

O WYZNACZANIU MIEJSC UPADKÓW METEORYTÓW

Spadające meteoryty rozgrzewają wyobraźnię obserwatorów i kolekcjonerów na całym świecie. Nie jeden gotów jest pokonać pół świata, aby znaleźć się w miejscu, gdzie właśnie wylądowały świeże, wciąż jeszcze czarne fragmenty kosmicznej materii. Poszukiwania zależnie od warunków terenowych i charakteru samego zjawiska spadkowego bywają mniej lub bardziej udane. Przyznać trzeba, że pomimo ogromnego doświadczenia niektórych poszukiwaczy większość takich wypraw kończy się niepowodzeniem. Przeciwnikiem poszukiwaczy jest zwykle możliwy do poświęcenia czas, warunki terenowe jak też dość ograniczona precyzja wyznaczania miejsca spadku skutkująca wielkimi obszarami błędów. W niniejszym artykule postaram się przybliżyć wpływ różnych czynników na precyzję obliczeń.

METODOLOGIA

Polska Sieć Bolidowa do obliczenia miejsc upadku meteorytów używa klasycznej metody opisanej przez Zdenka Ceplechę w 1987 r. (fundamentalna praca „Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks”). W pewnym skrócie — danymi wejściowymi do obliczeń są końcowe parametry zaobserwowanej trajektorii. Aby w ogóle wyznaczyć parametry spadku, potrzebujemy precyzyjnie określonych parametrów końcowych. Potrzebne są: obserwowany kierunek lotu (a więc azymut i wysokość radiantu dla końcowej fazy lotu), prędkość, zmiana prędkości, a więc w tym wypadku hamowanie oraz położenie końcowego punktu trajektorii — jego współrzędne geograficzne wraz z wysokością. Wszystkie te wynikające z obserwacji elementy stanowią początkowy punkt naszych obliczeń. Co dzieje się dalej? Otóż dalej możemy już tylko modelować coś, czego nie widzimy. Nasz meteoroid kontynuuje niewidoczny lot i jest poddawany działaniu rozmaitych sił. Pierwotna prędkość jest błyskawicznie tracona, a kierunek lotu się zmienia. Już po kilku sekundach z pierwotnego wektora prędkości zostaje niewiele i meteoroid zazwyczaj na ogromnej jeszcze wysokości dostaje się we władanie ziemskiej atmosfery. Swobodny spadek jest mniej lub bardziej zaburzany przez wiatry wiejące w różnych kierunkach w różnych warstwach atmosfery i ostatecznie meteoroid ląduje z niezbyt dużą prędkością i w kierunku, który często nie ma nic wspólnego z pierwotnym kierunkiem jego trajektorii. Te kilkaset sekund ciemnego lotu jest symulowane numerycznie, niemal metr po metrze symulowany jest wpływ grawitacji, hamowania atmosferycznego oraz wpływ wiatru wiejącego na różnych wysokościach. Tu docieramy do kolejnej istotnej rzeczy — aby z dobrym skutkiem prześledzić dalsze losy meteoroidu, potrzebujemy dobrej jakości profilu atmosferycznego zawierającego kierunki i prędkości wiatru oraz wartości ciśnienia dla różnych wysokości. W praktyce dane takie są dostępne jako rezultat sondowań balonowych lub jako mo-

dele numeryczne (np. GFS). Podczas obliczeń jest określone położenie meteoroidu względem punktu końcowego trajektorii, kierunek jego przemieszczania się oraz prędkość. Gdy wysokość osiągnie wartość graniczną równą założonej wysokości terenu, obliczenia zostają przerwane i uzyskujemy teoretyczne miejsce upadku meteorytu. Warto odnotowania jest fakt, że przy obliczeniach nie uzyskujemy wprost masy spadającego obiektu, zamiast tego mamy tu do czynienia z pewnym stałym dla danego ciała parametrem, wynikającym ze stosunku masy i powierzchni meteoroidu, którego efektem jest choćby takie a nie inne obserwowane hamowanie końcowe. W ten oto sposób uzyskać można dowolną liczbę kombinacji masy i gęstości — tak samo w atmosferze może zachowywać się kilkukilogramowy chondryt jak i kilogramowy meteoryt żelazny, masa końcowa jest więc rezultatem wtórnym i efektem pewnych założeń.

