





Misje stratosferyczne Akademii Tarnowskiej Część 2: analiza danych

Stratospheric missions of the University of Applied Sciences in Tarnow. Part 2: data analysis

Jakub Antosz¹ A-F , Robert Wielgat² A,C-G , Sylwia Plata¹ A,C-E, Piotr Jasielski¹ A,B,E,
Damian Pękala² A,B, Regina Arabik² A,B , Maciej Witek² A,B 

¹Akademia Tarnowska, Studenckie Koło Naukowe Elektroników „Amper”, ul. Mickiewicza 8, 33-100 Tarnów, Polska

²Akademia Tarnowska, Wydział Politechniczny, Katedra Elektroniki, Telekomunikacji i Mechatroniki, ul. Mickiewicza 8, 33-100 Tarnów, Polska

Artykuł oryginalny

Abstrakt

W okresie od 29 lipca do 29 września 2023 roku wysłano z kampusu Akademii Tarnowskiej trzy misje stratosferyczne poprzez wyniesienie ładunku za pomocą balonów wypełnionych heliem. W trakcie misji zarejestrowano szereg pomiarów dotyczących temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza; temperatury wewnątrz kapsuł ładunkowych, w szczególności na źródłach zasilania; szybkości wznoszenia, opadania i przemieszczania się; parametrów transmisji radiowej. W artykule przedstawiono analizę wybranych danych obejmujących pomiary wilgotności, ciśnienia, temperatury w troposferze i stratosferze oraz temperatury wewnątrz kapsuły. Wyznaczono zależności wielkości fizycznych od wysokości. Przedstawiono wnioski wypływające z analizy danych

Abstract

In the period from July 29 to September 29, 2023, three stratospheric missions were sent from the campus of the University of Applied Sciences in Tarnow, Poland, by lifting the payload using helium-filled balloons. During the mission, a number of measurements were recorded regarding air temperature, pressure and humidity; temperature inside the payload capsules, in particular at the power sources; rate of ascent, descent and movement; radio transmission parameters. The article presents an analysis of selected data including measurements of humidity, pressure, temperature in the troposphere and stratosphere and temperature inside the capsule. The dependencies of physical quantities on altitude were determined. Conclusions resulting from the analysis of the data were presented.

Słowa kluczowe

- balon stratosferyczny
- regresja liniowa
- inwersja temperatury
- radiosonda
- ciśnienie atmosferyczne
- wilgotność powietrza
- pomiary aerologiczne

Udziały autorów

- A - przygotowanie badań
- B - gromadzenie danych
- C - analiza statystyczna uzyskanych wyników
- D - interpretacja uzyskanych wyników
- E - przygotowanie pierwotnej wersji tekstu
- F - przegląd literatury
- G - korekta i rewizja tekstu

Korespondencja

Robert Wielgat

e-mail: r_wielgat@atar.edu.pl
Akademia Tarnowska
Wydział Politechniczny
Katedra Elektroniki, Telekomunikacji
i Mechatroniki
ul. Mickiewicza 8
33-100 Tarnów, Poland

Informacje o artykule

Historia artykułu (Article history)

- Otrzymano (Received): 2023-12-20
- Zaakceptowano (Accepted): 2024-04-12
- Opublikowano (Published): 2024-04-20

Wydawca (Publisher)

Akademia Tarnowska
University of Applied Sciences in Tarnow
ul. Mickiewicza 8, 33-100 Tarnow, Poland

Licencja (User license)

© by Authors. This work is licensed under
a Creative Commons Attribution 4.0
International License CC-BY-SA.

Finansowanie (Financing)

Dofinansowano ze środków MEiN
w ramach programu „Studenckie koła
naukowe tworzą innowacje”, umowa
nr SKN/SP/536270/2022 *System kontroli
naziemnej radiosond stratosferycznych*

Konflikt interesów (Conflict of interest)

Nie zadeklarowano konfliktu interesów.

