

## *Czy to był bolid?*

**Projekt studencki pod kierownictwem prof. dr hab. Marka Grada  
Helena Ciechowska, Aleksandra Fronczak, Maciej Karasewicz, Klaudia Mocek,  
Mikołaj Zawadzki**



Ryc. 1: bolid nad północną Polską, 31.10.2015 roku, falszywyemail/YouTube, [www.crazynauka.pl/bolid-nad-polska-czym-byl-sobotni-rozplysk-na-niebie](http://www.crazynauka.pl/bolid-nad-polska-czym-byl-sobotni-rozplysk-na-niebie)

### **STRESZCZENIE**

31 października 2015 roku nad północną Polską miał miejsce przelot bolidu. Podczas projektu wyznaczony został czas oraz lokalizacja jego eksplozji. Dokonano wstępnej lokalizacji miejsca i czasu dla modelu dwuwymiarowego, został zawężony do pewnego obszaru. Następnie rozważono trójwymiarowy model płaskiej Ziemi. Najbardziej prawdopodobny czas 19:07:26, lokalizację eksplozji  $X = 53,252^{\circ} \pm 0,014^{\circ}$  N,  $Y = 17,4537^{\circ} \pm 0,0062^{\circ}$  E,  $Z = 29,16 \pm 0,64$  km oraz prędkość fali dźwiękowej  $v = 343$  km/s. Następnym krokiem było wyznaczenie czasu, prędkości fali oraz lokalizacji w modelu sferycznie symetrycznej Ziemi co dało wyniki  $\varphi = 53,619 \pm 0,014^{\circ}$  N,  $\lambda = 17,136 \pm 0,065^{\circ}$  E oraz  $h = 33,5 \pm 2,5$  km.

### **WSTĘP**

Kosmos pełny jest różnego rodzaju materiałów - od pyłu kosmicznego, poprzez ziarna lityczne i większe okruchy skalne. Codziennie w kontakt z atmosferą ziemską wchodzi ogromne ilości materiału pochodzenia kosmicznego [1] - większość z nich jest jednak na tyle mała, że nie jest dla nas widoczna gołym okiem. Okruchy skalne, wchodząc w atmosferę ziemską, stają się widoczne dla ziemskiego obserwatora. Na wysokości około 115 km osiągają one temperaturę rzędu 2000 °C w wyniku tarcia. Zjawisko to nazywane jest meteorem. Odrywane od okruchów skalnych cząstki tworzą świecąca smugę. Następstwem

tego typu zjawisk jest wyjątkowo duża jasność oraz efekt akustyczny, któremu niekiedy towarzyszy fala uderzeniowa związana z rozpadem obiektu. Takie zjawisko nazywane jest bolidem.

### **Katastrofa Tunguska**

30 czerwca 1908 roku na północy od jeziora Bajkał zlokalizowanego na terenie środkowej Syberii miała miejsce owiana tajemnicą Katastrofa Tunguska. Ze względu na fakt, że badaniem całej sprawy zajęto się dużo później - bowiem prace nad tym tematem rozpoczęły się dopiero w roku 1927 - powstało mnóstwo teorii spiskowych związanych z Katastrofą. Było to spowodowane między innymi tym, że zeznania świadków, którzy widzieli zjawisko znacznie od siebie odbiegały - mówili oni o różnych torach ruchu obiektu oraz podawali odmienne czasy zdarzenia.

Rozbieżności te łatwo argumentować można faktem, że świadkowie obserwowali zjawisko pod różnymi kątami, z różnych miejsc. Istotnym może okazać się też fakt, że zeznania miejscowych zbierane były nawet do 50 lat po wydarzeniu. Jednak większość tych z nich łączyło to, że obserwowana była kula ognia - prawdopodobnie spalający się w atmosferze obiekt kosmiczny. Według szacunków zjawisko mogło być widoczne w promieniu 400 km, a słyszalne nawet w odległości 1000 km.

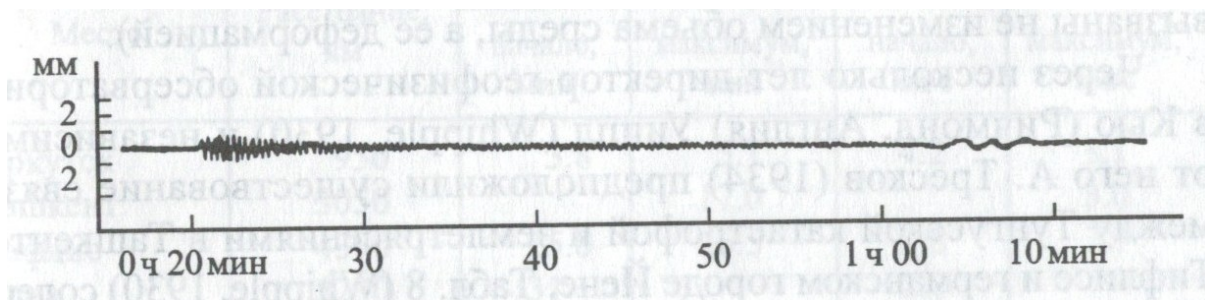
W środowisku naukowym jedną z przyjmowanych hipotez jest hipoteza, że za Katastrofę Tunguską odpowiedzialna jest asteroida o średnicy od 50 do 100 metrów, która uderzyła w Ziemię. Kolejną hipotezą jest to, że obiektem tym mogła być kometa. Badania nad Katastrofą Tunguską nie należą jednak do najłatwiejszych ze względu na poszlakowy charakter dowodów przemawiających za stawianymi hipotezami. Oprócz zeznań świadków istnieją bowiem także inne dowody na zajście zdarzenia, które jednocześnie je charakteryzują.

