal zmieniają się w czasie. Fale o największych amplitudach zarejestrowano między godzinami 9–10 oraz 13–14. Od godziny 6:20 do godziny 9:10 następuje stopniowe rozszerzanie ścieżek zapisu poszczególnych składowych fal, które należy wiązać z nasileniem ruchu drogowego. Na podstawie zapisu, zwłaszcza składowej Z, można zauważyć, że szczyt komunikacyjny w rejonie ronda Daszyńskiego przypada na godziny 16:45–18:00.

Skala pozioma wykresów przedstawionych na rycinie 1 (punkt 1 i 2) nie pozwala na pełną ocenę charakteru zapisu składowych Z, N i E, chociaż nie jest przeszkodą w określeniu ich intensywności.

Obraz zapisu składowych wybranych dwóch fal w rozszerzonej skali poziomej ilustruje rycina 2. Odnotujmy, że fale zarejestrowano o godzinie 7:36 (ryc. 1, punkt 1) i o godzinie 13:49 (ryc. 1, punkt 2). Fale te na rycinie 1 (w obu punktach) mają podobny zapis w postaci linii pionowych.

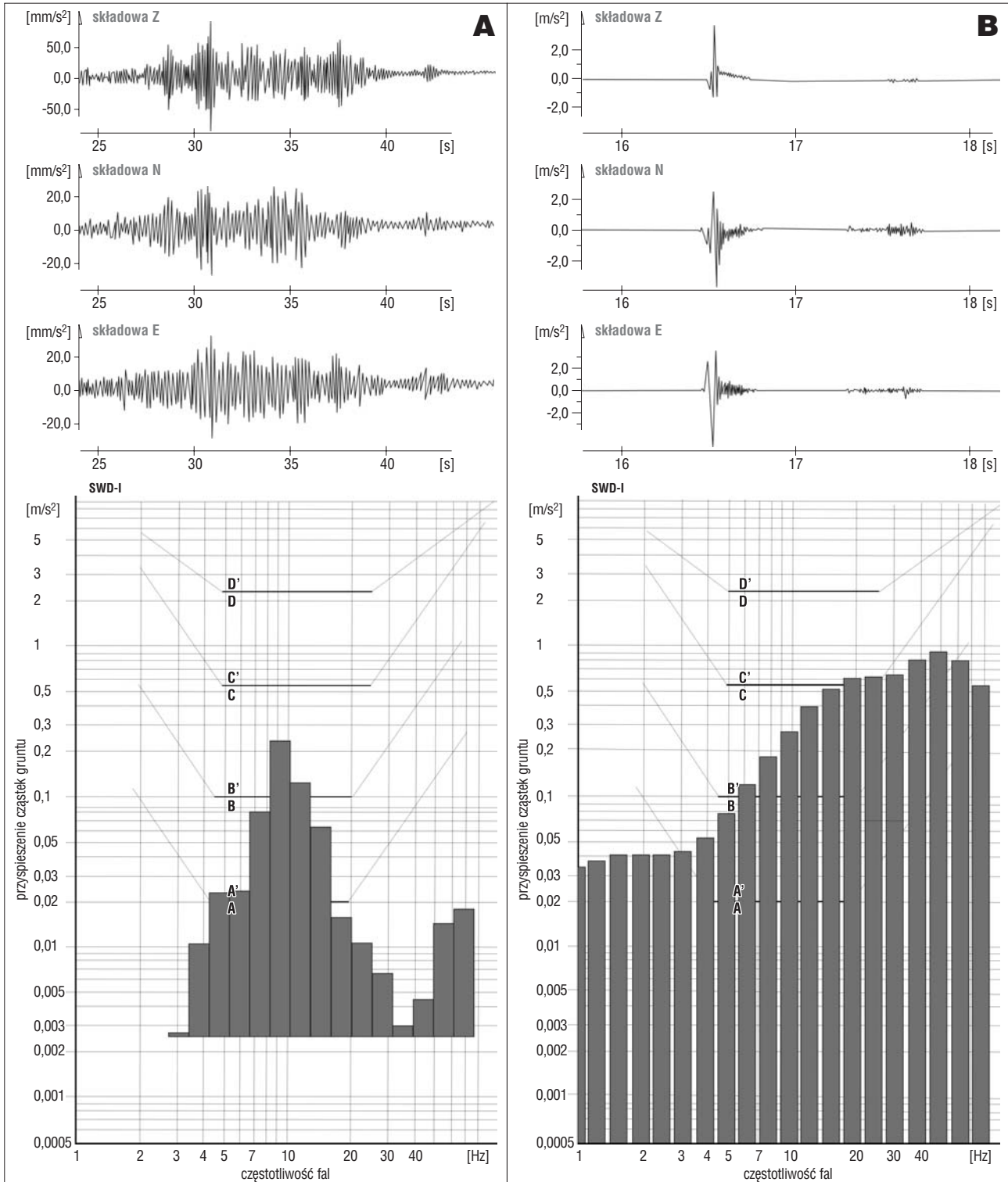
W wyniku zmiany skali poziomej uzyskano pełniejszy obraz zapisu składowych Z, N i E (ryc. 2). Obraz pokazuje,



