

UDERZENIE W BRZOZĘ OPŁYWEM KOŃCÓWKI LEWEGO SKRZYDŁA –ALTERNATYWNY SCENARIUSZ PIERWSZEJ FAZY KATASTROFY SMOLEŃSKIEJ

Marek Czachor

Abstract

A collision of the very tip of the left wing of Tu-154M with the birch trunk located on N. Y. Bodin's private ground in Smolensk seems the most consistent scenario of events that took place on 10th April 2010. Such a collision could not lead to falling off of the end section of the wing in direct neighbourhood of the tree. Yet, data from QAR show that 2 s after the collision the aileron section of the wing had to be already separated, although a detailed form of this process remains unclear.

Keywords – birch, ATM report

Streszczenie

Najbardziej spójnym wariantem zdarzeń, które zaszły 10.04.2010 r. w pobliżu brzozy rosnącej na działce N. J. Bodina w Smoleńsku, wydaje się muśnięcie jej pnia samym czubkiem skrzydła Tu-154M. Zderzenie takie nie mogło doprowadzić do oderwania się części skrzydła w bezpośrednim sąsiedztwie brzozy. Jednakże, dane z rejestratora QAR wskazują, iż 2 s po zderzeniu końcowa część skrzydła już odpadła, przy czym dokładny przebieg tego procesu pozostaje niejasny.

Słowa kluczowe – brzoza, ekspertyza ATM

1. WSTĘP

Zderzenie rządowego Tu-154M w dniu 10.04.2010 r. z brzozą rosnącą na działce należącej do N. J. Bodina jest źródłem rozlicznych kontrowersji. Rozpatrywane są właściwie tylko dwa możliwe scenariusze wydarzeń, które nastąpiły 10 kwietnia 2010 r. w pobliżu owego drzewa: zderzenie i utrata fragmentu skrzydła w bezpośredniej bliskości brzozy lub przelot samolotu nad brzozą - bez uszczerbku dla skrzydła. W niniejszym opracowaniu przedstawię wersję pośrednią, w moim odczuciu najbardziej spójną ze zgromadzonymi faktami. Otóż stawiam hipotezę, iż samolot w rzeczywistości uderzył w drzewo samym czubkiem skrzydła, w wyniku czego nastąpiło zniszczenie niewielkiej jego części o wymiarach ok. 1 m × 25 cm, przy czym dźwigary skrzydła nie miały bezpośredniego kontaktu z pniem. Samo odpadnięcie sześciometrowego fragmentu skrzydła musiało więc nastąpić później, prawdopodobnie już po drugiej stronie ul. Gubienko.

Rozumowanie swoje opieram na następujących przesłankach:

- 1) *Opływ końcówki skrzydła jest zniszczony w sposób zgodny z zachowanym kształtem przelotu brzozy.*
- 2) *Trajektoria pozioma wyznaczona przez ATM wskazuje, iż punkty TAWS 34-37 układają się w linię prostą, która w*

okolicy brzozy jest przesunięta na północ, w stosunku do trajektorii MAK, o długość odlamanego fragmentu skrzydła. Może to odpowiadać uderzeniu w drzewo samym czubkiem skrzydła, a nie miejscem gdzie się ostatecznie odłamało.

3) *Wg raportów MAK i KBWLLP, na wschód od brzozy nie ma żadnego śladu pozostawionego na roślinności przez samolot, a znajdującego się dalej na południe niż pień brzozy. Przesunięcie trajektorii samolotu na północ, na odległość równą długości oderwanej końcówki skrzydła, nie pogorszy zgodności z opisanymi w raportach śladami na roślinności.*

4) *Ślady ścięć na drzewach przy ul. Gubienko nie zmieniają się, jeżeli MAKowską trajektorię samolotu przesuniemy na północ o długość urwanej końcówki skrzydła.*

5) *Teza ATM, iż odpadnięcie końcówki skrzydła nastąpiło 1,5-2 s po uderzeniu w drzewo, jest niemożliwa do utrzymania, jeżeli przyjąć trajektorię poziomą ustaloną przez MAK. W takim wypadku musiałyby pozostać ślady cięcia na dwóch dużych drzewach rosnących na zachód od brzozy. Sugerowane przeze mnie przesunięcie trajektorii na północ rozwiązuje tę sprzeczność.*

Jest tylko jeden znany mi fakt, który może przeczyć postawionej przeze mnie tezie. Chodzi o krzak „przycięty przez skrzydło samolotu”, opisany w [1], a który mógłby być przycięty skrzydłem rządowego tupolewa jedynie wtedy, gdyby samolot sięgał nim kilka metrów na południe od pnia brzozy. Analogiczne ślady opisał S. Amielin, który po raz pierwszy pojawił się w tej części rejonu katastrofy dopiero 13.04.2010 r. Krzaka tego nie zauważono w raportach MAK i KBWLLP, więc należałoby sprawdzić w dokumentacji fotograficznej, wykonanej 11 i 12 kwietnia 2010 r. przez polskich ekspertów, czy rzeczywiście został przeoczony. Najlepiej byłoby dotrzeć do dokumentacji z 10.04.2010 r. – jeżeli takowa istnieje. Jak bowiem pokażę w końcowej części artykułu, sam przelot brzozy zmienił się w sposób bardzo istotny w dniach 11-13 kwietnia. Gdyby jednak okazało się, iż omawiane ślady powstały już po 10 kwietnia, mielibyśmy praktyczną pewność, iż oderwanie ok. 5 m fragmentu skrzydła nie nastąpiło przy brzozie, gdyż opływ jest elementem przymocowanym do skrzydła w miejscu, w którym kończą się jego dźwigary. Należałoby również stwierdzić, przy pomocy analizy fizyko-chemicznej zachowanych fragmentów pnia, czy czerwone ślady widoczne na zdjęciu z raportu MAK nie są jedynie artefaktem wynikającym ze sposobu kodowania kolorów i zbyt małej rozdzielczości fotografii. Ponadto, wg [1] teren na działce Bodina miał być spryskany czerwonym płynem z rozerwanej instalacji hydraulicznej samolotu. Trzeba ustalić,

czy nie jest to źródłem przebarwień widocznych na fotografii wykonanej pod wieczór 11.04.2010 r. przez członków KBWLLP. Znaczna część czerwonych plam na drewnie prawdopodobnie znikła już 12.04.2010 r. Ostatecznie usunięto je przed 13.04.2010 r.

Dalsza analiza wymaga jednak odniesienia się wpięrc do tezy, że zderzenie z brzozą zostało wykluczone przez analizę trajektorii pionowej. Twierdzą, iż oparta jest ona na przesłankach dość niepewnych.

2. CZY SAMOŁOT PRZELECIAŁ NAD BRZOŻĄ?

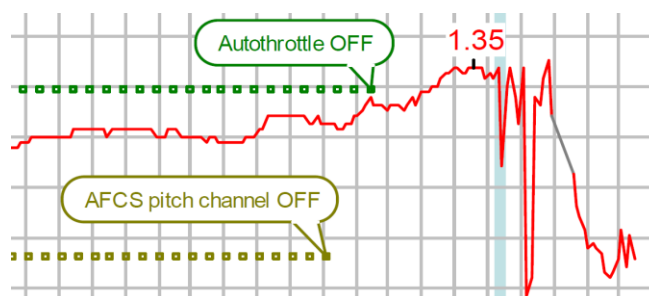
Teza, że samolot przeleciał nad brzożą, oparta jest o dwa zasadnicze argumenty: trajektorię pionową, odtworzoną poprzez całkowanie przyspieszeń, i o dane z wysokościomierza barometrycznego, odczytane z wizualizacji będącej załącznikiem do raportu KBWLLP. Nie kwestionując samej poprawności przeprowadzonych obliczeń należy stwierdzić, iż są one oparte o wielce niewiarygodne dane. Poniżej streszczam oba podejścia.