NIEPEWNOŚCI OBSERWACYJNE

Niepewności obserwacyjne to niepewności parametrów jakie wprowadzamy na początku obliczeń. Są to niepewności zależne wprost od jakości sprzętu używanego do obserwacji, jak też od odległości między bolidem a stacjami obserwacyjnymi, od geometrii obserwacji jak też od obecności i charakteru saturacji obrazu, obecności komy, odbłasków i innych wad samego obrazu. W skrajnych przypadkach istotna staje się też refrakcja atmosferyczna przy horyzoncie.

POŁOŻENIE PUNKTU KOŃCOWEGO

Wyznaczenie końcowego punktu trajektorii dla kamer PFN jest obarczone błędem od kilkudziesięciu do kilkuset metrów, dotyczy to zarówno współrzędnych geograficznych punktu, jak i jego wysokości. Niepewność położenia punktu końcowego w długości i szerokości geograficznej przekłada się wprost na niepewność wyznaczenia współrzędnych miejsca spadku. Niepewność wyznaczenia wysokości dodatkowo „zmienia” czas symulacji, wprowadzając dodatkowe, zwykle niewielkie błędy.

KIERUNEK

Radiant bolidu w punkcie końcowym określa kierunek jego lotu. Kierunek ten zazwyczaj określony jest dość dokładnie, z precyzją sięgającą ułamek stopnia dla najdłuższych zjawisk. Jednostopniowy błąd w azymucie może przesunąć punkt upadku o wartości rzędu 100 m.

PRĘDKOŚĆ KOŃCOWA

Ma znaczący wpływ na wynik i tu niepewności rzędu 0,5 km/s dla drobnych i płasko lecących meteoroidów mogą przełożyć się wręcz na kilometry w terenie. Parametru tego nie wolno jednak rozpatrywać samodzielnie, jest on bowiem ściśle powiązany z kolejnym, jakim jest:

HAMOWANIE KOŃCOWE

Hamowanie końcowe to pochodna prędkości po czasie, a jego niepewność jest pochodną wszystkich nieszczęść, z jakimi możemy się zetknąć podczas obserwacji. Żeby tego było mało, ma ona ogromny wpływ na dalsze losy meteoroidu podczas symulacji. Hamowanie w warunkach, jakie stwarza atmosfera na danej wysokości, wraz z prędkością, mówi nam, w którym momencie meteoroid wyhamuje swoją kosmiczną prędkość. Daje to informację, jak będzie radził sobie w dalszej części ciemnego lotu. Niepewność hamowania i prędkości przekłada się na wielokilometrowe niepewności określenia miejsca spadku, szczególnie przy płaskich trajektoriach. Z prędkości, hamowania i znajomości stanu atmosfery uzyskujemy informację pozwalającą oszacować masę przy założeniu danej gęstości. Dla PFN hamowanie wyznaczane jest z precyzją od kilkuset do kilku tysięcy m/s². Ostatecznie skutkuje to niepewnościami masy w granicach jednego rzędu wielkości i powstaniem teoretycznej osi spadku długości wielu kilometrów, kierunek tej osi jest wypadkową działania wiatrów na różnych wysokościach. Ze względu na istotny wpływ parametru hamowania na wyniki, należy pamiętać o właściwym doborze sprzętu do obserwacji bolidowych. Powinny to być kamery z obiektywami o umiarkowanej światłosile, niewielkich wadach optycznych i o wysokiej rozdzielczości, w idealnym przypadku pracujące w 12 lub 14 bitach. W przypadku klasycznych kamer ośmiobitowych z bardzo jasnymi obiektywami o krótkiej ogniskowej wyniki będą obciążone znacznymi błędami. Czasem warto jest poświęcić skuteczność dla jakości wyniku.