Ryc. 2. Zapis składowych Z, N i E fal zarejestrowanych o godzinie 7:36 w punkcie 1 (A) i o godzinie 13:49 w punkcie 2 (B) przy rondzie Daszyńskiego w Warszawie

że zapis składowych poszczególnych fal, jak również składowych tej samej fali jest nieco inny. Na obecnym etapie badań fal powierzchniowych w miastach trudno jest powiedzieć, w jakiej mierze występujące różnice w zapisie składowych fal uda się powiązać z właściwościami sprężystymi utworów przypowierzchniowych.

Obraz falowy zarejestrowany w odległości 30 m od wyboistej ulicy Kosynierów w Rumi przedstawia rycina 3A. Fale zostały wzbudzone przejazdem pojedynczego, trzyosiowego samochodu ciężarowego. Pomiar miał na celu ustalenie intensywności poszczególnych składowych fal wywołanych ruchem drogowym. Na podstawie uzyska-



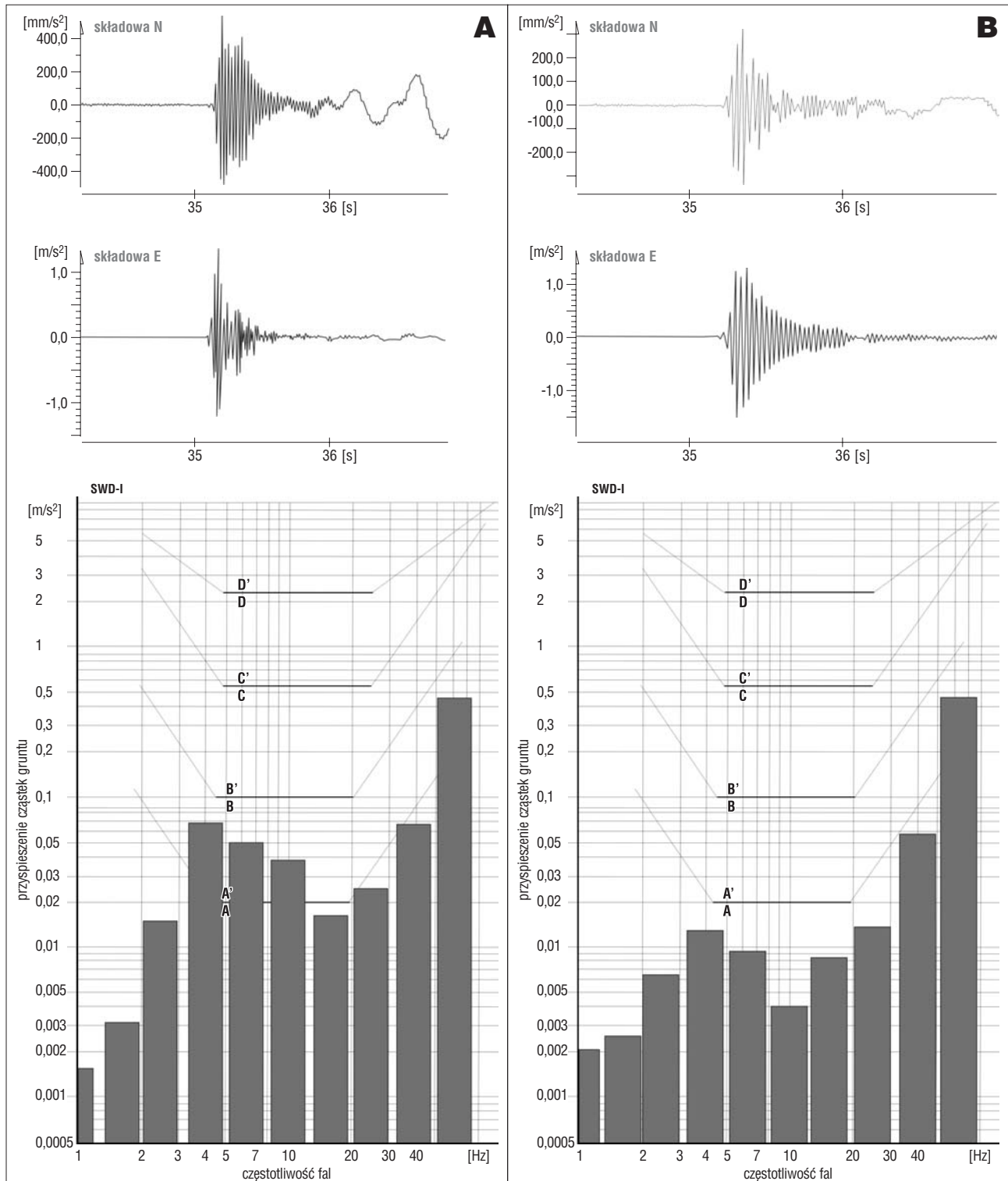
**Ryc. 3.** Obraz falowy zarejestrowany przy ul. Kosynierów w Rumi; u góry — zapis składowych Z, N i E fali wywołanej przejazdem samochodu ciężarowego po wyboistej drodze (A) i wywołanej uderzeniem ciężaru (B); na dole — wykresy skali SWD (skala wpływów dynamicznych)

Granice: A, A' — dolna granica odczuwalności drgań przez budynek i dolna granica uwzględnienia wpływów