2.1. Trajektorria pionowa uzyskana z całkowania przyspieszeń pionowych

Dwukrotne całkowanie równań ruchu środka masy samolotu, przeprowadzone przez M. Jaworskiego i zaprezentowane przez K. Nowaczyka na posiedzeniu Zespołu Parlamentarnego w dniu 25.11.2011 r. [2], oparte było o dane odczytane z wykresów przyspieszeń pionowych znajdujących się w raporcie MAK (czerwona linia na Rys. 1), gdyż nie posiadano dostępu do pliku źródłowego [3]. Odczyt taki obarczony jest dużym błędem (dokładność kalibracji przyspieszeniomierza co najwyżej $g/30$ [4], próbkowanie co $1/8$ s [4], niedokładność odczytu z niewielkiego wykresu podanego w formacie pdf). Rachunku błędów nie przedstawiono.

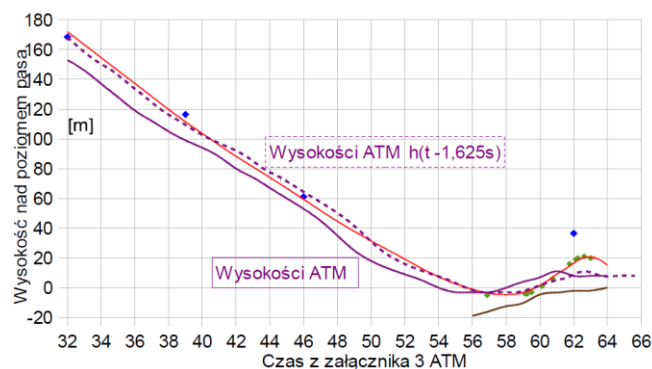
Niemniej podejścia takiego można bronić, jeżeli weźmie się pod uwagę, iż oparte jest ono nie tyle o dokładne odczyty z przyspieszeniomierzy co o interpolację danych dyskretnych przy pomocy pewnej krzywej $a(t)$, opisującej proces o zbliżonym przebiegu czasowym. Można w ten sposób uzyskać jakościową analizę toru poruszającego się obiektu i stwierdzić czy jest szansa, by przechodził on w rozsądnej odległości od ustalonych punktów – w wypadku katastrofy smoleńskiej chodzi o punkty TAWS i ślady na roślinności. Szczegółowa analiza przyspieszeń liniowych i kątowych [5] pokazuje, iż przebieg przyspieszeń znany z raportów MAK i KBWLLP wydaje się pozostawać w sprzeczności z trajektorią przebiegającą równocześnie przez wszystkie te punkty. Interesujące byłoby więc jawne porównanie powyższych obliczeń z trajektorią odtworzoną na podstawie danych uzyskanych bezpośrednio z rejestratora ATM QAR. Niestety, znany jest tylko wynik końcowy analizy przeprowadzonej przez ATM, a nie ma dostępu do samego algorytmu użytego do jej przeprowadzenia. Brak jest również danych wejściowych. Podkreślmy, iż nawet analiza oparta o dane z rejestratora obarczona jest pewną nieoznaczonością, co w sposób zasadniczy wpływa na rekonstrukcję przebiegu katastrofy pod Smoleńskiem, jak zobaczymy później. Dodajmy wreszcie, iż radykalna teza, że dane z czarnych skrzynek pozwalają na wyeliminowanie takiego czy innego scenariusza katastrofy, oparta jest o założenie, iż zapisane parametry wiernie oddają przebieg wydarzeń. Dyskusja

wokół symulacji autorstwa P. Artymowicza¹, również opartej o pewien konkretny matematyczny model funkcji $a(t)$, sugeruje dużą wrażliwość przebiegu trajektorii na dokładną postać $a(t)$.



Rys. 1. Krzywa będąca źródłem danych do obliczenia trajektorii pionowej. Szary fragment na czerwonej linii oznacza brak danych.

Na Rys. 2 pokazuję trajektorię pionową odtworzoną przez ATM i wyrysowaną względem punktów TAWS, pochodzącą z analizy M. Jaworskiego [5]. Jak widać, krzywa ta nie przechodzi przez punkty TAWS i jej minimum przypada zbyt wcześnie. W celu poprawienia zgodności z TAWS 35-37 oraz śladami na drzewach i krzakach przesunięto ją w prawo o 1,625 s. Uzyskano dobrą zgodność z TAWS 35-37 oraz śladami na wschód od brzozy. Natomiast za brzożą trajektorria przebiega zaskakująco nisko, dużo niżej niż trajektorria M. Jaworskiego, nie mówiąc o punkcie TAWS 38, gdzie zgodność jest jeszcze gorsza niż w wypadku krzywej uzyskanej z podwójnego całkowania przyspieszeń pionowych.



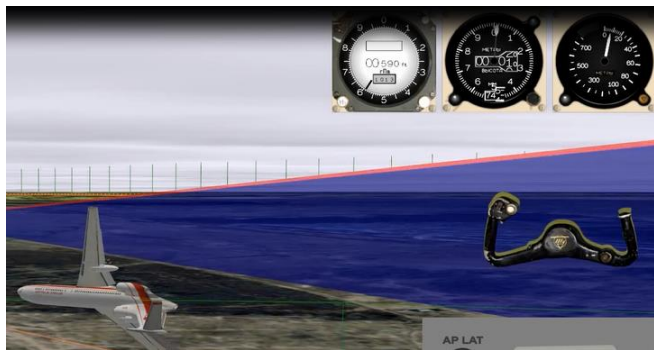
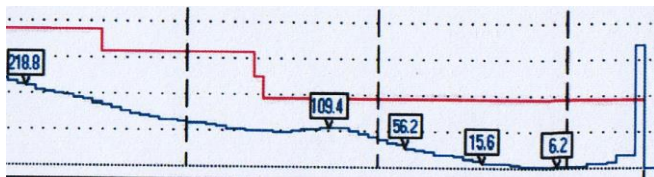
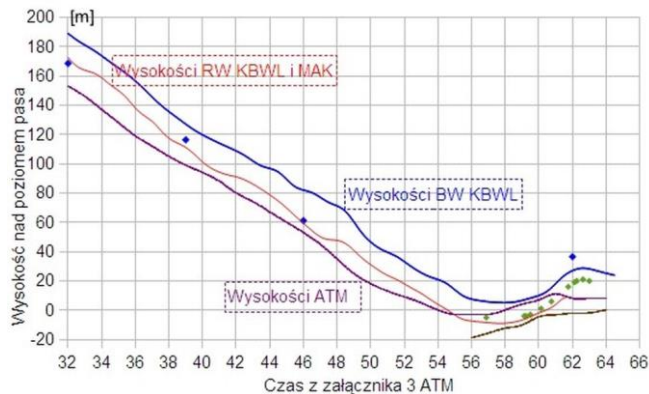
Rys. 2. Trzy trajektorie zestawione w [5] przez M. Jaworskiego. Czerwona linia jest wykresem uzyskanym z całkowania przyspieszeń. Punkty zielone to ślady na roślinności, niebieskie kwadraty oznaczają wysokości zapisane w punktach TAWS 35-38. Fioletowa ciągła linia to trajektorria wg Załącznika 3 do ekspertyzy ATM. Linia przerywana jest tym samym wykresem, lecz przesuniętym w prawo o 1,625 s.