Wprowadzenie

Balonowe misje stratosferyczne mają swoją ponad 100-letnią historię. Początkowo były to loty głównie załogowe, które odbywały się w otwartych gondolach z wykorzystaniem aparatów tlenowych. Za pierwszy tego typu lot można uznać lot profesora Artura Bersona, z pochodzenia Polaka, oraz Niemca, doktora Suringa, którzy w 1901 roku wznieśli się balonem wolnym „Preussen” o pojemności 8400 m³ na wysokość 10 800 m, docierając do granic stratosfery [1]. Rekord ustanowiony przez Bersona i Suringa został pobity przez amerykańskiego pilota Hawthorne’a Gray’a w 1927 roku. Amerykanin wzniósł się na wysokość 12 944 m, stając się pierwszym człowiekiem, który przekroczył granice stratosfery. Kolejne załogowe loty do stratosfery były wykonywane już w hermetycznych kapsułach. Pierwszymi ludźmi, którzy odbyli lot do stratosfery w zamkniętej kapsule byli Szwajcarzy: Auguste Piccard i jego asystent, Paul Kipfer, którzy 27 maja 1931 roku dolecieli do stratosfery na wysokość 15 781 m balonem wypełnionym wodorem [2]. W latach 30. XIX wieku w Belgii, ZSRR i USA powtórzono kilkakrotnie osiągnięcia Piccarda, co zakończyło się ustanowieniem rekordu wysokości wynoszącego 22 066 m przez amerykańskich pilotów wojskowych Alberta W. Stevensa oraz Orvila A. Andersona w kapsule Explorer II w dniu 11 listopada 1935 roku [3].

Warto w tym miejscu wspomnieć również o pracach polskich naukowców: Mieczysława Wolfke, Szczepana Szczeniowskiego, Mieczysława Jeżewskiego i Mariana Mięśowicza, w latach 30. XX wieku, związanych z budową największego w ówczesnym czasie balonu stratosferycznego nazwanego „Gwiazdą Polski”. Powstały balon miał pojemność 124 700 m³, a planowana wysokość lotu 30 000 m byłaby w owym czasie rekordowa. Próba wysłania „Gwiazdy Polski” do stratosfery podjęta 13 października 1938 roku w Dolinie Chochołowskiej zakończyła się niepowodzeniem na skutek wybuchu wodoru użytego do napełniania balonu. W kolejnym starcie „Gwiazdy Polski”, planowanym na wrzesień 1939 roku, przeszkodziła druga wojna światowa [2].

Wojna zahamowała również rozwój załogowych lotów stratosferycznych na świecie. Loty wznowiono dopiero na przełomie lat 50. i 60. XX w., co 2 lutego 1966 roku zaowocowało ustanowieniem przez Nicholasa Piantanida kolejnego rekordu wysokości lotu, wynoszącego 37 600 m [4]. Obecnie rekord wysokości lotu należy do Allana Eustace, któremu udało się uzyskać wysokość 41 424 m w misji StratEx przeprowadzonej przez Paragon Space Development Corporation [5]. Loty stratosferyczne odbywały się w celach sportowych, wojskowych, naukowych, a ostatnio również komercyjnych [6–7].

Obok balonowych misji załogowych na przestrzeni lat rozwijały się misje bezałogowe dokonujące pomiarów aerologicznych, polegających na wyznaczeniu pionowych profili ciśnienia, temperatury, wilgotności oraz kierunku i prędkości wiatru. Początkowo misje bezałogowe wykonywano za pomocą balonów-sond, które były gumowymi balonami o średnicy 1–2 m, wypełnionych wodorem, z podwieszonym koszem, w którym umieszczone były przyrządy do pomiarów ciśnienia, temperatury i wilgotności powietrza.

Pierwszy taki balon został wysłany w 1892 roku przez fizyków Hermite’a i Besancon’a, a kolejny, który został przez nich wypuszczony w 1893 roku doleciał do stratosfery, osiągając wysokość 15 500 m. Najwyżej z balonów-sond wzleciał wypuszczony przez profesora Gambie w 1922 roku balon wyposażony w meteorograf Hergesella, który osiągnął wysokość 37 700 m [8].

Zasadniczy postęp w zakresie badania stratosfery za pomocą balonów dokonał się w latach 30. XX wieku, kiedy w stratosferę wysłano pierwsze radiometeorografy, czyli „radiosondy”. W 1937 roku Biuro Pogodowe Stanów Zjednoczonych utworzyło sieć stacji radiosondowych, która istnieje do dziś [9].