dynamicznych; B, B' — dolna granica powstawania zarysowań i spękań w elementach konstrukcyjnych, C, C' — dolna granica ciężkich szkód budowlanych, D, D' — dolna granica awarii całego budynku, drgania powyżej tej granicy mogą spowodować awarie budynku i zagrażają bezpieczeństwu życia ludzkiego

nego zapisu można stwierdzić, że fale rejestrowano w przedziale czasu od około 27. s do prawie 39. s. Oznacza to, że samochód przejeżdżający przez odcinek zniszczonej jezdni wzbudzał fale przez 12 s. Zapis wszystkich trzech składowych fal jest podobny, chociaż największą intensywnością odznacza się składowa Z (ryc. 3A). Podobieństwo zapisu polega na tym, że zmiany intensywności składowych na wykresach Z, N i E występują generalnie w miejscach o zbliżonych wartościach czasu. Tak np. fala

o największej amplitudzie na wykresie wszystkich składowych występuje w przedziale czasu 30–31 s.

Do przedstawiania przybliżonej oceny oddziaływania drgań przekazywanych przez podłoże na budynek służy skala SWD (skala wpływów dynamicznych). Oś pionowa skali SWD jest opisana przyspieszeniem cząstek gruntu, natomiast oś pozioma częstotliwością fal. Linie A, B, C, D stanowią granice zakresu oddziaływania drgań na budynek.