W dalszej części niniejszych rozważań zacytuję szczegółowo opis procedury przyjętej przez ATM przy odtwarzaniu trajektorii. Jak zobaczymy, trudno jest na jego podstawie zrozumieć, co autorzy analizy mieli na myśli

¹ P. Artymowicz, wykład na konferencji Mechanics in Aviation, 28-31.05.2012 r. <http://fizyka-smolenska.salon24.pl/421696,24-beczka-smolenska-ii-mechanics-in-aviation-28-31-maja-2012>. Krytyczna dyskusja użytego algorytmu <http://tommy.lee.salon24.pl/431610,bledy-w-programie-you-know-who>. Niestety, interesująca wymiana zdań między autorem algorytmu a jego krytykami, znajdująca się pod powyższym wpisem, nie została dokończona.

wyznaczając „wysokość samolotu” – czy był to punkt najniższy (czyli okolice ogona), czy środek masy, czy miejsce lokalizacji wysokościomierzy barometrycznych lub radiowych. Jest to istotne dla porównania trajektorii ze śladami na roślinności i ziemi. Ponadto, jak wynika z opisu w ekspertyzie ATM, trajektoria nie była dopasowywana do wszystkich śladów pozostawionych przez samolot – w szczególności nie dopasowywano jej do śladów na zachód od działki Bodina – zadowolono się ostatnim odczytem urządzenia FMS, pierwszą przyciętą brzożką i punktem na brzozie, który uznano za miejsce utraty skrzydła.

Analizę ATM należałoby zatem powtórzyć w oparciu o dane z rejestratora QAR.



Rys. 3. Wizualizacja KBWLLP jako źródło danych do analiz. Wysokościomierz radiowy (pierwszy od prawej) pokazuje wysokość mniejszą niż 10 m, pomimo przechylenia samolotu na grzbiet. W środku, wykresy z QAR (czerwona linia to wysokość barometryczna, niebieska to wysokość radiowa). Rzeczywiste dane z rejestratora ATM QAR wskazują, w tej fazie lotu, wysokość radiową ponad 300 m. Wysokość barometryczna dana jest przez pojedynczą liczbę w całej końcowej fazie lotu. U góry, zestawione przez M. Jaworskiego dostępne źródła danych: wysokości radiowe z raportów, trajektoria pionowa ATM, wysokości barometryczne z wizualizacji, odczyty TAWS i ślady na roślinności.

2.2. Wysokości barometryczne z wizualizacji KBWLLP

Na posiedzeniu Zespołu Parlamentarnego w dniu 27.06.2012 r. K. Nowaczyk przedstawił analizę wysokości barometrycznej odczytanej z wizualizacji będącej załącznikiem do raportu KBWLLP. Dane, pokazane na wysokościomierzach, nie pochodzą z rejestratora ATM

QAR, gdyż zapisuje je on z dokładnością ok. 60 m [6]. W rezultacie, w całym interesującym nas rejonie opisane są one przez tę samą pojedynczą liczbę (Rys. 3). Dodajmy, iż parametry zapisane w tzw. rosyjskich czarnych skrzynkach były bardzo silnie zniekształcone [6]. Hipoteza, iż KBWLLP użyła w wizualizacji rzeczywistych danych, jest trudna do obrony również z innych względów.

Podstawową wątpliwość budzą pokazane w tym materiale odczyty wysokościomierza radiowego. Z danych rejestratora ATM QAR wiemy, iż za brzożką wysokość radiowa systematycznie rosła, przekraczając w ostatnim zapisanym punkcie 300 m (Rys. 3). Zapis taki świadczy o bardzo dużym kącie przechylenia samolotu w chwili ostatniego zapisu. Natomiast na wizualizacji widzimy, w rejonie za brzożką, maksymalną wysokość radiową ok. 20 m, przy czym wysokości mniejsze od 20 m wykazywane są w czasie, gdy kąt przechylenia samolotu znacznie przekracza 90°. Stanowi to bezpośredni dowód na nierzeczywistość pokazywanych w wizualizacji odczytów wysokościomierza radiowego. Nie ma zatem najmniejszych podstaw, by nadawać jakkolwiek stopień wiarygodności „odczytom” pozostałych dwóch wysokościomierzy.

3. KTÓRA CZĘŚĆ SKRZYDŁA MOGŁA UDERZYĆ W BRZOZĘ?

Istnieje kilka standardowych podejść do problemu określenia miejsca, w którym skrzydło zostało uderzone przez drzewo. Każde z nich rodzi problemy, które wymagają dalszych badań.

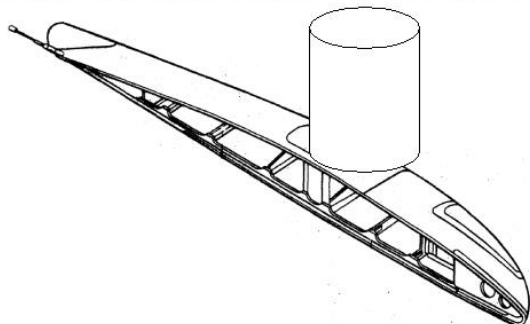
3.1. Raport KBWLLP – 10,8 m od osi kadłuba

Wg raportu KBWLLP [7], w momencie zderzenia z brzożką konstrukcja samolotu została uderzona w odległości 10,8 m od jego osi pionowej. Tak wyznaczony punkt uderzenia w skrzydło oddalony jest od miejsca jego ułamania o ok. 2,9 m [8] i przesunięty jest w stronę kadłuba. Wynika stąd, iż po przecięciu brzozy – i nawet utracie końcówki skrzydła – samolot musiałby się poruszać w stronę pasa drzew rosnących przed ul. Gubienko (ok. 50 m za brzożką) z kikutem skrzydła sięgającym o 2,9 m dalej w lewo, niż to przyjmowano w praktycznie wszystkich analizach opartych o stan zniszczeń tych drzew. Raport KBWLLP w żaden sposób nie komentuje powyższej niespójności.

3.2. Problem niezniszczonego slotu

Próba utożsamienia miejsca uderzenia bezpośrednio z miejscem odłamania skrzydła natrafia na inną, często przywoływaną trudność. Mianowicie, końcówka sekcji nr 4 slotu (najbliższego końcówki skrzydła), wystająca poza krawędź złamania skrzydła, nie wykazuje śladów zderzenia z przeszkodą. Tak więc slot nie został rozerwany, pomimo lokalizacji bezpośrednio przed rozdartą częścią skrzydła. Fakt ten bywa interpretowany jako dowód, że skrzydło nie zostało zniszczone na skutek uderzenia od przodu. Mimo to, biorąc pod uwagę iż sloty były wysunięte, a więc znajdowały się niżej niż przednia krawędź skrzydła, można by ewentualnie rozważyć wariant wepchnięcia sekcji nr 3 pod skrzydło na skutek uderzenia przez drzewo. Mogłoby wtedy nastąpić rozerwanie sekcji 3 i 4 w miejscu ich łączenia. Opcję taką należałoby przebadać numerycznie, gdyż dotychczasowe symulacje istnienie slotów w ogóle pomijają. Podkreślimy jednak, iż koncepcja, której bronię w

niniejszym artykule, zakłada, iż uderzenie w ogóle nie nastąpiło w slot, lecz w opływ końcówki skrzydła. Jeżeli jest ona prawdziwa, to kwestia zniszczenia slotu staje się bezprzedmiotowa.



Rys. 4. Zniszczenie przedniej części opływu na lewej końcówce skrzydła. Strzałki pokazują kierunek oświetlenia. Walec odpowiada pnium o średnicy 30-40 cm. Kończówka skrzydła mogła jedynie częściowo naciąć pień od strony północno-wschodniej.