W Polsce pierwsze pomiary aerologiczne były wykonywane dla wojska już w latach 20. XX wieku, natomiast pierwsza stacja aerologiczna została uruchomiona w Legionowie w 1931 roku. Pomiary były wykonywane za pomocą meteorografów umieszczonych pod balonami na uwięzi lub pod latawcami. W 1938 roku rozpoczęto pomiary z wykorzystaniem francuskich radiosond firmy Bureau. Druga wojna światowa zwiększyła zapotrzebowanie na dane dotyczące górnych warstw powietrza i przyspieszyła rozwój komponentów radiosond oraz sieci obserwacyjnych. Co więcej, poczyniono postępy w zakresie namierzania radiowego i technologii radioteodolitu, które umożliwiły śledzenie radiosond w locie, tak aby można było uzyskać informacje o wiatrach w powietrzu. Początkowo radioteodolity ustawiano ręcznie w celu śledzenia radiosondy pokładowej, ale w latach 50. XX wieku wprowadzono zautomatyzowane radioteodolity (ART), które są nadal używane.

Wczesnym stacjom obsługującym radiosondy brakowało skomputeryzowanych systemów przetwarzania danych, co wiązało się ze znaczną ilością pracy ręcznej i dłuższym czasem potrzebnym do przetworzenia i rozpowszechnienia danych dotyczących górnych warstw powietrza. Aby zmniejszyć obciążenie pracą przy sondowaniu, pod koniec lat 60. i na początku lat 70. XX wieku rozpoczęto prace nad komputerowym przetwarzaniem danych z radiosond. W latach 80. postęp technologiczny w teledzieleniu i komputerach sprawił, że obserwacje stały się niemal w pełni zautomatyzowane.

W Polsce pod koniec lat 80. funkcjonowały cztery stacje aerologiczne: Legionowo, Łeba (przeniesiona z Koszalina w 1971 roku), Poznań (aktywna do 1992 roku) i Wrocław oraz ponad 20 stacji wykonujących pilotaże (teodolitowy pomiar wiatrów górnych) [10].

Równoległe z postępowaniem w komputerowym przetwarzaniu danych pojawiły się nowe techniki określania wiatru w powietrzu. Opracowano systemy, które wykorzystywały pomoce radionawigacyjne (NAVAID), takie jak LORAN i Omega (wycofany w październiku 1997 roku). W latach 90. XX wieku kontynuowano rozwój technologii radiosond – ulepszono czujniki radiosondowe, przetwarzanie danych i systemy NAVAID. Jednym z głównych elementów postępu było opracowanie systemów, które wykorzystują globalny system pozycjonowania (GPS) do określania kierunku i prędkości wiatru w powietrzu. Pod koniec lat 90. rozpoczęto prace mające na celu zastąpienie obecnych systemów naziemnych ART i związanych z nimi radiosond systemami opartymi na GPS [9].

Obecnie pomiary aerologiczne są na całym świecie przeprowadzane przez służby meteorologiczne i wojsko i są one skoordynowane, czyli przeprowadzone we wszystkich stacjach aerologicznych o tej samej godzinie celem stworzenia trójwymiarowej mapy warunków meteorologicznych ziemskiej atmosfery od powierzchni ziemi do wysokości około 30 km. Pomiary są zapisywane w różnych bazach danych. Największymi z nich wydają się bazy Earth Science Research Laboratory (ESRL) oraz Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA) [11]. Coraz większą popularność zyskują bazy danych radiosond amatorskich, spośród których można wymienić bazę SQ6KXY Radiosonde Tracker Database [12] oraz SondeHub [13]. Do wspomnianych baz [zob. 12–13] najczęściej wpływają dane z radiosond fińskiej firmy Vaisala. Historia tych popularnych radiosond rozpoczęła się we wczesnych latach 90., kiedy wdrożono w pełni zautomatyzowany system sondażowy DigiCORA należący do tej właśnie firmy. Na przestrzeni lat system ten wraz z radiosondami ulegał kolejnym modernizacjom, z których najważniejszą wydaje się być wyposażenie w 2005 roku stacji aerologicznych w systemy DigiCORA MW21, które umożliwiały śledzenie radiosondy z wykorzystaniem nawigacji satelitarnej GPS.

W 2015 roku przeprowadzono drugą modernizację systemu Vaisala do wersji MW41 umożliwiającą korzystanie z najnowszej radiosondy RS41. Radiosondy te zostały również użyte do dokonania pomiarów aerologicznych wilgotności, ciśnienia i temperatury, których analizę przedstawiono w niniejszym artykule. Pomiarów dokonano podczas trzech misji stratosferycznych zrealizowanych przez Studenckie Koło Naukowe Elektroników „Amper” działające przy Katedrze Elektroniki, Telekomunikacji i Mechatroniki Akademii Tarnowskiej.