Katastrofę Tunguską charakteryzował przebieg podobny do eksplozji bomby jądrowej. Szacuje się, że wybuch miał moc równą mocy eksplozji od 10 do 50 megaton trotylu [2], a wytworzona w jego wyniku fala uderzeniowa spowodowała ogromne zniszczenia. Fale mechaniczne wygenerowane w wyniku wybuchu zarejestrowane zostały przez sejsmografy na całym świecie [2], a najbliższą stacją było obserwatorium w Irkucku (Ryc.2). Wybuch został zarejestrowany o godzinie 00:14:30 UT. Wywołane w wyniku Katastrofy Tunguskiej zjawisko miało magnitudę  $M=4,5-5$  w skali Richtera.

Na podstawie zeznań naocznych świadków, zapisów wstrząsów zarejestrowanych przez ówczesne działające stacje sejsmiczne oraz fotografie z miejsca zdarzenia można wysnuć hipotezę, że za Katastrofę Tunguską odpowiedzialna była eksplozja bolidu. W zrozumieniu zjawiska, które mogło być bezpośrednią przyczyną Katastrofy Tunguskiej mogą więc pomóc obserwacje mniejszych bolidów, które weszły w kontakt z atmosferą ziemską.



Ryc. 2: Obszar o promieniu 1000 km od miejsca Katastrofy Tunguskiej, obejmujący obserwatorium sejsmiczne w Irkucku



Ryc. 3: sejsmogram z zapisem Katastrofy Tunguskiej, O.G. Gładyshev, *Katastrofa Tunguska: szczegóły ukladanki* s.183 ISBN 978-5-02-025530-2

### Meteor Czelabiński

Świetnym przykładem jest bardzo dobrze zbadany bolid, którego eksplozja miała miejsce w okolicach Czelabińska 15 lutego 2013 roku. Średnicę szacuje się na około 18 metrów, wagę na 11 tysięcy ton [3].

Bolid Czelabiński rozpadł się na wysokości 23,3 km [3], a wygenerowana podczas jego rozpadu fala uderzeniowa spowodowała ogromne zniszczenia - jest to bowiem pierwszy udokumentowany tego typu incydent, w którym uszkodzonych zostało ponad 1600 osób [4]. Podobnie jak w przypadku Katastrofy Tunguskiej, fala uderzeniowa, która powstała podczas eksplozji bolidu wygenerowała fale sejsmiczne zarejestrowane przez wiele stacji

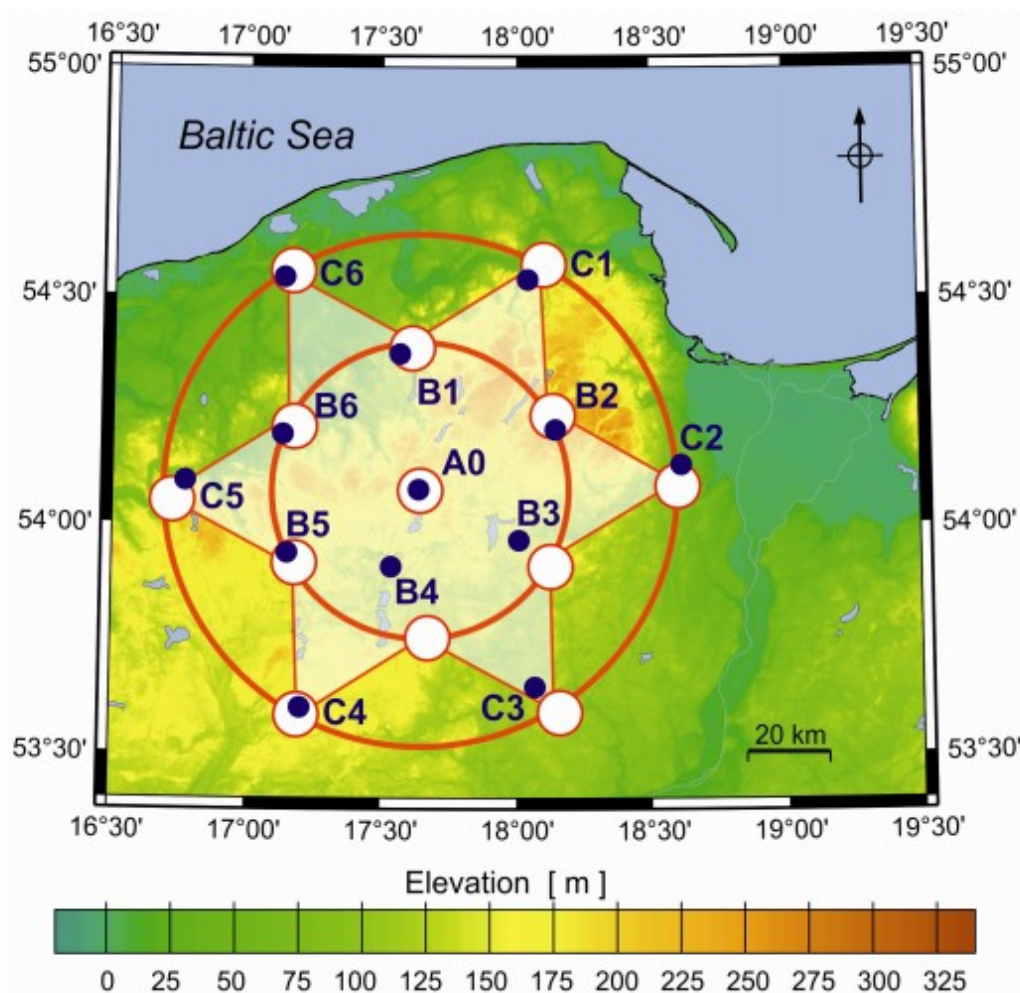
sejsmicznych. Trzęsienie wywołane w wyniku zjawiska miało magnitudę  $M = 2,7$  w skali Richtera.