3.3. Symulacje numeryczne i testy niszczące z lat 1963-65

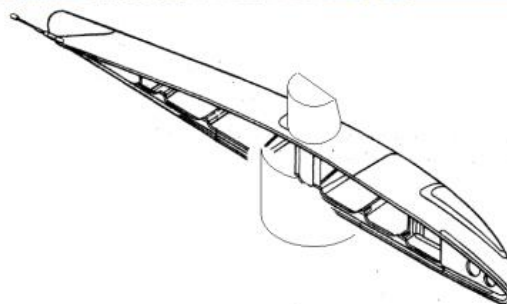
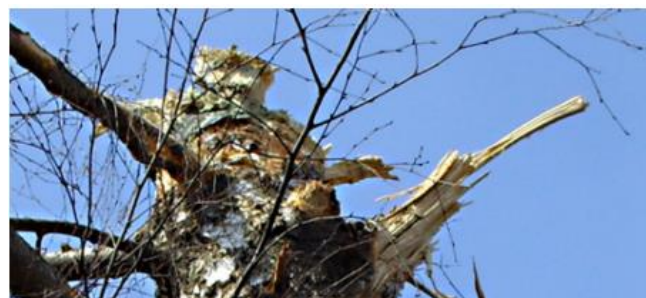
Wszystkie dotychczasowe symulacje numeryczne sugerują, że pierwszy dźwigar skrzydła powinien wytrzymać zderzenie z brzozą [9]. Co prawda, symulacje te nie były oparte o realistyczne dane dotyczące skrzydła Tu-154M i dlatego postulowano przebadanie wraku i przeprowadzenie dokładnych badań bliźniaczego samolotu o numerze bocznym 102 [10,11]. Jednakże, nawet w znanym przypadku końcówki skrzydła samolotu Douglas DC-7, odpadającej po uderzeniu w słup telegraficzny [12], słup ten – wbrew obiegowej opinii – nie był w stanie ściąć dźwigara skrzydła (fragment słupa pozostaje w skrzydle w miejscu lokalizacji dźwigara). Stało się tak, pomimo iż skrzydło DC-7 jest słabsze od skrzydła Tu-154M, a słup był twardszy niż brzoza. Interesująca w tym kontekście jest uwaga C. Cieszewskiego [13], że brzoza musiała być w miejscu uderzenia osłabiona przez liczne gałęzie wyrastające z pnia (co odpowiada przypadkowi drewna „z sękami”, a więc słabszego niż przypadki skatalogowane w literaturze). Przyjmując roboczo, iż dotychczasowe wyniki W. Biniendy pozostaną słuszne po uwzględnieniu danych w pełni realistycznych, zakładam, że podstawowym efektem zderzenia skrzydła Tu-154M z brzozą powinno być jedynie zniszczenie poszycia skrzydła na krawędzi natarcia, sięgające co najwyżej do pierwszego dźwigara. Teza, której bronię w niniejszym artykule, implikuje, iż dźwigary skrzydła w ogóle nie miały w czasie zderzenia kontaktu z drzewem.

4. UDERZENIE OPLYWEM KOŃCÓWKI SKRZYDŁA

4.1. Ślady na lewym skrzydle i pnium brzozy

Przyjrzyjmy się teraz śladom po zderzeniu z przeszkodą, znajdującym się na znalezionej na miejscu katastrofy końcówce lewego skrzydła. Opływ końcówki jest

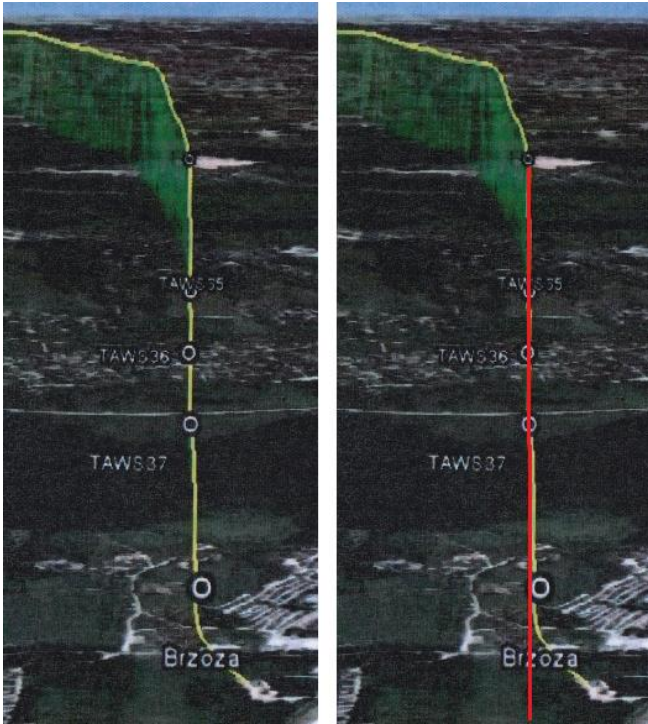
całkowicie zniszczony na długości ok. 1 m i niemal na całej jego szerokości (ok. 25 cm w stronę kadłuba, licząc od końca skrzydła (Rys. 4). Najwyższa część ułamanego pnia brzozy (Rys. 5, górna fotografia) ma kształt zgodny ze sposobem zniszczenia końcówki skrzydła (Rys. 5, dolna fotografia). Dane na temat średnicy pnia nieznacznie różnią się w zależności od źródła (30-40 cm wg raportu KBWLLP, 44 cm wg pomiarów wykonanych przez autorów książki [1]), ale tak czy inaczej najwyższy i najwyżej położony fragment zachowanego pnia (Rys. 5) odpowiada rozmiarami wgnieceniu widocznemu na dolnym zdjęciu z Rys. 5.



Rys. 5. Kształt zniszczenia opływu jest zgodny z postacią nadciętego i złamanego pnia brzozy (widok od strony wschodniej).

4.2. Trajektoria odtworzona przez ATM

Istotną przesłankę, przemawiającą za uderzeniem w brzozę samym końcem skrzydła, stanowi kształt trajektorii wygenerowanej przez firmę ATM na podstawie danych zapisanych w rejestratorze QAR [6]. W ekspertyzie czytamy: „System rejestracji MSRP-64 nie rejestruje położenia samolotu, np. z odbiornika GPS, dlatego by odtworzyć trajektorię lotu, wyliczono ją na podstawie dostępnej informacji. Zastosowaną metodą jest obliczenie, co sekundę lotu, kolejnego punktu położenia poprzez dodanie do poprzedniego punktu odległości pokonanej przez samolot, wyliczonej z zarejestrowanej prędkości przyrządowej VPRZ, w kierunku zgodnym z zarejestrowanym kursem magnetycznym KURSMAGN, z uwzględnieniem deklinacji. Ta metoda obciążona jest błędem przeliczeń, dokładnością rejestracji parametrów oraz brakiem uwzględnienia wiatru – parametr VPRZ pokazuje prędkość względem powietrza, a nie ziemi, a ponadto, przy bocznym wietrze, rzeczywisty kurs lotu jest wypadkową wektora prędkości samolotu i wiatru. Dlatego trajektorię obliczono od punktu położenia samolotu w chwili katastrofy



Rys. 6. Trajektoria odtworzona przez ATM, widziana od strony lotniska. Za punktem TAWS 37 jest ona przesunięta w kierunku brzozy o grubość czerwonej linii. Grubość tę można oszacować przez porównanie z szerokością drogi biegnącej w kierunku wschodnim na północ od brzozy (Rys. 7).



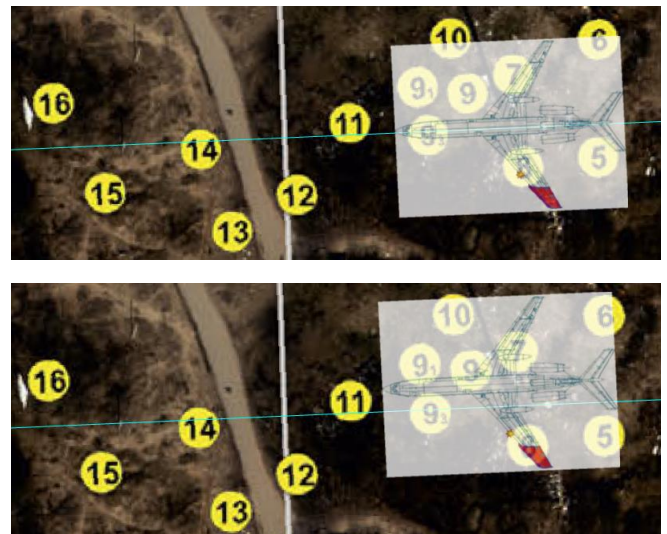
Rys. 7. W czerwonym prostokącie urwana końcówka lewego skrzydła. Jej długość jest porównywalna z szerokością drogi znajdującej się w górnej części zdjęcia, a więc jest tego samego rzędu co szerokość czerwonej linii na Rys. 6. Stąd wniosek, iż w ekspertyzie ATM trajektorię przesunięto w stronę brzozy (punkt B2) na odległość rzędu długości urwanej końcówki skrzydła.

wstecz i dodano współczynniki korekcji wiatru. Współczynniki te to współczynnik korekcji kursu, który dodany do parametru KURSMAGN pozwala wyliczyć rzeczywisty kurs lotu, i współczynnik prędkości, który dodany do parametru VPRZ, daje prędkość lotu względem ziemi. Brak jest wystarczających danych dotyczących wiatru, z jakim poruszał się samolot, dlatego współczynniki korekcji dobrano tak, by trajektoria przechodziła przez wszystkie punkty geograficzne trajektorii lotu, znane z innych źródeł” ([6], str. 17).

