O groźbie zderzenia planetoidy 2002 NT7 z Ziemią

Grzegorz SITARSKI

Od kilku lat dowiadujemy się co jakiś czas o możliwości rychłego końca świata spowodowanego zderzeniem planetoidy z Ziemią. Planetoida 1997 XF11 miała uderzyć w Ziemię w 2028 r., planetoida 1999 AN10 jeśli nie w 2027, to z pewnością w 2039 r. Ostatnio w lipcu 2002 r. media doniosły, że nowo odkryta planetoida 2002 NT7 może uderzyć w Ziemię w lutym 2019 r., jakkolwiek szanse katastrofy oceniano jak jeden do miliona (tylko co to właściwie znaczy?). Po kilku dniach jednak, podobnie jak w poprzednich przypadkach, alarm odwołano. Planetoid mogących zagrozić Ziemi znamy już ponad pięćset, a ciągle odkrywa się nowe. Wydaje się, że po odkryciu takiej niebezpiecznej planetoidy astronomowie najpierw straszą zderzeniem, aby potem groźbę odwołać. Postaramy się więc odkryć kulisy badań ruchu planetoid, które prowadzą do przepowiedni końca świata. Opowiemy, jak prowadzi się takie badania w Polsce za pomocą programów komputerowych opracowanych w Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie na podstawie oryginalnych pomysłów polskich astronomów.

Ziemia i planetoida krążą po orbitach eliptycznych, w których w jednym z ognisk elipsy znajduje się Słońce. Punkty, w których orbita planetoidy przecina płaszczyznę orbity Ziemi, nazywamy węzłami. Aby mogło nastąpić zderzenie, orbity Ziemi i planetoidy muszą się przecinać, tzn. co najmniej jeden z węzłów orbity planetoidy musi leżeć na orbicie Ziemi. Jest to podstawowy warunek, aby w ogóle dalej zajmować się potencjalną możliwością zderzenia z nowo odkrytą planetoidą. Ale istnieje jeszcze drugi warunek: Ziemia i planetoida muszą znaleźć się w tym niebezpiecznym węźle jednocześnie. Sprawa jest nieco bardziej skomplikowana, bowiem orbity obu ciał zmieniają się ciągle z powodu perturbacji planetarnych. Chociaż zmiany orbit są na ogół niewielkie, to mogą jednak groźbę zderzenia zarówno zmniejszać, jak i zwiększać.

Orbitę eliptyczną na daną datę (epokę) określa sześć tzw. elementów orbity $E_k (k = 1, 2, \ldots, 6)$: a, e, ω, Ω, i, M, gdzie a jest połową wielkiej osi elipsy, e jej mimośrodem, trzy kąty – długość orbitalna peryhelium ω, długość ekliptyczna węzła wstępującego Ω i nachylenie płaszczyzny orbity do płaszczyzny ekliptyki i – opisują położenie orbity w przestrzeni, natomiast anomalia średnia M określa położenie planetoidy na orbicie względem peryhelium. Płaszczyzna ekliptyki to płaszczyzna drogi Ziemi wokół Słońca, zatem kąty ω, Ω oraz parametry a i e określają położenie punktów przecięcia orbity planetoidy z płaszczyzną orbity Ziemi.