Materiał i metody

Celem opisywanych badań było wyznaczenie zależności parametrów fizycznych troposfery i stratosfery, takich jak: temperatura, ciśnienie i wilgotność od wysokości (w m n.p.m.). W niniejszym rozdziale przedstawiono podstawy teoretyczne badanych zagadnień, sprzęt wykorzystany do badań i opisano przebieg trzech misji stratosferycznych, które pozwoliły na zebranie wyników.

Zmienność parametrów fizycznych atmosfery w zależności od wysokości

W niniejszym podrozdziale opisano zmienność wybranych parametrów fizycznych, takich jak: temperatura, ciśnienie i wilgotność w zależności od wysokości nad poziomem morza w dwóch warstwach atmosfery: troposferze i stratosferze. Troposfera jest to warstwa atmosfery rozciągająca się od wysokości 0 m n.p.m. do około 12 000 m n.p.m. Powyżej troposfery zaczyna się stratosfera – warstwa atmosfery ziemskiej rozciągająca się dla obszaru Polski od około 12 000 m n.p.m. do wysokości około 50 000 m n.p.m. Powyżej stratosfery znajdują się kolejne warstwy atmosfery: mezosfera, termosfera i egzosfera [14].

Jednym z najbardziej przewidywalnych parametrów atmosfery jest ciśnienie. Zależność ciśnienia od wysokości nad poziomem morza jest najczęściej modelowana za pomocą wzoru barometrycznego [15]:

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{\mu g h}{RT}\right) \quad (1),$$

gdzie:

p_0 – ciśnienie atmosferyczne na poziomie odniesienia [hPa],

μ – masa molowa powietrza (0,0289644 kg/mol),

h – wysokość od poziomu odniesienia [m],

g – przyspieszenie ziemskie (około $9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$),

R – stała gazowa ($8,31446261815324 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

T – temperatura powietrza [K].

We wzorze (1) najczęściej przyjmuje się poziom morza jako poziom odniesienia. Wzór (1) relatywnie dobrze odzwierciedla zmiany ciśnienia w zależności od wysokości, jednak należy traktować go jako pewne przybliżenie, ponieważ temperatura T nie jest stała w funkcji wysokości, natomiast przyspieszenie ziemskie zależy w pewnym stopniu od szerokości geograficznej. Ciśnienie atmosferyczne na powierzchni ziemi

przyjmuje wartość około 1000 hPa. Ze wzrostem wysokości ciśnienie spada, zgodnie z zależnością (1), aby osiągnąć na granicy troposfery i stratosfery wartość 200 hPa. W górnych warstwach stratosfery ciśnienie obniża się aż do około 1 hPa. Dokładniejszą analizę zależności ciśnienia od wysokości adresujemy do kolejnej publikacji.

Zależność temperatury od wysokości ma bardziej zmienny przebieg niż w przypadku ciśnienia atmosferycznego. Temperatura powietrza w troposferze spada wraz z wysokością w sposób w przybliżeniu liniowy z gradientem około $-0,006^{\circ}\text{C}/\text{m}$, osiągając na granicy troposfery i stratosfery (około 12 000 m n.p.m.) wartość około 213 K (-60°C). W stratosferze zachodzi inwersja temperatury tzn. wraz ze wzrostem wysokości temperatura podnosi się od 213 K na granicy stratosfery z troposferą do około 273 K (0°C) w górnych warstwach stratosfery na granicy z mezosferą, co odpowiada wysokości około 50 000 m n.p.m.. Średni gradient temperatury jest dodatni i wynosi około $0,002^{\circ}\text{C}/\text{m}$ [16].

Wilgotność względna wykazuje bardzo duże wahania w troposferze w zależności od pogody, strefy klimatycznej, a nawet konkretnego miejsca w tej samej strefie klimatycznej – inna będzie w pobliżu zbiorników wodnych, a inna w obszarze np. industrialnym. W troposferze trudno jest wyznaczyć dokładny przebieg zmian wilgotności w zależności od wysokości w m n.p.m., ponieważ wartość wilgotności podlega dużym fluktuacjom [17]. Niemniej jednak wraz ze wzrostem wysokości wilgotność względna wykazuje trend opadający, a jej średnia wartość z każdym kilometrem wysokości maleje mniej więcej o połowę [18]. W stratosferze trend ten jest już bardzo przewidywalny i łączy do zależności funkcyjnej.