PROFILE ATMOSFERY

Po wprowadzeniu parametrów początkowych i uruchomieniu symulacji wirtualny meteoroid jest poddawany działaniu symulowanych wiatrów i hamowaniu związanemu z wartością ciśnienia na danej wysokości. Informacje, jakie musimy wprowadzić do symulacji, mogą pochodzić z sondowań balonowych bądź też z numerycznych modeli atmosfery. Balony meteorologiczne są wypuszczane na całym świecie w określonych lokalizacjach i o określonym czasie. Dzięki balonom znamy empiryczne wartości ciśnienia zmierzone dla różnych wysokości. Zakres wysokości takiego sondowania jest zazwyczaj wystarczający, typowa wysokość, na jakiej kończą się pomiary, zawiera się w granicach od 25 do 35 kilometrów. Balony mogą się wydawać idealnym źródłem informacji o stanie atmosfery, niemniej jest z nimi pewien problem. Otóż są wysyłane one zazwyczaj dwa razy w ciągu doby a ilość lokalizacji jest stosunkowo mała. W przypadku dynamicznej pogody (przechodzenia frontu, obecności prądów strumieniowych itp.) ekstrapolowanie wyników na obszar odległy choćby o 100–200 km może być ryzykowne. Innym, stosunkowo nowym źródłem danych mogą być numeryczne modele pogodowe, takie jak GFS. Pozwalają one określić stan atmosfery dla praktycznie każdego punktu, nieco gorzej jest z dostępnością danych dla różnych wysokości. Przeprowadzone testy pokazują, że dane pochodzące z profilu

atmosfery mają kardynalny wpływ na wynik obliczeń nawet dla meteoroidów o masie dochodzącej do kilku kilogramów. Dość powiedzieć, że przy masach rzędu kilku gramów i płaskiej trajektorii meteoroid pod wpływem wiatru może „zawrócić” pod pierwotną trajektorię, lądując 20–30 km od punktu końcowego. Dobity przykład dla jednego z ostatnich zjawisk pokazał, że wprowadzenie do obliczeń niepewności kierunku wiatru równej 10 stopni i niepewności prędkości wiatru równej 20 km/h wprowadził znaczący, kilkukilometrowy rozrzut dla miejsca spadku meteorytu o masie niewiele mniejszej od jednego kilograma.

INNE MOŻLIWE ŹRÓDŁA NIEPEWNOŚCI

Dość interesujące z punktu widzenia obliczeniowego mogą być sytuacje, w których wprost nie widać rzeczywistego stanu, w jakim znajduje się meteoroid. Mogą być to między innymi sytuacje, w których dochodzi do fragmentacji w warunkach wysokiej saturacji obrazu, bądź w sytuacjach, gdy dane początkowe są wynikiem dodatkowego modelowania, jak miało to miejsce przy okazji bolidu nad Głogowem w styczniu bieżącego roku. Bolid ten zakończył się dużym rozbłyskiem, według pierwszych obliczeń prócz niewielkiej masy głównej, większa część masy miała zasypać wielki obszar na zachód od miasta w postaci drobnych, jednogramowych fragmentów. Poszukiwania we wskazanym obszarze zakończyły się fiaskiem. Jak łatwo zauważyć, nawet niewielki błąd w określeniu rozmiaru tych drobnych fragmentów mógł spowodować przesunięcie obszaru nawet o dziesiątki kilometrów.

NA ZAKOŃCZENIE

Niniejszy artykuł ma na celu uświadomienie, z jakimi niepewnościami mamy do czynienia w przypadku wyznaczania miejsc spadków meteorytowych. O ile sama metodyka obliczeń nie zmieniła się znacząco przez minione lata, o tyle świadomość możliwych do zaistnienia zjawisk negatywnie wpływających na wynik znacząco wzrosła. Warto o tym pamiętać przed wyruszeniem w teren, rozważając, czy aby każdy przypadek bolidu spadkowego wart jest zaangażowanych sił i środków, i odwrotnie — do którego przypadku bez zaangażowania odpowiednich sił i środków wyruszać nie warto.

 Przemysław Żołądek

Z ostatniej chwili...

Najnowszym zarejestrowanym przez polskie stacje bolidowe potencjalnym spadkiem meteorytu jest zjawisko bolidu z 31 lipca br.

Tym razem obliczeniami możliwego obszaru rozrzutu małych kawałków meteorytu zajęł się Jim Goodal. Niestety, obszar (ok. 35 km na południowy wschód od Radomia) jest dość rozległy, a masa pozaziemska materii szacowana na 10–100 gramów. Mapkę terenu można znaleźć na stronie

<http://www.meteoryt.org/31-07-2020-002530/>