Żeby jeszcze lepiej zobrazować energię, która została wyzwolona podczas eksplozji Meteoru Czelabińskiego można powiedzieć, że była ona ekwiwalentna 0,44 megatonom trotylu. W przeciwieństwie do Katastrofy Tunguskiej, po której nie odnaleziono żadnych fragmentów bolidu, który mógłby być powodem zniszczeń, zjawisko to pozostawiło po sobie fragmenty meteorytu, który został zaklasyfikowany do grupy chondrytów zwyczajnych.

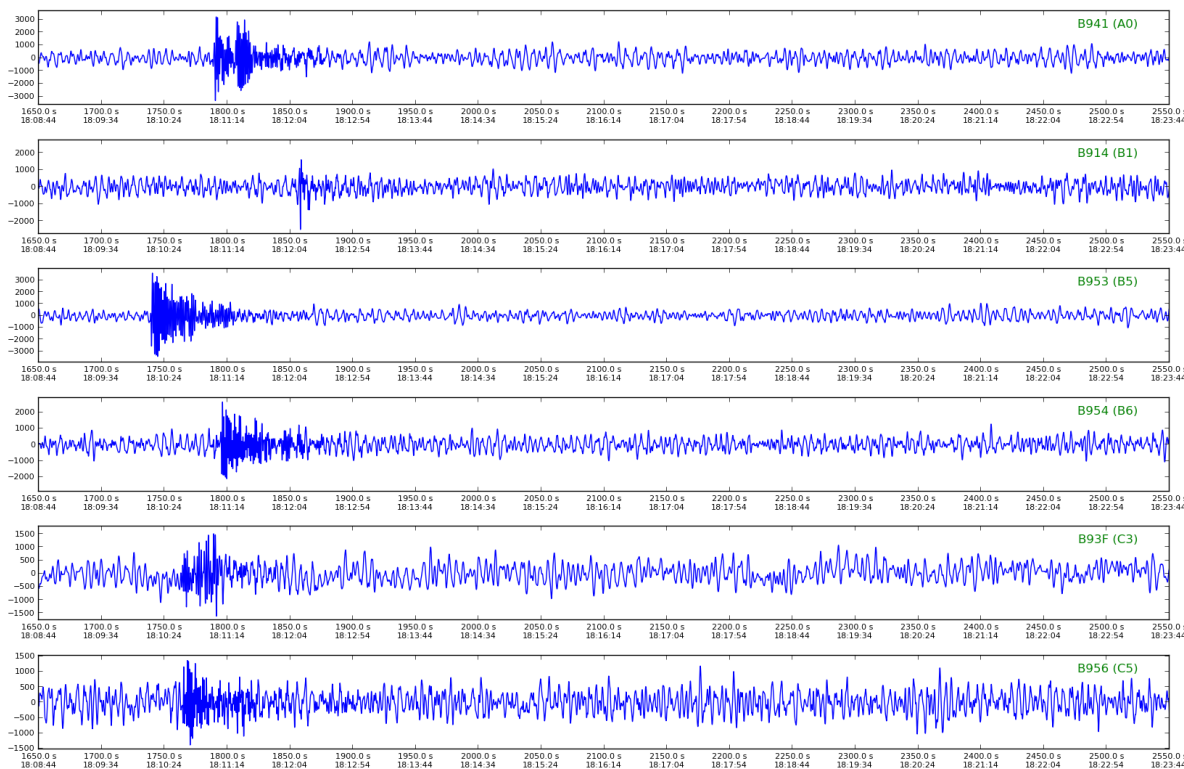
## METODYKA

### Podstawowe założenia

31 października 2015 roku nad północną Polską miał miejsce przelot bolidu. Jego eksplozja zarejestrowana została przez stacje sejsmologiczne zainstalowane w ramach eksperymentu 13 BB Star.