W raporcie KBWLLP ([14], str. 191) czytamy, że wiatr wiał z kierunku 110°-170°, a więc z lewej strony samolotu.

Rekonstrukcja ATM uwzględniła punkty TAWS 34-38, ostatnią pozycję zapisaną w urządzeniu FMS, pierwszą przyciętą brzozę i „brzozę, która uszkodziła skrzydło”. Z ilustracji na str. 20 ekspertyzy ATM wynika, iż samolot ustawiono względem brzozy tak, aby pień trafił w punkt odłamania skrzydła.

Na Rys. 2 przedstawiony został wykres trajektorii pionowej samolotu, pochodzący z Załącznika 3 do ekspertyzy ATM. Po przesunięciu w prawo o 1,625 s widzimy zadowalającą zgodność z punktami TAWS 35-37 oraz dwiema brzozami uwzględnionymi przy dopasowywaniu trajektorii do śladów na roślinności. Natomiast na zachód od brzozy na działce N. J. Bodina zgodność ze śladami i kolejnym punktem TAWS 38 jest bardzo zła. Ponadto, nie jest jasne, czemu wykres wymaga przesunięcia w prawo.

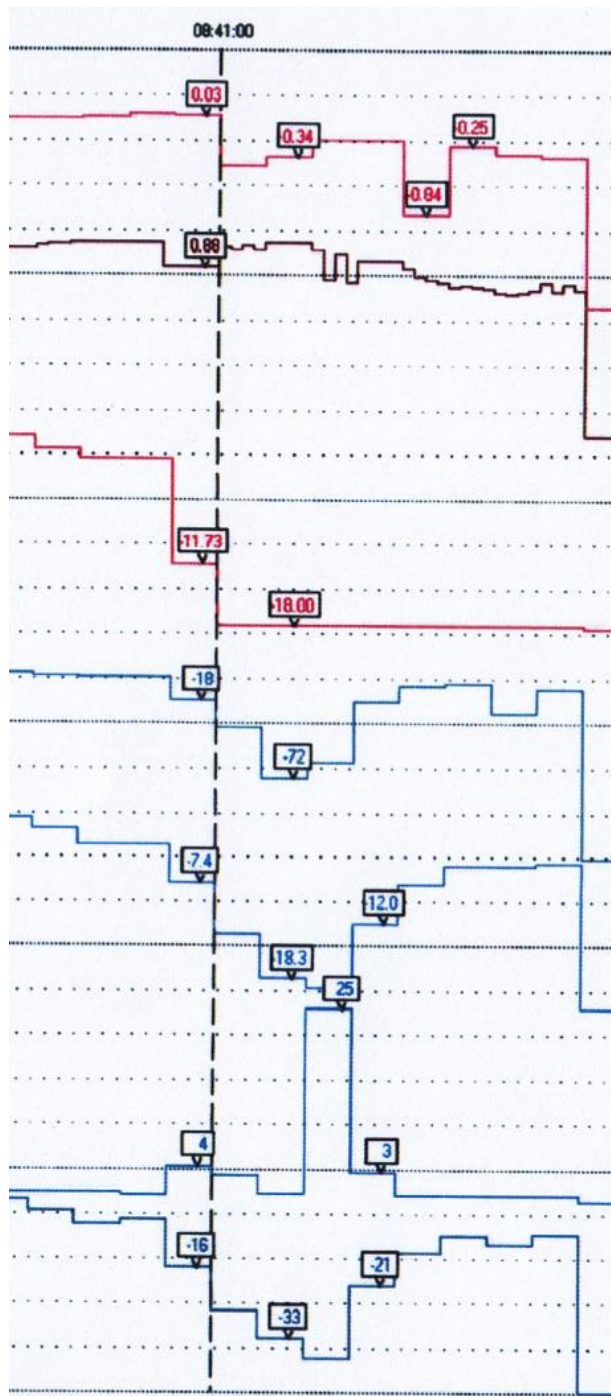


Rys. 8. Rozrzut części samolotu wg raportu MAK. Punkty 9-13 oznaczają fragmenty lewego skrzydła. Punkty 5-7 odpowiadają przyciętym drzewom, 8 oznacza brzozę. Na górnym rysunku samolot uderza w pień brzozy skrzydłem w miejscu odłamania jego końcówki (trajektoria MAK). Na dolnym – opływem końcówki lewego skrzydła (zarys samolotu z [8]).

Szczególnie interesujący, z naszego punktu widzenia, jest wykres trajektorii widziany od strony lotniska (Rys. 6). Widać wyraźnie, iż punkty TAWS 34-37 układają się w jedną linię, skierowaną równoległe do pasa startowego. Za punktem TAWS 37 trajektoria odchyła się na południe (pod wiatr), jeszcze bardziej oddalając się od osi pasa. Pamiętajmy, iż ATM odtwarzał trajektorię, zaczynając od punktu ostatniego zapisu FMS i cofając się w kierunku przeciwnym do kierunku lotu samolotu. W związku z narastającym błędem była ona korygowana względem punktów TAWS 38 i położenia brzozy. Jak widać, tak poprowadzona trajektoria nie trafia dokładnie w punkt TAWS 37, lecz mija go o – mniej więcej – grubość linii, którą ją wyrysowano, w kierunku południowym. Żeby przeprowadzić trajektorię przez TAWS 37, musiano ją przesunąć. Przesunięcie to jest porównywalne z szerokością drogi biegnącej w kierunku wschodnim na północ od brzozy.

Na Rys. 7 pokazują fragment zdjęcia satelitarne [15], ukazującego interesujący nas rejon katastrofy. Szerokość wspomnianej drogi może być porównana z rozmiarem końcówki lewego skrzydła (zapewne nie leży ono równoległe do ziemi, por. Rys. 5). Widać, iż są to wielkości

tego samego rzędu. Korekta nie byłaby wymagana, gdyby samolot dotykał do brzozy końcem lewego skrzydła, a nie miejscem jego odłamania. Podkreślmy, iż samolot został przesunięty przez ATM *pod wiatr*, co jeszcze bardziej oddaliło go od osi pasa lotniska.



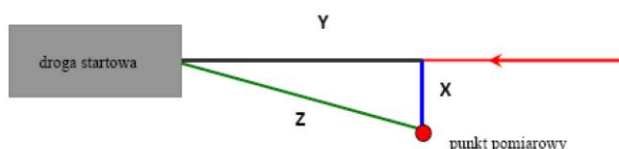
Rys. 9. Zapisy rejestratora QAR. Od góry: przeciężenie poprzeczne, przeciężenie pionowe, prędkość kątowna, obróty, lotka prawa, interceptor lotki lewej, interceptor lotki prawej. 2 s po uderzeniu w brzozę interceptor lotki lewej nie wykazuje już żadnych zmian parametru określającego jego wychylenie.