Orbitę nowo odkrytej planetoidy wyznacza się z trzech obserwacji dostatecznie odległych w czasie. Każda obserwacja pozycyjna zawiera moment obserwacji i dwie współrzędne planetoidy na niebie, rektascensję i deklinację, mierzone niezależnie. Trzy obserwacje dają dziewięć dość skomplikowanych równań, z których można wyznaczyć sześć elementów orbity (i dodatkowo trzy odległości planetoidy od Ziemi). Na podstawie tych wyznaczonych elementów można teraz obliczyć pozycje planetoidy na niebie, a różnice między wartościami współrzędnych obserwowanych i obliczonych, tzw. $O - C$, nazywamy residuami. Oczywiście dla tych trzech obserwacji, z których wyznaczaliśmy orbitę, residua powinny być bliskie zeru, ale dla innych obserwacji, zwłaszcza coraz bardziej odległych w czasie, residua mogą się nawet znacznie różnić od zera. Dzieje się tak dlatego, że obserwacje obarczone są przypadkowymi błędami pomiarowymi, których nie da się uniknąć, zatem ta prowizoryczna orbita jest bardzo niedokładna. Trzeba więc poprawić wartości elementów orbity tak, aby „pasowały” do wszystkich obserwacji. Robi się to w ten sposób, że wyjściowe równania, z których wyznaczono elementy, rozwija się w szeregi względem tych elementów, zachowując tylko wyrazy z pierwszymi potęgami ich przyrostów. Tak powstają liniowe tzw. równania obserwacyjne, z których oblicza się te przyrosty, czyli sześć poprawek ΔE_k do wartości początkowych elementów:

$$a_{1,1}\Delta E_1 + a_{2,1}\Delta E_2 + \ldots + a_{6,1}\Delta E_6 = (O - C)_1$$

$$a_{1,2}\Delta E_1 + a_{2,2}\Delta E_2 + \ldots + a_{6,2}\Delta E_6 = (O - C)_2$$

$$\ldots$$

$$a_{1,n}\Delta E_1 + a_{2,n}\Delta E_2 + \ldots + a_{6,n}\Delta E_6 = (O - C)_n$$

$a_{i,k}$ oznaczają tu stałe współczynniki przy niewiadomych $\Delta E_1, \ldots, \Delta E_6$.

Układu tych równań w zasadzie nie można rozwiązać, bowiem jest ich więcej niż niewiadomych. Jeśli wszystkie wyrazy równań przenieść na jedną stronę i podstawić jakieś wartości niewiadomych $\Delta E_1, \ldots, \Delta E_6$, to po prawej stronie otrzyma się wówczas tzw. odchyłki. Ich wartości zależą od niewiadomych, chcielibyśmy więc znaleźć takie wartości niewiadomych, które najlepiej spełniałyby równania obserwacyjne w tym sensie, że dawałyby najmniejsze odchyłki. Problem ten rozwiązuje tzw. metoda najmniejszych kwadratów: poszukujemy takich wartości niewiadomych, aby po podstawieniu do równań obserwacyjnych otrzymać minimalną wartość sumy kwadratów odchyłek. Algorytm rozwiązywania takiego układu równań podał już Gauss, ale w astronomii największą karierę zrobił algorytm oparty na rachunku krakowianowym. Wynalazł go w latach 20. XX wieku krakowski astronom Tadeusz Banachiewicz, usiłując usprawnić prowadzenie obliczeń za pomocą powszechnie wtedy stosowanych ręcznych arytmometrów. Krakowiany, podobnie jak macierze, to tablice liczbowe, tylko reguła mnożenia jest inna, mianowicie mnożymy

„kolumny przez kolumny”. Ta pozornie drobna zmiana nie tylko ułatwiała praktyczne mnożenie krakowianów, ale wprowadzała inne zasady algebry krakowianowej i stwarzała nowe możliwości zastosowań. Pełny algorytm krakowianowy metody najmniejszych kwadratów nie ma sobie równych w prostocie i przejrzystości, pozwala znaleźć minimalną wartość sumy kwadratów odchyłek (bez konieczności korzystania z równań obserwacyjnych), a stąd średni błąd obserwacji μ_o oraz poprawki do elementów orbity i ich błędy średnie.

Odkryta 9 lipca 2002 r., na kilka miesięcy przed przejściem przez peryhelium (28 listopada), planetoida 2002 NT7 była obserwowana przez wielu obserwatorów i przez dwa tygodnie wykonano 113 obserwacji. Wtedy ukazała się pierwsza wiadomość, że jej orbita przecina się w węźle (wstępującym) z orbitą Ziemi. Obiegając Słońce, planetoida przechodzi przez ten węzeł co 837 dni i 1 lutego 2019 r. może dojść do niebezpiecznego zbliżenia do Ziemi, przy czym zderzenie nie jest wykluczone. Szczegółowe dane dostępne były przez Internet (patrz adres na końcu artykułu), więc w Warszawie można było niezwłocznie przystąpić do badań ruchu tej groźnej planetoidy.