Ryc. 4: Lokalizacja stacji biorących udział w pasywnym eksperymencie sejsmicznym 13 BB star, Źródło: Marek Grad, Marcin Polkowski, Monika Wilde-Piórko, Jerzy Suchocki, Tadeusz Arant. *Passive Seismic Experiment „13 BB Star” in the Margin of the East European Craton, Northern Poland*, De Gruyter Open, 2015.



Ryc. 5: Sejsmogramy stacji 13 BB STAR

Na podstawie danych uzyskanych z sejsmografów założono, że źródłem zapisu sejsmicznego była eksplozja bolidu nad powierzchnią Ziemi. W celu określenia miejsca wybuchu należało obliczyć promienie dla sfer wokół każdej stacji, każdy z nich odpowiadał określonemu czasowi eksplozji. Dla danego czasu eksplozji, wybuch wystąpiłby w miejscu przecięcia się sfer dla każdej stacji. W ten sposób obliczane były promienie dla coraz większych czasów przyścia fali – a więc dla coraz wcześniejszych czasów hipotetycznego wybuchu. Na tej podstawie sprawdzić można, gdzie sfery dla danych czasów eksplozji bolidu się przetną. Miejsce tego przecięcia będzie lokalizowało eksplozję.

### Obliczanie promieni sfer

W początkowej fazie założony został model płaskiej Ziemi oraz stała – uśredniona – prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej  $v = 333$  m/s. Dla każdej ze stacji odczytany został czas przyścia fali z dokładnością do  $\pm 0,02$  s. Następnie obliczone zostały różnice czasów eksplozji i przyścia fali do stacji sejsmologicznej, oznaczona jako  $d$  [s] dla różnych hipotetycznych czasów eksplozji bolidu.

Jako przykład można podać przypadek, w którym czas przyścia fali do stacji A0, to godzina 19:07:04,32 czasu lokalnego. Różnica wyniosła  $d = 224,32$  s.

W celu obliczenia promienia  $r$  sfery dla powyższego przypadku posłużono się wzorem:

$$r = d \cdot v,$$

gdzie  $d$  odpowiada różnicy czasu między czasem wybuchu i czasem przyścia fali do stacji, a

$v$  – prędkość rozchodzenia fali dźwiękowej w powietrzu.

Poniżej przedstawiono przykład stacji A0:

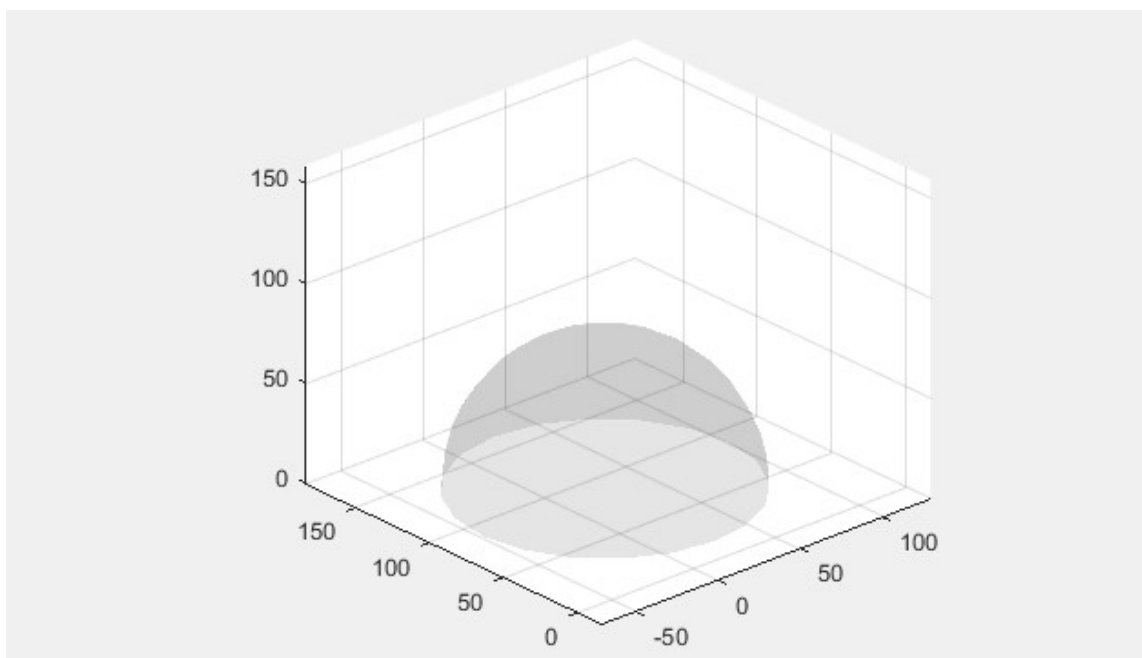
$$r = 224,32 \text{ s} \cdot 333 \text{ m/s} = 74698,56 \text{ m}.$$

Po obliczeniu i wykonaniu wstępnych wizualizacji rzutów sfer na płaską Ziemię w postaci okręgów, przedział czasowy, w którym wybuch bolidu mógł mieć miejsce, został zawężony do czasu między 19:07:20 a 19:07:30. Okręgi dla tego przedziału czasowego przecinały się bądź były bliskie przecięcia również dla pozostałych stacji.