4.3. Ślady na roślinności przed i za brzożą

Ostatnim elementem, który warto omówić, jest lokalizacja innych przyciętych drzew w okolicy brzoży oraz rozrzuconych tam części samolotu. Rys. 8 pokazuje ich lokalizację wg raportu MAK ([16], schemat samolotu wg [8]). Na górnej ilustracji samolot umieszczony jest w

zwyczajowy sposób, tzn. miejsce ułamania skrzydła pokrywa się z lokalizacją pnia brzoży. Na dolnej ilustracji samolot dotyka pnia czubkiem skrzydła. Jak widać, przesunięcie samolotu w kierunku północnym o długość oderwanej końcówki nie pogorszyło zgodności z innymi dostępnymi danymi. Przy okazji warto zwrócić uwagę na interesującą rozbieżność między raportami KBWLLP i MAK, a danymi na temat przyciętych krzewów i drzew pochodzących z interaktywnej mapy satelitarnej rejonu katastrofy opracowanej przez autorów książki [1]. Mianowicie, wg MAK (16), Tabela 1 na str. 83) i KBWLLP ([14], Tabela 1 na str. 66) na wschód od brzoży samolot nie zostawił żadnego śladu na roślinności, który byłby wysunięty bardziej na południe, czyli w lewo od osi pasa, niż pień brzoży. Natomiast autorzy książki [1] na podstawie własnych obserwacji i pomiarów przeprowadzonych kilka miesięcy po katastrofie, opisali „krzaki ze śladami cięć końcówką lewego skrzydła, cięcie na wysokości 2,85 metra poniżej miejsca złamania brzoży na działce Bodina” (punkt o współrzędnych N 54,824948, E 32,057656, wysunięty na południe w stosunku do brzoży i oddalony od niej ok. 30 m w kierunku wschodnim). Krzaki te mogłyby być ścięte przez skrzydło jedynie w wypadku gdyby punkt uderzenia w pień pokrywał się z miejscem złamania skrzydła albo znajdował się jeszcze bliżej kadłuba, co przeczyłoby hipotezie, którą sformułowałem. Wydaje się jednak mało prawdopodobne, by tak istotny szczegół, pozwalający określić jak daleko od osi pasa znajdował się samolot, umknął uwagi obu komisji – choć należy to rozstrzygnąć na podstawie dokumentacji fotograficznej z 10 kwietnia 2010 r.

Lp.	Punkt	N	E	H	Z	X	Y	P
-	-	stopnie	stopnie	metry	metry	metry	metry	metry
1	Pierwsza przycięta brzoza	54°49'31,21"	32°3'39,20"	239	1099	-39	1098	10
2	Pierwsza kepa młodych brzożek	54°49'30,34"	32°3'29,84"	246	932	-59	929	4
3	Druga kepa młodych brzożek	54°49'30,43"	32°3'29,11"	246	919	-54	917	4
4	Brzożki i młode topole	54°49'30,07"	32°3'28,09"	247	901	-64	899	4
5	Brzoza – utrata fragmentu lewego skrzydła	54°49'30,01"	32°3'25,51"	250	855	-63	853	5,1



Rys. 10. U góry fragment Tabeli 1 z raportu KBWLLP. Oznaczenia współrzędnych wyjaśnione są poniżej. W dolnej części rysunku widzimy trzy charakterystyczne punkty na trajektorii samolotu. W chwili 06:41:02,8 samolot zawadza o brzozę. Pomiędzy 06:40:55 i 06:40:57,5 trajektoria zbliża się do osi pasa o ok. 5 m.

W Tabeli 1 na str. 66 raportu KBWLLP zwraca uwagę jeszcze jeden szczegół. Chodzi o porównanie punktów 4 i 5 (Rys. 10). Szerokość geograficzna brzozy jest, jak widać, rzeczywiście najmniejsza, natomiast odległość punktu 4 od osi pasa jest o metr większa, niż w punkcie 5. Odległość Y (por. Rys. 10) pomiędzy punktami 4 i 5 wynosi 46 m. Pojawia się więc naturalne pytanie, czy fakt przycięcia „brzózek i młodych topoli” w odległości o metr większej – licząc od osi pasa – niż pień brzozy nie oznacza, iż skrzydło sięgało w lewo dalej, niż wymagałaby tego możliwość zawadzenia o pień samym jego czubkiem. Odpowiedź wymaga znajomości kąta nachylenia trajektorii samolotu względem osi lotniska. Daje się to oszacować na podstawie Załącznika 1.1 do raportu KBWLLP. W dolnej części Rys. 10 zamieszczam fragment stosownej ilustracji z tegoż załącznika. Widzimy, iż trajektoria zbliża się do osi pasa o 5 m w ciągu 2,5 s. Samolot przebywa w tym czasie 193 m w kierunku Y, co daje prędkość względem ziemi 77 m/s. Przyjmując, iż kąt nachylenia trajektorii względem osi lotniska nie uległ zasadniczej zmianie w ciągu kolejnych 5 s, znajdujemy, że na odcinku Y o długości 46 m trajektoria powinna się przybliżyć do osi pasa o ok. 1,2 m, co dobrze zgadza się z odległością X pomiędzy punktami 4 i 5.

5. KIEDY I GDZIE ODPADŁA KOŃCÓWKA SKRZYDŁA?

Zadajmy sobie wreszcie pytanie o czas i miejsce odpadnięcia końcówki skrzydła. Samo uderzenie opływem końca skrzydła nie mogło doprowadzić do oderwania skrzydła, gdyż dźwigary nie mają wtedy bezpośredniego kontaktu z pniem, a sam opływ jest konstrukcją dość delikatną.

Ekspertyza ATM wyjaśnia procedurę określającą moment zderzenia z brzozą następująco (por. Rys. 9): „Na wykresie widać o 08:40:59,5 wzrost do 4 wartości wychylenia interseptora lotki lewej (INTLOTKAL). Jest to niemożliwe przy prawidłowej pracy mechaniki skrzydeł, ponieważ (...) w tym czasie wychylony jest interseptor lotki prawej zgodnie z wychyleniem lotki i obrotem wolantu. Taka wartość INTLOTKAL może być skutkiem uszkodzenia lewego skrzydła. Potwierdza to gwałtowny wzrost prędkości przechylenia(...). Skok wartości parametru INTLOTKAL do wartości 25 o 08:41:01 może świadczyć, iż w tym momencie nastąpiło oderwanie fragmentu skrzydła” ([6], str. 22). Rys. 9 pokazuje stosowny fragment zapisu rejestratora QAR. Z wyjątkiem przeciążeń pionowych, próbkowanych co 1/8 s, krok czasowy na pozostałych wykresach wynosi 0,5 s. Wszystkie parametry wykazują skok na 0,5 s przed pionową przerywaną linią, wskazującą 08:41:00 czasu FDR. O 08:41:01 obserwuje się skok wychylenia interseptora lewej lotki, połączony z dwoma wstrząsami skierowanymi w dół na wykresie przeciążenia pionowego. Moment ten interpretowany jest w ekspertyzie jako chwila oderwania fragmentu skrzydła. Po kolejnych 0,5 s lewy interseptor nie wykazuje już żadnych zmian. Nie jest jasne, gdzie znajduje się „szara strefa”, czyli półsekundowy brak danych widoczny na wykresie z raportu MAK (Rys. 1).