Przypadkowe błędy pomiarowe nie są jedynym źródłem błędów obserwacji. Łatwo przewidzieć, że wśród obserwacji mogą się znaleźć pozycje błędne z powodu pomyłki zapisu, przestawienia cyfr itp., co w rezultacie da pojedyncze residua $O - C$ wyraźnie odbiegające od pozostałych. Takie obserwacje trzeba odrzucić, tylko jak je rozpoznać? Otóż w latach 60. XX w. warszawski astronom Maciej Bielicki opracował matematycznie obiektywne kryteria selekcji obserwacji, przyjmując założenie, że rozkład błędów przypadkowych jest normalny (gaussowski). Po „oczyszczeniu” obserwacji metodą Bielickiego ze 113 obserwacji planetoidy 2002 NT7 pozostały do rozwiązania 223 równania obserwacyjne. Stosując metodę najmniejszych kwadratów, dostaliśmy średni błąd obserwacji $\mu_o = 0{,}5''$ oraz poprawione elementy orbity na epokę 25 lipca 2002 r. wraz z ich błędami średnimi; nazwijmy tę orbitę orbitą nominalną. Skoro jej elementy są dokładne tylko w granicach ich błędów średnich, to może przecież istnieć wiele orbit, o nieco innych (w tych granicach) elementach, równie dobrze „pasujących” do obserwacji. Gdzieś wśród nich znajduje się także ta „prawdziwa” orbita, której poszukujemy, a jeśli jest tam także orbita zagrażająca Ziemi, to bardzo chcielibyśmy ją poznać. Powstaje problem, jak znaleźć ten zbiór innych orbit dobrze pasujących do obserwacji. Wykorzystaliśmy tu następujący pomysł (a za pomocą rachunku krakowianowego można wykazać, że jest on matematycznie poprawny). Jeśli zastosować generator liczb losowych z rozkładem gaussowskim o dyspersji $\sigma \approx \mu_o$, to można wielokrotnie wylosować przypadkowe wartości residuów, obliczyć nowe poprawki do elementów orbity nominalnej i otrzymać w ten sposób dowolnie liczny zbiór orbit (tj. szóstek elementów) jednakowo dobrze pasujących do obserwacji.

Takie losowanie zostało dokonane i otrzymaliśmy 850 różnych orbit, których odpowiednie elementy wynikają ze 113 obserwacji z błędem średnim równym $0{,}5''$ – takim, jak orbita nominalna. Korzystając teraz z tego zbioru elementów jako danych początkowych, 850 razy całkowano numerycznie równania ruchu planetoidy do 2019 roku, aby sprawdzić, na jaką minimalną odległość mogłaby się wtedy zbliżyć do Ziemi. W rezultacie otrzymano zbiór 850 minimalnych odległości od Ziemi (dokładniej: od środka Ziemi) w bardzo szerokim zakresie: od 0,42454 j.a. dla orbity nr 149 do 0,000175 j.a. dla orbity nr 570. Widać z tego, że stosunkowo niewielkie różnice w danych początkowych mogą dać zupełnie różne wyniki po kilkunastu latach ruchu planetoidy. Gdyby jednak planetoida biegła po orbicie nr 570, to w 2019 r. mogłaby się rzeczywiście niebezpiecznie zbliżyć do Ziemi. Do zderzenia, co prawda, by nie doszło (promień Ziemi wynosi 0,0000426 j.a.), bo planetoida przeszłaby około 20 tys. km nad powierzchnią Ziemi. Tak więc wśród 850 orbit nie wykryto orbity zderzeniowej. Może po prostu nie została wylosowana? A gdyby tak wylosować ich więcej? Losowanie dziesięciu tysięcy orbit znacznie poszerzyło granice możliwych wartości elementów, tylko że badanie ruchu planetoidy na tylu orbitach nie miałoby już sensu, bo pochłonęłoby zbyt wiele czasu komputerowego, a i tak nie byłoby pewności, że wśród nich znalazłaby się orbita zderzeniowa.