Opis sprzętu

W projekcie została wykorzystana przeprogramowana sonda stratosferyczna RS41-SGP firmy Vaisala. Jest to urządzenie wykorzystywane do zbierania danych pogodowych przez wiele ośrodków w Europie. Jej główne podzespoły to mikrokontroler STM32F100C8T6, moduł GPS oraz nadajnik radiowy SI4032. Do zaprogramowania sondy na potrzeby amatorskie wykorzystano program open-source udostępniony w serwisie GitHub. Pozwala on na transmisję danych z sondy następującymi trybami pracy: APRS, Horus 4FSK oraz CW (alfabet Morse'a). Nie jest wspierany oryginalny zestaw czujników, dlatego aby sonda wysyłała także informacje o temperaturze zewnętrznej, wilgotności i ciśnieniu atmosferycznym, konieczne jest dołączenie czujnika BME280 komunikującego się przez magistralę I2C. Można także wykorzystać uniwersalny moduł RadSens do pomiaru

promieniowania kosmicznego. W programie można swobodnie zmieniać tryb transmisji danych, czas przerwy pomiędzy nadawaniem, rodzaj wysyłanych danych oraz moc modułu nadawczego. Dane odebrane z sondy przez program SDRSharp i zdekodowane przez Horus GUI są aktualizowane na stronie SondeHub Amateur, gdzie na bieżąco można obserwować pozycję urządzenia oraz odczyty z czujników. Dużą zaletą jest także możliwość monitorowania temperatury wewnętrznej procesora oraz napięcia baterii zasilania. Wszystkie otrzymane dane są zapisywane w aplikacji internetowej Grafana. Tworzy ona interaktywną wizualizację zarejestrowanych parametrów w postaci wykresów, które są przechowywane nawet przez kilka lat. Można swobodnie przybliżać każdy diagram, sprawdzać pomiar w konkretnym punkcie oraz eksportować dane do Excela. Dokładniejsze informacje na temat sprzętu i oprogramowania użytego podczas opisywanych misji stratosferycznych można znaleźć w literaturze [19].

Opis warunków i przebiegu misji

Misja I – Szczepanik 1

Pierwsza misja stratosferyczna Akademii Tarnowskiej wystartowała 29 lipca 2023 roku o godzinie 11:41 czasu UTC+01:00. Warunki pogodowe w miejscu startu (Tarnów, Kampus Akademii Tarnowskiej – rysunek 1) prezentowały się następująco: słoneczna pogoda o średniej temperaturze powietrza 26°C , ciśnieniu 1010,5 hPa oraz średniej prędkości wiatru przy powierzchni $9,75\text{ km/h}$, wiejącego z kierunku zachodniego. Natomiast w miejscu lądowania (Lubzina) panowały następujące warunki pogodowe: słabe opady deszczu (3 mm), średnia temperatura powietrza 25°C , średnie ciśnienie atmosferyczne 1010,75 hPa, średnia prędkość wiatru powierzchniowego 11 km/h , wiejącego w stronę południowo-zachodnią. Balon wzniósł się na maksymalną wysokość 34,45 km, lot trwał 2 h 35 min, a dystans od punktu startu do miejsca lądowania wyniósł 38,8 km.

Przeprogramowana radiosonda RS41-SGP firmy Vaisala nadawała pozycję GPS oraz wysokość balonu drogą radiową, wykorzystując modulację 4FSK oraz APRS. Procesor urządzenia – STM32F100C8T6 mierzył także poziom napięcia zasilania oraz temperaturę wewnętrzną, wykorzystując wbudowany 12-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy. Odebrane dane lokalizacyjne i parametry pracy były wysyłane na stronę internetową SondeHub Amateur, co pozwalało na sprawdzanie aktualnego stanu urządzenia. Dodatkowo dane zostały zarchiwizowane w serwisie Grafana w formie ogólnodostępnych przejrzystych wykresów.