W kolejnym kroku dla podanego wyżej przedziału czasowego obliczone zostały promienie  $r$  sfer dla różnic czasu między eksplozją a przyjściem fali, w odstępach co jedną sekundę. Promienie  $r$  obliczone zostały także dla różnych – wciąż jednak stałych – prędkości  $v$  rozchodzenia się fali dźwiękowej. Zostały przyjęte prędkości  $v$  równe 323 m/s, 333 m/s oraz 343 m/s.

Później wykonane zostały także obliczenia dla prędkości  $v$  fali od 303 m/s do 323 m/s z krokiem co 1 m/s, w celu sprawdzenia, czy dla dobranych w ten sposób prędkości rozchodzenia się dźwięku w powietrzu wyznaczone sfery przetną się, i tym samym, pozwolą na wyznaczenie czasu i miejsca eksplozji.

Na podstawie powyższych obliczeń została wykonana wizualizacja modelu w MATLABie.



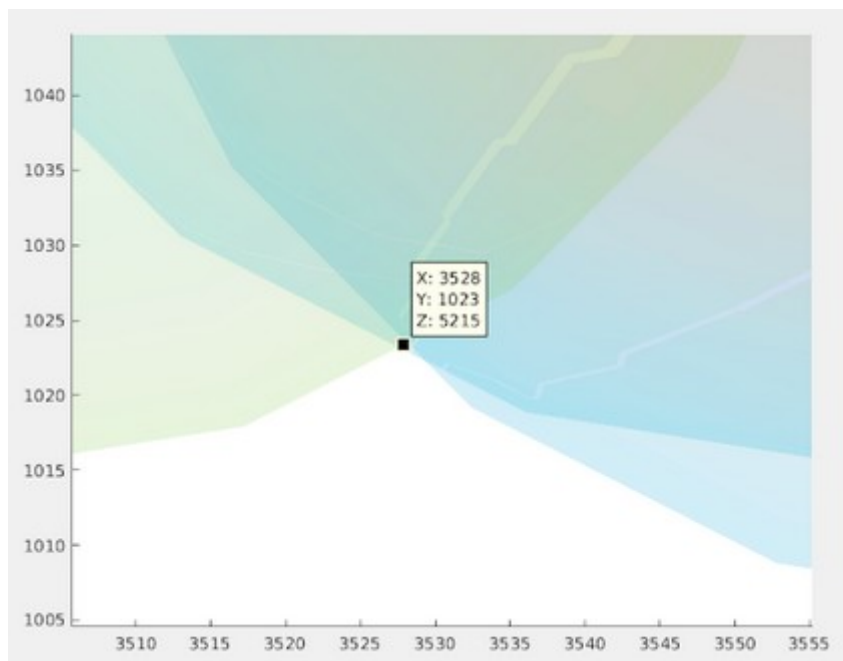
Ryc. 6: wizualizacja półsfery dla stacji A0, dla 19:07:04.

### Model dla płaskiej Ziemi

W pierwszym etapie interpretacji uzyskanych z obliczeń danych było napisanie programu, który dla zadanych współrzędnych i promieni  $r$  rysował sfery na płaskiej powierzchni. Współrzędne geograficzne zamienione zostały na współrzędne kartezjańskie, a środek układu przyjęty został w stacji Górka Klasztorna (GKP, 0.0.0).

W kolejnym kroku ustalono, które trójki stacji sejsmologicznych – sfer – będą brane pod uwagę podczas analizy. Sfery wybierane były tak, by nie pokrywały się ze sobą, a także by żadna nie znalazła się wewnątrz innej. Tego typu połączenia można było brać pod uwagę, jednak uzyskiwane z analizy tych przypadków wyniki obarczone były dużymi błędami (ryc. 5). Błędne informacje uzyskiwane ze sfer przedstawionych na rysunku są spowodowane większym odchyleniem do płaszczyzny, co obarcza wyniki obliczonej wysokości eksplozji większymi błędami.

W ostatnim kroku dokonano analizy sfer dających najbardziej prawdopodobne wyniki położenia obiektu.