Jeśli jednak mamy już orbitę, na której planetoida może znacznie zbliżyć się do Ziemi, to istnieje sposób znalezienia orbity zderzeniowej. Trzeba zastosować metodę najmniejszych kwadratów z warunkami ścisłymi. Znanym przykładem z geodezji są np. pośrednie pomiary trzech kątów trójkąta: wartości kątów można wyznaczyć metodą najmniejszych kwadratów, ale ich suma musi wynosić dokładnie 180°. Jest to warunek naturalny wynikający z geometrii euklidesowej, natomiast w przypadku planetoidy warunek ścisły narzucamy: chcemy z obserwacji wyznaczyć metodą najmniejszych kwadratów taką orbitę, aby w 2019 r. minimalna odległość planetoidy od środka Ziemi była mniejsza niż 0,0000426 j.a. Startując z orbity nr 570, stopniowo zmniejszamy odległość od Ziemi od znanej już wartości 0,000175 j.a. Wymaga to wielokrotnego rozwiązywania równań dla sześciu poprawek elementów orbity i dodatkowych trzech parametrów wynikających z narzucenia warunku ścisłego. Procedura ta prowadzi do znalezienia orbity zderzeniowej, ale niezbędny jest pewien komentarz. Otóż jeśli orbita zderzeniowa naprawdę istnieje wśród wielu orbit dobrze pasujących do obserwacji, to średni błąd obserwacji z niej otrzymany będzie taki sam, jak błąd μ_o z orbity nominalnej. Jeśli jednak w rzeczywistości orbita taka nie istnieje, to metoda wprawdzie tak samo będzie minimalizować sumę kwadratów odchyłek, ale średni błąd wynikający z orbity zderzeniowej uzyskanej „na siłę” będzie większy niż μ_o. Jest to jednocześnie dla nas dobry wskaźnik pozwalający wykluczyć zderzenie.

Orbita zderzeniowa pozwala obliczyć czas i miejsce zderzenia na powierzchni Ziemi. Opisaną wyżej metodą znaleźliśmy całą serię orbit zderzeniowych, które dla 113 obserwacji wszystkie dają średni błąd $\mu_o = 0{,}5''$. Widać stąd, że alarm dotyczący katastrofy kosmicznej nie był bezpodstawny: opierając się na dotychczasowych danych obserwacyjnych, nie można było wykluczyć groźby zderzenia. W tabeli podajemy parametry zderzenia dla dziesięciu wybranych orbit zderzeniowych. Widać, że zderzenie mogłoby nastąpić 1 lutego 2019 r. tuż przed południem czasu uniwersalnego w okolicach południowego bieguna Ziemi.

W zbiorze 113 obserwacji ostatnich sześć zostało wykonane 24 lipca. Potem nastąpiły cztery dni przerwy i pojawiły się dalsze obserwacje z 28 i 29 lipca. Wtedy właśnie alarm odwołano. Dołączenie tych nowych obserwacji powiększyło ich zbiór do 130, a wyznaczona stąd nowa orbita nominalna dawała nadal średni błąd $\mu_o = 0{,}5''$. Ale poprzednio uzyskane orbity zderzeniowe już do tych 130 obserwacji nie pasowały: średni błąd μ_o wynosił $0{,}8''$. Różnica zdawałoby się niewielka, ale wystarczająca, aby zderzenie wykluczyć. Jeśli dodać, że wykorzystanie dalszych obserwacji aż do 7 sierpnia stworzyło zbiór 185 obserwacji nadal ze średnim błędem $\mu_o = 0{,}5''$, a orbity zderzeniowe dawały już $\mu_o = 1{,}2''$, to możemy spać spokojnie: zderzenia w 2019 r. nie będzie i dalsze obserwacje z pewnością to potwierdzą.