Rysunek 1. Przygotowania do startu I misji stratosferycznej – Szczepanik 1

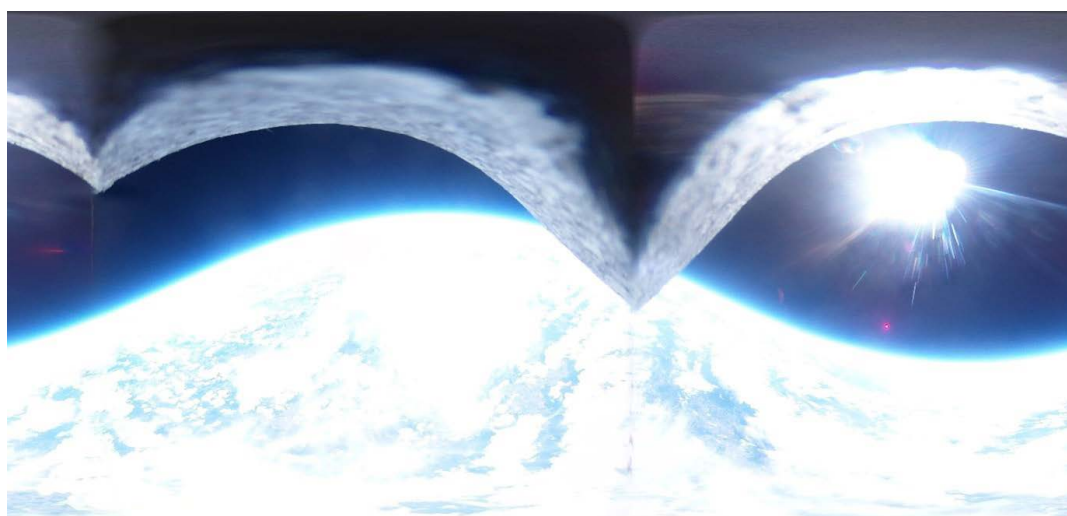
Aby zarejestrować przebieg lotu balonu oraz wygląd stratosfery, do ładunku dołączono kamerę sportową 360° RICOH Theta SC2. Zdjęcia były wykonywane z interwałem co 7 s w rozdzielczości 3840 x 1920 px. Obrazy były zapisywane w wewnętrznej pamięci urządzenia, która została odczytana zaraz po lądowaniu ładunku przez

aplikację mobilną wykorzystującą Wi-Fi. Z powodu braku doświadczenia, tryb wykonywania zdjęć w I misji nie był dokładnie ustawiony. Obraz w stratosferze był za jasny, przez co w niektórych miejscach okazał się niewyraźny (fot. 2). Dodatkowo z powodu małej pojemności baterii kamery, rejestrator zakończył pracę mniej więcej w połowie fazy spadania.

Misja II – Szczepanik 2

Start drugiej misji stratosferycznej Akademii Tarnowskiej odbył się 23 września 2023 roku o godzinie 10:42 czasu UTC+01:00. W miejscu startu (Tarnów, Kampus Akademii Tarnowskiej) warunki pogodowe prezentowały się następująco: pochmurna pogoda, umiarkowane opady deszczu, średnia temperatura powietrza 20°C, ciśnienie 1025 hPa, średnia prędkość wiatru przy powierzchni 16,25 km/h w kierunku południowym (rysunek 3). W miejscu lądowania (Ożarów) panowały natomiast następujące warunki pogodowe: słabe opady deszczu (1 mm), średnia temperatura powietrza 22°C, średnie ciśnienie atmosferyczne 1012,75 hPa, średnia prędkość wiatru powierzchniowego 16,5 km/h w stronę północno-zachodnią. Balon wzniósł się na maksymalną wysokość 27,44 km, lot trwał 2 h 5 min, a dystans od punktu startu wynosił 114,6 km.

W wysłanym ładunku ponownie znalazła się sonda RS41, jednakże została dodatkowo wyposażona w czujnik BME280, komunikujący się magistralą I2C. Pozwalał on na mierzenie parametrów zewnętrznych, takich jak: temperatura zewnętrzna (o teoretycznym zakresie pracy od -40°C do +85°C) mierzona



Rysunek 2. Przykładowe zdjęcie ze stratosfery zarejestrowane kamerą sportową 360° RICOH Theta SC2 w trakcie I misji stratosferycznej – Szczepanik 1



Rysunek 3. Zdjęcie zarejestrowane kamerą sportową 360° RICOH Theta SC2 obrazujące miejsce startu i warunki pogodowe w trakcie II misji stratosferycznej – Szczepanik 2

z maksymalnym błędem $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$, wilgotność powietrza (od 0% do 100%) mierzona z maksymalnym błędem $\pm 3\%$ oraz ciśnienie atmosferyczne (o zakresie pracy od 300 hPa do 1100 hPa) z maksymalnym błędem pomiaru $\pm 1,7$ hPa. Dokładniejsze informacje na temat technicznych parametrów czujnika BME280 można znaleźć w jego danych katalogowych [20]. Dokonywane pomiary były wysyłane wraz z lokalizacją i wysokością urządzenia na stronę internetową SondeHub Amateur i zapisywane tam w serwisie Grafana.