5.1. Skale czasowe w znanych mechanizmach odpadania fragmentu skrzydła

Czas trwania procesu odpadania skrzydła zależy od mechanizmu odpowiedzialnego za ten proces. Samolot

Lockheed Hercules C-130 [17] utracił końcówkę skrzydła na skutek efektu zmęczeniowego wywołanego przez opory powietrza. Ugięcie spowodowane było przez silny wstrząs i następujące po nim drgania. Od momentu uderzenia w kadłub do chwili odpadnięcia skrzydła upłynęło ok. 1,5 s. Czas, liczony od momentu wychylenia skrzydła w górę do chwili jego urwania na skutek zmęczenia materiału, to ok. 1 s. Skale czasowe obu procesów są porównywalne z odstępem czasowym widocznym na wykresach z Rys. 9. W wypadku testu niszczącego samolotu Douglas DC-7 [12], proces ukłęcia skrzydła przez siły oporu, występujące po zderzeniu ze słupem, jest rzędu 1/3 s, a więc jest praktycznie natychmiastowy z punktu widzenia rozdzielczości czasowej rejestratora QAR. Prędkość przyrzadowa samolotu w chwili uderzenia w brzozę wynosiła 77 m/s [14], co daje prędkość względem ziemi ok. 75 m/s. Odległość między brzozą a pasem drzew przy ul. Gubienko (ok. 50 m) powoduje, iż samolot ścinał je w chwili odpowiadającej pierwszym lub drugim słupkom za przerywaną pionową linią na Rys. 9. Zakładając hipotezę uderzenia w drzewo opływem końcówki skrzydła musimy przyjąć, iż ślady na drzewach przy ul. Gubienko spowodowane były całością skrzydła samolotu, a nie kikutem skróconym o ok. 5 m. Jest prawdopodobne, iż w czasie ścinania tych drzew końcówka skrzydła nie była jeszcze oderwana, choć mogła być mocno odchylna w górę na skutek zderzenia z brzozą i oporów powietrza. Skok wychylenia interseptora zarejestrowany został ok. 1,5 s po uderzeniu w brzozę. Ponieważ końcówkę skrzydła znaleziono 111 m za brzozą, co odpowiada właśnie 1,5 s ruchu z prędkością 75 m/s, oznaczałoby to, iż upadła ona na ziemię praktycznie pionowo w dół (z odchyleniem na północ). Pamiętajmy jednak, iż analizując lot końcówki należałoby uwzględnić fakt, że przed uderzeniem w ziemię mogła się ona dostać w strumień gazów wylotowych z silników. Mechanizm może być podobny do tego, który sprawił, iż fragment poszycia lewego skrzydła, oznaczony jako „10” na Rys. 8, znaleziono tak daleko na prawo od osi samolotu, lecz ok. 10 m za brzozą, licząc wzdłuż trajektorii. Dodajmy wreszcie, iż w powyższym scenariuszu skrzydło równie dobrze mogłoby nie odpaść na skutek drgań wywołanych uderzeniem w pień brzozy, lecz z jakiegoś innego powodu, np. eksplozji paliwa w lewym skrzydle [18]. Jak wykazywałem w swym wystąpieniu na konferencji, odpadnięcie końcówki skrzydła 1,5 s po uderzeniu w brzozę jest niespójne z trajektorią podaną przez MAK i KBWLLP. Rzeczywiście, w takim wypadku ślady cięcia przez skrzydło widoczne byłyby na dwóch dużych drzewach znajdujących się ok. 30 m na zachód od brzozy, a śladów takich brak

6. CZY HIPOTEZA JEST FALSYFIKOWALNA?

Zastanówmy się, czy moja hipoteza ma szansę na rozstrzygnięcie ścisłymi metodami, czy też musi pozostać w sferze czystych spekulacji.

6.1. Przebarwienia na pniu

Uderzenie w pień brzozy opływem końcówki lewego skrzydła powinno pozostawić na drzewie ślady czerwonej farby, których by nie było w przypadku uderzenia przez inną część skrzydła. Na Rys. 11 widzimy zdjęcie z raportu MAK, pokazujące przewróconą część pnia.

Na fotografii o dużej rozdzielczości, wykonanej przez polskich ekspertów w dniu 11.04.2010 r. i udostępnionej

przez MON², czerwone ślady są wyraźnie widoczne również w tych częściach pnia, w których na zdjęciu z raportu MAK trudno się ich dopatrzeć (Rys. 12). Na wbitych częściach



Rys. 11. Górne trzy obrazy to różne wersje tej samej fotografii, wykonanej najpóźniej 12.04.2010 r. i pochodzącej z raportu MAK. Dwie środkowe wersje przedstawione są przy zmniejszonym kontraście i zwiększonym nasyceniu. Widać, iż czerwone punkty występują jedynie w strefie cienia, co sugeruje, iż jest to artefakt biorący się ze sposobu kodowania kolorów. Na dolnej fotografii, wykonanej 11.04.2010 r. przez polskich ekspertów, czerwone ślady są jednak wyraźnie widoczne.

² Jest to fragment jednego z dwóch zdjęć brzozy, które stanowiły załącznik do odpowiedzi Ministerstwa Obrony Narodowej na interpelację poseł. J. Szczypińskiej. W piśmie sekretarza stanu Cz. Mrocza do marszałek E. Kopacz, z dnia 31.10.2012 r., czytamy: „(...)w przechowywanej w Inspektoracie Ministerstwa Obrony Narodowej do Spraw Bezpieczeństwa Lotów dokumentacji z badania katastrofy znajdują się dwa zdjęcia brzozy, wykonane w dniu 11 kwietnia 2010 r. przez członków Komisji Badania Wypadków Lotniczych Lotnictwa Państwowego, których kopie przedkładałam w załączeniu – w celu udostępnienia Pani Poseł Jolancie Szczypińskiej.”

metalowych śladów farby – ani czerwonej, ani białej – nie widać. Zatem, nie są to elementy poszycia.

Zdjęcia udostępnione przez MON zostały wykonane pod wieczór, co wynika z barwy i kierunku oświetlenia. Na fotografiach widzimy zarówno wbite części metalu jak i czerwone przebarwienia na drewnie. Zdjęcie z raportu MAK pokazuje białe fragmenty metalu, lecz czerwone przebarwienia jakby znikły z wyjątkiem obszarów znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie metalowych części (Rys. 11). Na Rys. 13 pokazuję fragmenty fotografii wykonanej 13.04.2010 r. Nie ma tam już ani metalowych części, ani czerwonych przebarwień. W okolicy wierzchołka stojącego pionowo kikuta brzozy nie ma fragmentów kory, którą widać na zdjęciu MAK. Górna część pnia na zdjęciu z 13.04. została ociosana w sposób sugerujący podobne zniszczenia pnia zarówno z prawej jak i lewej jego strony, co kontrastuje z fotografią z raportu MAK, gdzie zniszczenia wydają się większe z prawej strony pnia. Sądząc z kierunku cienia, zdjęcie wykonano o wcześniejszej godzinie niż zdjęcie MAK. Tak więc fotografia MAK musiała być wykonana 12.04.2010 r.

Niestety, jak widać, części drewna zabarwione na czerwono zostały z pnia wstępnie usunięte już dzień po katastrofie, a definitywnie znikły 13.04.2010 r. Pozostaje jeszcze możliwość, że fotografia z raportu MAK została obrobiona komputerowo, w celu usunięcia czerwonych śladów. W takim przypadku mogłyby pochodzić nawet sprzed 12.04.2010 r. S. Amielin, autor wielu fotografii z rejonu katastrofy, pierwsze zdjęcia z obszaru działki Bodina wykonał 13.04.2010 [20].



Rys. 12. Zbliżenie fragmentu brzozy. Wg informacji MON, fotografia wykonana została przez polskich ekspertów w dniu 11.04.2010 r.

6.2. Krzaki przycięte na wschód od brzozy

Na Rys. 15 widzimy fragment interaktywnej mapy miejsca katastrofy, przygotowanej przez autorów książki [1]. Zaznaczony punkt nie występuje w raportach MAK i KBWLLP. Gdyby rzeczywiście został on przeoczony przez obie komisje, byłby to dowód nieprawdziwości mojej hipotezy. Będąc oddalony w kierunku południowym bardziej niż pień brzozy, byłby poza zasięgiem skrzydła. Najprawdopodobniej pierwszym źródłem wskazującym na istnienie ściąg wspomnianych krzaków jest relacja S. Amielina. Jak wyjaśnia on w swej książce [20], do dnia 13.04.2010 r. teren działki Bodina był odcięty przez rosyjskie służby, które zabraniały wykonywania jakichkolwiek fotografii. Natomiast od 13.04.2010 r. nie ograniczano osobom postronnym dostępu do terenu katastrofy. Wtedy to co najmniej trzy osoby, niezależnie od siebie, wykonały zdjęcia przyciętych krzaków. Jeszcze tego samego dnia zostały one umieszczone w internecie.