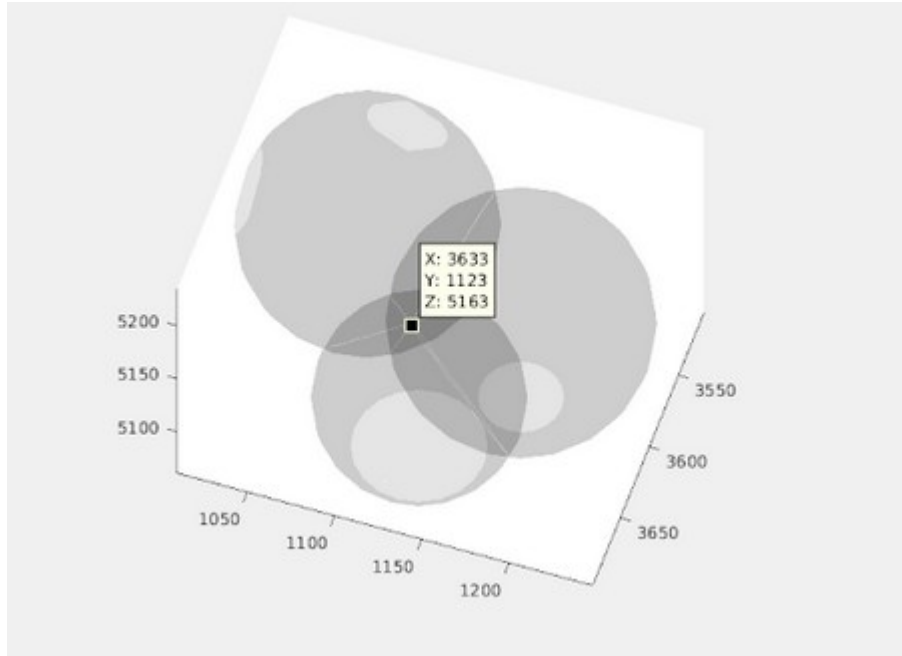
Ryc. 7: Przykładowa wizualizacja modelu dla wyników odrzuconych przy interpretacji

### Model dla sferycznej Ziemi

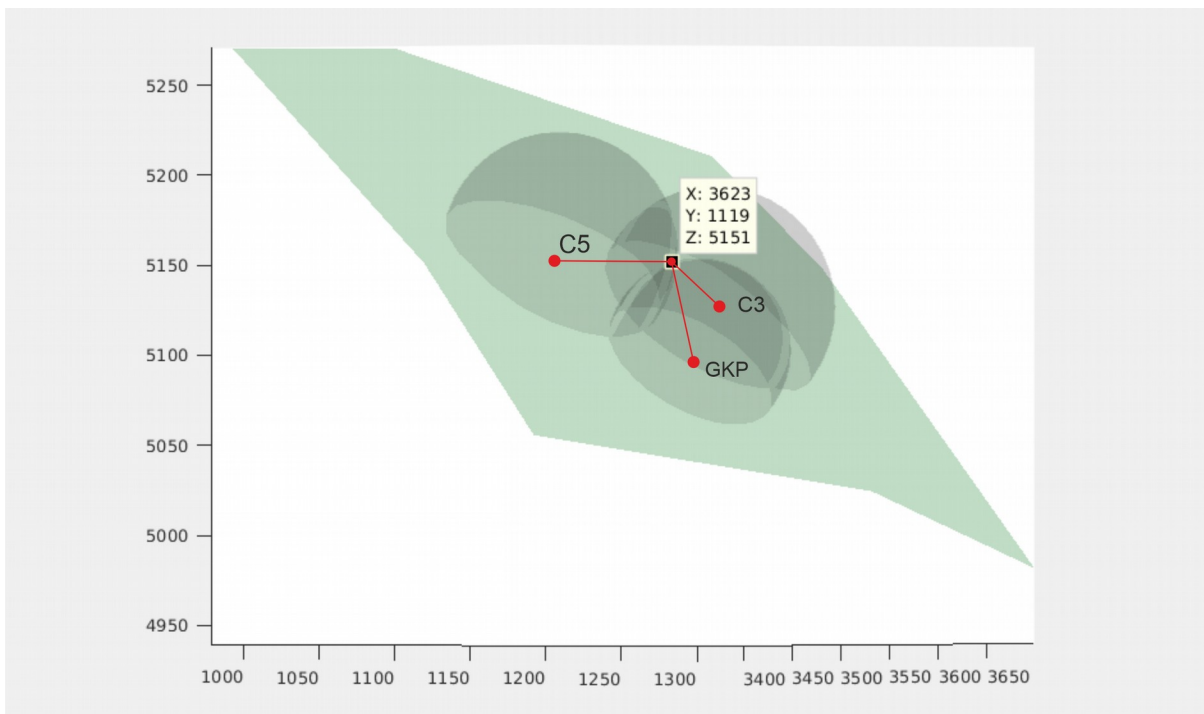
W celu eliminacji błędów i przybliżenia modelu do jak najbardziej rzeczywistych wyników stworzono model kulistej Ziemi. Ponieważ zdarzenie – przelot oraz eksplozja bolidu – widoczna była z wielu odległych od siebie miejsc, nasuwa się wniosek, że wydarzyć się to musiało na wysokości kilkudziesięciu kilometrów nad powierzchnią Ziemi. Mając do czynienia z taką wysokością, model płaskiej Ziemi, przez swój brak krzywizny, mógł dawać błędne wyniki.

Do stworzenia modelu sferycznej Ziemi należało zamienić współrzędne geograficzne na sferyczne. Wykorzystując dane, które dały najlepsze wyniki dla trójwymiarowego modelu płaskiej Ziemi jako początkowe, wyznaczona została prawdopodobna lokalizacja wybuchu w modelu sferycznym.

W ostatnim kroku współrzędne sferyczne zamienione zostały z powrotem na współrzędne geograficzne.