Kolejnym elementem ładunku był rejestrator danych wykonany na płytce PCB jako nakładka do Arduino Uno R4 Wi-Fi. Zestaw zawierał moduł GPS

UBX-G7020-KT DFrobot, dodatkowy czujnik BME280, czujnik promieniowania jonizującego DFrobot SEN0463, pięć czujników temperatury DS18B20 oraz brzęczyk elektromagnetyczny. Odczytane dane były na bieżąco zapisywane na karcie microSD.

Kamera sportowa 360° RICOH Theta SC2 w tej misji została znacznie przesunięta w bok w stosunku do centralnej części ładunku, przycięto dodatkowo boki kapsuły zabezpieczającej kamerę. Zmieniono także jasność wykonywanych zdjęć. Dzięki tym czynnikom obraz był ciemniejszy, ale bardziej wyraźny, a kapsuła zajmowała mniejszą część kadru (rysunek 4). Dołączenie power-banku do kamery pozwoliło na znaczne wydłużenie jej



Rysunek 4. Przykładowe zdjęcie ze stratosfery zarejestrowane kamerą sportową 360° RICOH Theta SC2 w trakcie II misji stratosferycznej – Szczepanik 2

Na zdjęciu uzyskano lepszą jakość obrazu w porównaniu ze zdjęciem z rysunku 2.

czasu pracy. Urządzenie wykonywało zdjęcia podczas całego lotu balonu oraz po wylądowaniu, aż do momentu jego odnalezienia przez ekipę poszukiwawczą. Energia końcowa power-banku wynosiła 65%, co można uznać za bardzo dobry wynik, biorąc pod uwagę to, że z tego źródła energii był także zasilany rejestrator danych Arduino. Z powodu braku odporności kamery na wodę, w okresie przelotu przez warstwę chmur, niektóre zdjęcia były nieprawidłowo wykonane, co skutkowało zapisem białych matryc w pamięci urządzenia.

Swoją ładunek w drugiej misji dołączył także Zespół Szkół Technicznych im. Ignacego Mościckiego w Tarnowie Mościcach. W zabezpieczonej paczce znajdowały się próbki chlorku sodu, nasion rzeżuchy oraz zamknięta strzykawka z ruchomym tłokiem. Całość udało się bezpiecznie odzyskać i przekazać właścicielowi, w celu przeprowadzenia badań wpływu warunków stratosferycznych na próbki. Wyniki z eksperymentów są dostępne na stronie internetowej Zespołu Szkół Technicznych [21] oraz na oficjalnym profilu szkoły w serwisie Facebook [22].

Misja III – Szczepanik 3

Trzecia misja stratosferyczna Akademii Tarnowskiej wystartowała 29 września 2023 roku o godzinie 16:42 czasu UTC+01:00. Warunki pogodowe w miejscu startu (Tarnów, Kampus Akademii Tarnowskiej) prezentowały się następująco: bezchmurna słoneczna pogoda, średnia temperatura powietrza 23°C, ciśnienie 1021,5 hPa, średnia prędkość wiatru przy powierzchni 8,25 km/h w kierunku południowym (rysunek 5). W miejscu lądowania (Skurowa) panowały następujące warunki pogodowe: słoneczna pogoda, czyste niebo, średnia temperatura powietrza 24°C, średnie ciśnienie atmosferyczne 1021,25 hPa, średnia prędkość wiatru powierzchniowego 10,25 km/h w stronę południową. Balon wznosił się na maksymalną wysokość 36,97 km, lot trwał 2 h 10 min, a dystans od punktu startu wynosił 33,9 km.

Po raz kolejny w projekcie wykorzystano przeprogramowaną radiosondę RS41 z dołączonym czujnikiem BME280. Urządzenie przez cały czas działania wysyłało dane o parametrach zewnętrznych i wewnętrznych. Na stronie internetowej SondeHub Amateur na bieżąco można było sprawdzać wysokość, pozycję oraz pomiary czujnika dołączonego do sondy.