Ryc. 4. U góry zapis składowych N i E fal zarejestrowanych w odległości 130 m (A) i 150 m (B) od punktu wzbudzenia. Na dole wykresy skali SWD (skala wpływów dynamicznych). Lokalizacja: ul. Bagnista w Gostyninie

Na wykresie składowej Z najlepiej daje się zauważyć różną szerokość, a zatem i czas trwania zapisu poszczególnych amplitud fal. W dolnej części ryciny 3A przedstawiono rozkład przyspieszeń drgań gruntu. Obliczone wielkości drgań wskazują, że przejeżdżające samochody ciężarowe wywołują fale mogące mieć negatywne oddziaływanie na budynki usytuowane w odległości do 30 m od jezdni.

Jak duży wpływ na charakter obrazu falowego ma źródło wzbudzenia ilustruje rycina 3B. Pomiar wykonano również przy ul. Kosynierów w Rumi, w punkcie odległym o kilkadziesiąt metrów od miejsca rejestracji fal przedstawionych na rycinie 3A. Źródłem wzbudzania fal sejsmicznych, widocznych na rycinie 3B, był ciężar o masie 10 t spadający z wysokości 6 m. Odległość punktu pomiarowego od miejsca wzbudzania wynosiła 70 m. Uderzenie ciężaru o powierzchnię gruntu spowodowało powstanie fali o dużej intensywności, której czas trwania nieznacznie przekraczał 0,1 s, a więc był krótki. Tak niewielki czas trwania fali budzi wątpliwości, czy zarejestrowana fala może być uważana za powierzchniową. Nie można wykluczyć, że jest to fala prosta, bezpośrednia lub fala określana w sejsmice mianem pierwszych wstąpień. Wydaje się to potwierdzać wyniki badań obrazu falowego omówione w publikacji T. Krynickiego (1980). Jednakże na podstawie tak krótkiego fragmentu zapisu i bez danych o rzeczywistej wartości czasu przebiegu fali od źródła wzbudzania do punktu pomiarowego trudno udzielić jednoznacznej odpowiedzi, na pytanie o naturę fali przedstawionej na rycinie 3B.

Trzeba odnotować, że ustalenie rodzaju fali podczas oceny zagrożeń budynków drganiami przenoszonymi przez podłoże ma drugorzędne znaczenie, gdyż do obliczeń wielkości drgań, zgodnie z polską normą, wybiera się fale o największej intensywności.

Wszystkie trzy składowe fali wzbudzonej uderzeniem ciężaru, występującej na 16,5 s, różnią się nieco zapisem (ryc. 3B). Większe podobieństwo obserwuje się między składowymi N i E. Składowa Z to praktycznie jedna amplituda i to bardzo wąska. Charakterystyczny jest też spadek intensywności tej składowej, równomierny i trwający około 0,250 ms. Na składowych N i E na odcinku o zbliżonej długości obserwuje się nieco większy wzrost amplitudy przyspieszenia — do około  $1 \text{ m/s}^2$ , chociaż w skali przyjętej dla ryciny 3B jest on mało czytelny.

Podobnie na odcinku zapisu zawartym między 17,3 s a 17,7 s na składowych N i E, a zwłaszcza tej pierwszej, można wyznaczyć fale. Na składowej Z w tym przedziale czasu mamy do czynienia tylko z pogrubieniem ścieżki zapisu. Taki wzrost amplitudy jest prawdopodobnie związany z odreagowaniem gruntu po uderzeniu. Podobne zjawisko bywa obserwowane podczas badań sejsmicznych z użyciem spadających ciężarów jako źródła wzbudzania fal.

Widmo energetyczne amplitudy przyspieszeń zamieszczone w dolnej części ryciny 3B wskazuje, że fala wzbudzona uderzeniem ciężaru stanowi zagrożenie dla budynków. Niskoczęstotliwościowa część widma (do około 5 Hz) charakteryzuje się odpowiednio 10-krotnie i 20-krotnie mniejszą intensywnością w porównaniu z intensywnością składowych występujących na 20 Hz i 40 Hz. Na podstawie danych z ryciny 3B można stwierdzić, że użycie maszyn budowlanych do wbijania pali czy zagęszczenia gruntów powinno być poprzedzone pomiara-

mi geofizycznymi i, przede wszystkim, fal rozchodzących się w osadach przypowierzchniowych.