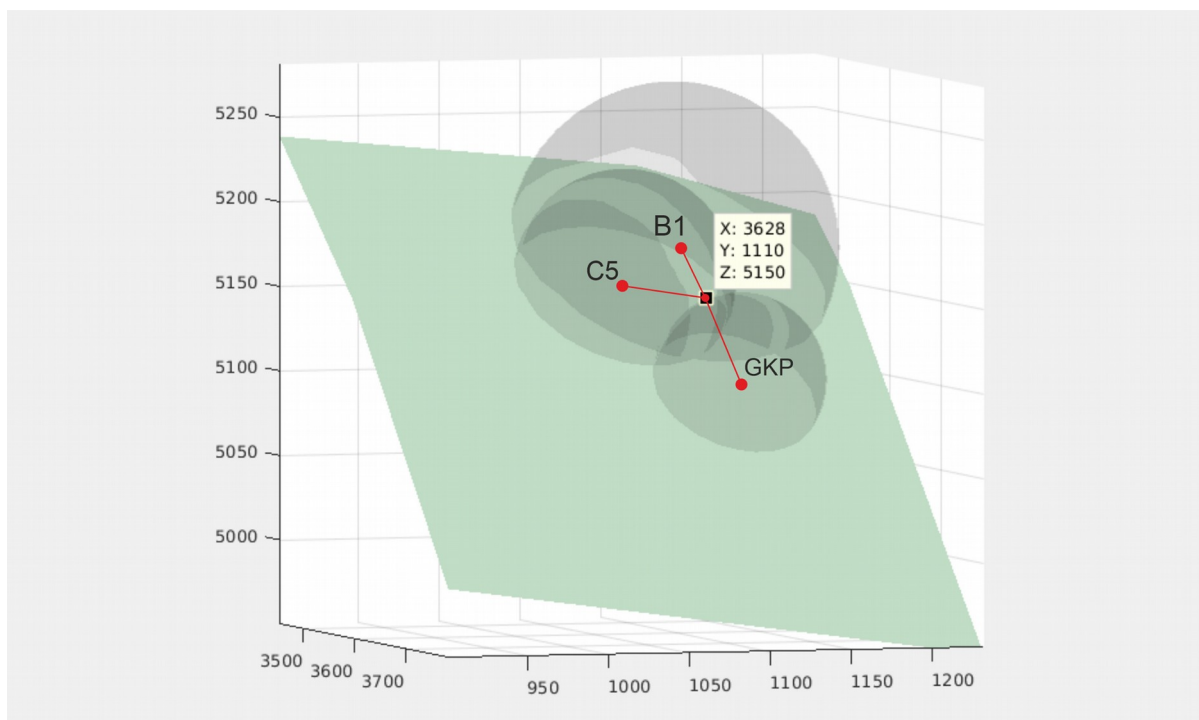


Ryc. 8: Prawdopodobne współrzędne wybuchu dla modelu sferycznej Ziemi w układzie kartezyjskim



Ryc. 9: Półsfery dla stacji C3, C5 i GKP dla czasu 19:07:26 oraz prędkości  $v = 343$  m/s widoczne na przybliżonej krzywiznie Ziemi