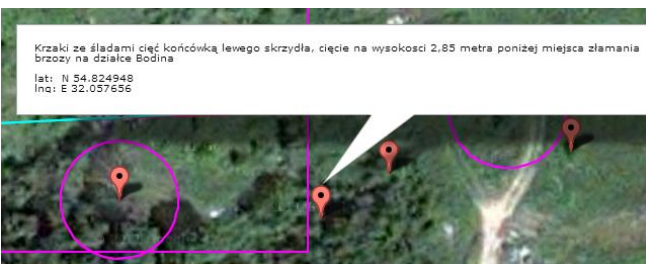
Należałoby stwierdzić, czy na fotografiach z 11.04.2010 r., będących w posiadaniu KBWLLP, krzaki te są poćcinane w opisany sposób. Najważniejsza byłaby dokumentacja bezpośrednio z dnia katastrofy.



Rys. 13. Na górze i w środku fotografia brzozy wykonana 13.04.2010 r. [19] Brak metalowych części i czerwonych przebarwień. Na dole, zdjęcie z raportu MAK – widoczny jest fragment kory, którego nie ma na fotografii górnej. Układ cieni pokazuje, że zdjęcie MAK jest wykonane o późniejszej porze dnia niż zdjęcia górne, czyli musi pochodzić z 12.04.2010 r.



Rys. 14. Skrzydło rządowego Tu-154M o numerze bocznym 101. Na czerwono pomalowane są jedynie opływ końcówki i bialo-czerwona szachownica.



Rys. 15. Ślady na krzakach, pominięte w raportach KBWLLP i MAK. Czy rzeczywiście były tam w dniu katastrofy?

7. MOŻLIWY PRZEBIEG PIERWSZEJ FAZY KATASTROFY

Naszkiecimy scenariusz pierwszej części katastrofy, wyłaniający się z powyższych rozważań.

Samolot, po otarciu się czubkiem lewego skrzydła o brzożę, porusza się dalej z zachowanym całym skrzydłem, wznosząc się z prędkością pionową ok. 6 m/s. Brzoza, uderzona od strony północno-wschodniej, zostaje nacięta od strony uderzenia i równocześnie łamie się, tworząc charakterystyczną drzazgę po przeciwnej stronie pnia. Pozostała część pnia, wciąż łącząca dolne i górne części brzozy, została ostatecznie ścięta przez niezniszczoną część opływu skrzydła, w odległości ok. metra od krawędzi natarcia. Ta ostatnia faza pozostawia na końcu skrzydła wgłębienie widoczne na dolnym zdjęciu z Rys. 5. Brzoza przewraca się na skutek uderzenia, w prawo, przy czym jest to dodatkowo wspomagane przez prawoskrętny wir powstający za skrzydłem. Ponieważ samolot wznosił się z prędkością 6 m/s, trwające ok. 1/80 s „przytrzymanie” go za sam czubek lewego skrzydła, połączone z wychyleniem się interceptora i zapewne skręceniem się skrzydła krawędzią natarcia w dół, powoduje powstanie momentu skręcającego, obracającego samolot w lewo. Zresztą, brzoza zostaje ostatecznie zapewne nie tyle ścięta, co zerwana szarpnięciem w górę. 50 m dalej, przechylony samolot – z silnie drgającym skrzydłem – ścina czubki drzew przy ul. Gubienko. Zderzenie z drzewami mogło częściowo wpełznąć sloty lewego skrzydła, zmniejszając jego siłę nośną [21].

Dalsza analiza wymagałaby zrobienia parametrycznych symulacji trajektorii lotu, uwzględniających zdeformowane skrzydło i różne scenariusze jego rozpadania się. Nie podejmuję się spekulacji, czy nastąpiło to pośrednio w konsekwencji otarcia się samolotu skrzydłem o drzewo, czy też skrzydło, jako całość, kolizję przetrwało i spadło na skutek zupełnie innego mechanizmu, np. eksplozji w lewym zbiorniku paliwa, a także czy procesy te rozpoczęły się przed, czy za ul. Gubienko.

Podkreślimy wreszcie, iż rozważam jedynie fazę pierwszą katastrofy, czyli to, co działo się bezpośrednio w pobliżu brzozy. Fazy dalsze, czyli odpadnięcie końcówki skrzydła, towarzysząca mu beczka – nieuchronna przy tak dużym kącie natarcia [22] – oraz ostateczne zniszczenie samolotu w rejonie głównej części wrakowiska, wymagają odrębnych badań.

Literatura cytowana

- [1] J. Osiecki, T. Białoszewski, R. Latkowski, M. Prószyński, „Ostatni lot. Raport o przyczynach katastrofy”, Prószyński i S-ka, Warszawa 2011.
- [2] K. Nowaczyk, prezentacja na posiedzeniu Zespołu Parlamentarnego ds. Zbadania Przyczyn Katastrofy Tu-154M z 10 kwietnia 2010 r.
- [3] Prywatna informacja od M. Jaworskiego.
- [4] „Tu-154M. Rukawodstwo po technicznej eksploatacji.”
- [5] M. Jaworski, materiały z Konferencji Smoleńskiej.
- [6] „Ekspertyza techniczna. Deszyfracja i analiza danych z pokładowych rejestratorów parametrów samolotu

- Tu154M nr boczny 101 Sił Powietrznych RP, który uległ katastrofie 10 kwietnia 2010 r.”, Warszawa, 15.07.2011r.
- [7] Raport Końcowy KBWLLP. Załącznik nr 4, str. 8/14.
- [8] M. Dąbrowski, materiały z Konferencji Smoleńskiej.
- [9] W. Binienda, materiały z Konferencji Smoleńskiej.
- [10] A. Olejnik, materiały z Konferencji Smoleńskiej.
- [11] A. Morka, materiały z Konferencji Smoleńskiej.
- [12] W. H. Reed i in., „Full-scale dynamic crash test of a Douglas DC-7 aircraft,” raport techniczny i dokumentacja filmowa, Federal Aviation Agency, 1965.
- [13] C. Cieszewski, materiały z Konferencji Smoleńskiej.
- [14] Raport końcowy KBWLLP.
- [15] Opracowanie K. Nowaczyk.
- [16] Raport MAK, wersja angielska.
- [17] „C-130 Crash Landing”, film dostępny pod adresem <http://www.youtube.com/watch?v=BHSACq-HeoA>
- [18] J. Gieras, materiały z Konferencji Smoleńskiej.
- [19] Autorem zdjęcia jest Jan Gruszyński (informacja od P. Witakowskiego). Fotografie pochodzą ze strony internetowej http://smolenskrash.com/smol_conf/images/Wrakowisko/PhotoWebAlbum/Wrakowisko/index.htm
- [20] S. Amielin, “Ostatni lot. Spojrzenie z Rosji”, Prószyński i S-ka, Warszawa 2010.
- [21] Podobny mechanizm wystąpił przy katastrofie Samolotu DC-10 w dniu 25.05.1979 r., doprowadzając do obrotu samolotu o 112° w chwili uderzenia w ziemię. „Aircraft Accident Report. American Airlines. Inc., DC-10-10, N110 AA. Chicago-O’Hare International Airport, Chicago, Illinois, May 25, 1979”. NTSB 1979.
- [22] G. H. Shah, „Aerodynamic effects and modeling of damage to transport aircraft”, NASA Technical Reports, http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080034656_2008034489.pdf