A co by było, gdyby dalsze obserwacje potwierdziły pierwszą groźbę zderzenia? Oczywiście, im więcej obserwacji zgromadzimy, zwłaszcza z następnych powrotów planetoidy do Słońca, tym dokładniej można zlokalizować miejsce i czas zderzenia. Gdyby to nawet wypadło w okolicach bieguna południowego, to uderzenie planetoidy o średnicy 2 km z prędkością 28 km/s nie tylko mogłoby całkowicie zniszczyć Antarktydę, ale wywołać niewyobrażalną katastrofę globalną. Powstaje pytanie, czy znając termin katastrofy na wiele lat wcześniej, nie można by jej jakoś zapobiec. O zniszczeniu tak wielkiego obiektu nie może być mowy, ale może dałoby się zmienić nieco tor jego ruchu? Otóż w peryhelium planetoida ma prędkość ponad 40 km/s i okazuje się, że wystarczy ją zwiększyć zaledwie o 1 cm/s (!), aby zderzenia uniknąć. Zanim doszłoby do fatalnego spotkania w 2019 r., planetoida wróci do peryhelium jeszcze sześć razy. Gdyby mieć np. pięć lat na przygotowania, to dokonawszy tej niewielkiej zmiany prędkości w roku 2007, już uniknęlibyśmy zderzenia, bo w 2019 r. planetoida minęłaby Ziemię w odległości 20 tys. km od jej powierzchni. A gdyby przygotowania się opóźniły, to mielibyśmy jeszcze szansę zrobić to w 2009 albo w 2012, a nawet w 2014 r. i wtedy w 2019 r. planetoida przeszłaby odpowiednio 15, 10 lub 5 tys. km nad powierzchnią Ziemi. Sądzę, że jeśli jeszcze nie dziś, to za 10 lat technika umożliwi zmianę prędkości planetoidy o 1 cm/s, dzięki czemu unikniemy, być może, w przyszłości innej katastrofy kosmicznej.

Adres internetowy: http://newton.dm.unipi.it/cgi-bin/neodys/neoibo?objects:2002NT7;main

Parametry potencjalnego zderzenia planetoidy 2002 NT7 z Ziemią 1 lutego 2019 r. dla kilku orbit zderzeniowych;
λ – długość geograficzna wschodnia,
φ – szerokość geograficzna,
ψ – kąt między wektorem prędkości planetoidy a kierunkiem pionu w punkcie zderzenia (kąty w stopniach),
V – prędkość planetoidy względem Ziemi w chwili zderzenia.

Nr	Cz. uniw. h:m:s	λ	φ	ψ	V km/s
1	11:50:55	94.17889	−18.96894	74.60	28.542
2	11:50:19	86.95687	−34.39174	60.70	28.543
3	11:50:05	95.02452	−42.65105	52.04	28.544
4	11:49:57	94.83938	−55.08785	40.13	28.546
5	11:50:06	96.12973	−70.03873	25.54	28.548
6	11:50:13	101.05693	−74.58072	20.67	28.548
7	11:50:24	114.51567	−79.16404	14.94	28.549
8	11:50:30	118.31914	−81.91102	11.99	28.549
9	11:50:35	122.30374	−83.99492	9.73	28.549
10	11:50:42	137.21501	−86.49710	6.45	28.549

Rozwiązanie zadania F 589.
Energia potencjalna klocka jest w obu przypadkach jednakowa, a energia potencjalna wody – nie. Między danymi położeniami nie ma punktów równowagi, zatem położenie równowagi klocka będzie trwałe, gdy środek ciężkości wypartej wody będzie wyżej. Gdy bok kwadratu będącego przekrojem klocka będzie równy 1, wtedy

$$h_{\mathrm{I}} = 1/4, \qquad h_{\mathrm{II}} = \frac{1}{3\sqrt{2}}, \qquad h_{\mathrm{II}} < h_{\mathrm{I}},$$

gdzie h to odległość w pionie środka ciężkości wypartej wody od środka ciężkości klocka. Zatem położenie II jest położeniem równowagi trwałej.