W miastach zachodzi potrzeba wyburzenia ścian budynków i fundamentów w związku z przebudową ulic, placów itp. Do ich wyburzenia, jeżeli warunki lokalne pozwalają, mogą być użyte materiały wybuchowe. Za pomocą detonacji materiałów wybuchowych dokonuje się też niekiedy zagęszczenia gruntów.

Na rycinie 4 przedstawiono obraz falowy uzyskany w dwóch punktach przy ul. Bagnistej w Gostyninie. Fale rejestrowano w odległościach 130 m (ryc. 4A) i 150 m (ryc. 4B) od miejsca detonacji ładunku o masie 0,75 kg. W pierwszym punkcie geofon był umieszczony na fundamencie budynku, w drugim (tym bardziej odległym) na posadzce garażu ułożonej bezpośrednio na powierzchni gruntu.

Ponieważ źródłem fal była detonacja tego samego ładunku, to można sądzić, że warunki wzbudzania fal były identyczne. Odległość między punktami pomiarowymi wynosiła 20 m i była kilkakrotnie mniejsza od odległości źródła wzbudzania od miejsca rejestracji. Dlatego można przyjąć, że na charakter obrazu falowego wpłynęły głównie warunki ustawienia geofonów, a te się różniły.

Mimo że na podstawie tak krótkiego odcinka zapisu trudno jednoznacznie określić rodzaj fal, to jednak istnieją przesłanki, aby uważać je za fale powierzchniowe.

Na rycinie 4B zapis składowej E jest bardziej regularny w porównaniu z danymi z ryciny 4A. Z kolei składowa N wykazuje podobną intensywność, ale czytelność jej zapisu jest gorsza od tej widocznej na rycinie 4A.

Z porównania danych przedstawionych w dolnej części rycin 4A i B wynika, że istnieje znaczne podobieństwo wykresów przyspieszeń drgań gruntu i rozkładu ich wartości w przedziale rejestrowanych częstotliwości fal.

## Wnioski

Na podstawie dotychczas wykonanych pomiarów w kilku miastach Polski można stwierdzić, że fale powierzchniowe występują powszechnie. Źródłem fal może być np. transport kołowy i pracujące maszyny (głównie budowlane). Intensywność fal zależy od mocy źródła i warunków powierzchniowych, w tym rodzaju i stanu gruntów. Dokonywanie oceny zagrożeń budynków na podstawie intensywności fal i ich częstotliwości nie wyczerpuje całokształtu znaczenia fal powierzchniowych. Dlatego w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej UW opracowano program, którego realizacja przyczyni się do sporządzenia wielokierunkowej oceny fal powierzchniowych, także dotyczącej celowości ich wykorzystania w badaniach osadów przypowierzchniowych.

## Literatura

- KRYNICKI T. 1980 — Obraz falowy występujący w pobliżu miejsca wzbudzania. *Tech. Poszuk. Geol.*, 5: 1–4.  
 KRYNICKI T. 2007 — Fale powierzchniowe - nowe spojrzenie na ich znaczenie. *Biul. Inf. Geofiz.*, 2: 43–63.  
 KRYNICKI T., MIESZKOWSKI R. & WOJAS A. 2008 — O celowości opracowania map rozkładu intensywności fal powierzchniowych na potrzeby miast. *Biul. Inf. Geofiz.*, 1: 39–52.  
 PAŁAGIN W.W., POPOW A.J. & DIK P.J. 1989 — Sejsmorazwiedka małych głubin. Moskwa, Wyd. Nedra, 1989–208.[8]  
 PN-85/B-02170, 1985 — Ocena szkodliwości drgań przekazanych przez podłoże na budynki. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości. Wyd. Normalizacyjne Alfa.

Praca wpłynęła do redakcji 18.05.2009 r.  
 Po recenzji akceptowano do druku 28.01.2010 r.