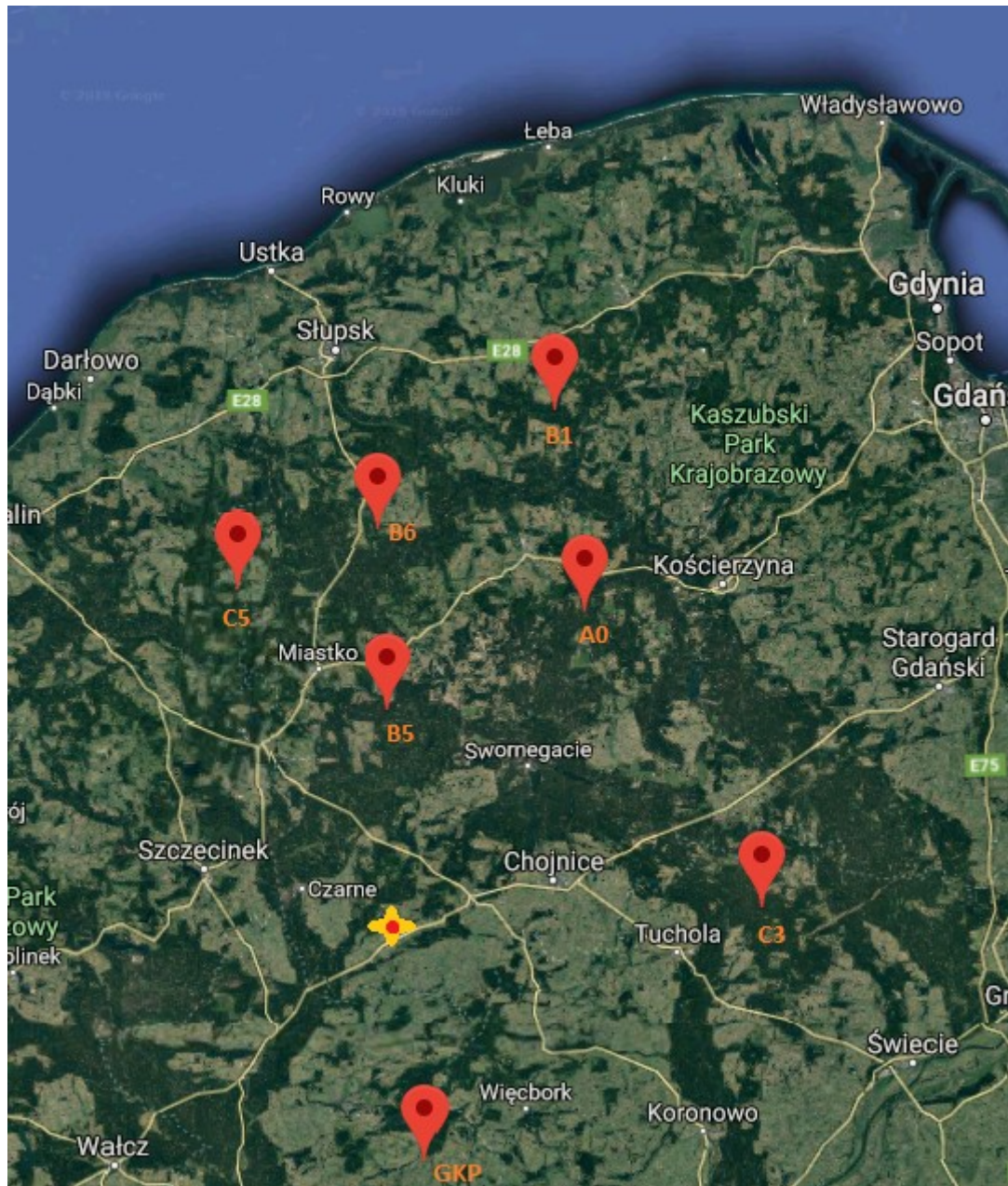


Ryc. 10: Półsfery dla stacji B1, C5 i GKP dla czasu 19:07:26 oraz prędkości  $v = 343$  m/s na krzywiznie Ziemi

### DYSKUSJA I WNIOSKI

Korzystając z modelu płaskiej Ziemi, wybrane zostały dane najlepiej odpowiadające hipotetycznemu czasowi oraz miejscu eksplozji bolidu w północnej Polsce. Wybór dokonany został na podstawie przecinających się trójek sfer dla konkretnych różnic czasów  $d$  oraz stałej prędkości  $v$  rozchodzenia się dźwięku w powietrzu. Dla uzyskanych wyników obliczone zostały średnie wartości, odpowiadające lokalizacji eksplozji  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  w układzie kartezjańskim, oraz ich niepewności. Za najbardziej dokładne uznano dane dla czasu 19:07:26, przy prędkości  $v = 343$  m/s. Uzyskane współrzędne w układzie kartezjańskim to  $X = -198 \pm 1,59$  km,  $Y = 40,89 \pm 0,82$  km oraz  $Z = 29,16 \pm 0,64$  km, w układzie współrzędnych geograficznych:  $X = 53,252^\circ \pm 0,014^\circ$  N,  $Y = 17,4537^\circ \pm 0,0062^\circ$  E,  $Z = 29,16 \pm 0,64$  km.

Następnie dane te przetworzono dla modelu sferycznej Ziemi, jako odpowiednik  $X$  przyjęto  $\varphi$ , wartości  $Y$  odpowiadać miała  $\lambda$ , a składową  $Z$  zastąpiła składowa  $h$ . Zabieg ten – uwzględnienie krzywizny Ziemi – znacznie zmniejszył niepewność składowych  $\varphi$  i  $\lambda$ , jednak zwiększyło niepewność składowej  $h$ . Lokalizacja miejsca eksplozji dla Ziemi sferycznej dla układu współrzędnych geograficznych odpowiada wartościom  $\varphi = 53,619 \pm 0,014^\circ$  N,  $\lambda = 17,136 \pm 0,065^\circ$  E,  $h = 33,5 \pm 2,5$  km, czas eksplozji 19:07:26 i prędkości  $v = 343$  m/s.



Ryc. 11: lokalizacja stacji sejsmologicznych eksperymentu 13 BB Star wraz z zaznaczonym miejscem eksplozji bolidu.

## LITERATURA

- [1] Meteoroid Size Classification -  
[https://www.spaceacademy.net.au/watch/debris/mdsclass.htm?  
fbelid=IwAR3sKx49at\\_hdmNMGk9mYUq2R2H5RdiXP83nPdCFinbEZzrkeT5OoGQtvps](https://www.spaceacademy.net.au/watch/debris/mdsclass.htm?fbelid=IwAR3sKx49at_hdmNMGk9mYUq2R2H5RdiXP83nPdCFinbEZzrkeT5OoGQtvps)
- [2] Vitaly Adushkin, Ivan Nemchinov, *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*,  
Spinger, Dordrecht, Holandia, 2008

[3] NASA Tracks Chelyabinsk Meteor Plume,  
<https://www.nasa.gov/content/goddard/around-the-world-in-4-days-nasa-tracks-chelyabinsk-meteor-plume>

[4] Five Years after the Chelyabinsk Meteor: NASA Leads Planetary Defense,  
<https://www.nasa.gov/feature/five-years-after-the-chelyabinsk-meteor-nasa-leads-efforts-in-planetary-defense>