W trzeciej misji zastosowano mniejszą wersję rejestratora danych. Wykorzystano tam Arduino Uno Rev3, moduł GPS UBX-G7020-KT DFrobot, sensor BME280, dwa czujniki temperatury DS18B20 oraz brzęczyk elektromagnetyczny. Dane były zapisywane na kartę microSD. Do ładunku dołączono również sygnalizację świetlną, ponieważ radiosonda wylądowała już po zmierzchu (rysunek 6).



Rysunek 5. Start balonu podczas III misji stratosferycznej – Szczepanik 3



Rysunek 6. Odzyskana po wylądowaniu radiosonda wraz z ładunkiem użyta w III misji stratosferycznej – Szczepanik 3 (Zdjęcie wykonane w dniu 29 września 2023 roku o godz. 19:48.)

W III misji swój ładunek dołączył także Zespół Szkół Mechaniczno-Elektrycznych w Tarnowie. W małych tubach znajdowały się specjalne detektory promieniowania jonizującego dostarczone przez Instytut Fizyki

Jądrowej Polskiej Akademii Nauk, które były umieszczone na zewnątrz podczepionych pakunków. Wszystkie czujniki udało się odzyskać i przekazać właścicielom, w celu przeprowadzenia badań. Informację na ten temat zamieszczono na stronie internetowej Zespołu Szkół Mechaniczno-Elektrycznych w Tarnowie [23].

Wyniki i dyskusja

Przedstawione w niniejszym rozdziale dane obejmują jedynie zarejestrowane na stronie SondeHub Amateur wartości wilgotności, ciśnienia, temperatury zewnętrznej oraz temperatury wewnętrznej (wewnątrz kapsuły ładunkowej). Dane zarejestrowane niezależnie na kartach SD podczas II i III misji nie zostały tutaj przedstawione, ponieważ wymagają weryfikacji ze względu na błędne działanie lokalizatora

GPS na wysokościach powyżej 12 000 m oraz błędne wskazania czujnika BMP 280 podczas II misji. Wyniki ich opracowania zostaną przedstawione w przyszłych publikacjach. Na podstawie wykresów czasowych wysokości, wilgotności, ciśnienia i temperatury, których przykłady dla misji III są przedstawione na rysunku 7 [24], sporządzono profile pionowe wielkości fizycznych atmosfery, które przedstawiono i przeanalizowano w dalszej części artykułu. Natomiast przebieg czasowy wysokości zaprezentowany na rysunku 7 wskazuje na stałą prędkość wznoszenia średnio 18 km/h (5 m/s), aż do wysokości około 37 km, na której nastąpiło pęknięcie balonu. Po pęknięciu balonu początkowa duża prędkość opadania na spadochronie blisko 300 km/h (81,9 m/s) spowodowana małą gęstością powietrza stopniowo zmniejszała się w miarę zbliżania się ładunku do powierzchni ziemi, osiągając w końcowej fazie wartość około 44 km/h (12,3 m/s).

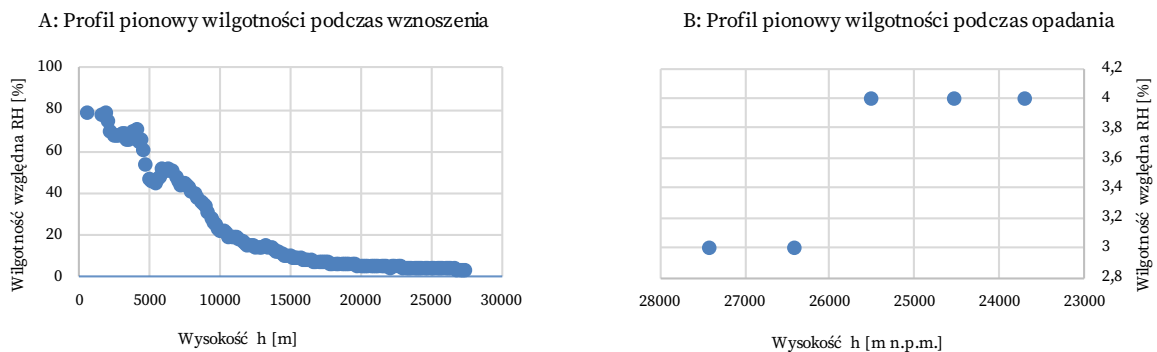


Rysunek 7. Przebieg czasowy wysokości [m n.p.m.] (górny wykres) oraz wielkości fizycznych atmosfery (dolny wykres): wilgotności względnej [%] (zielona linia), temperatury na zewnątrz kapsuły [°C] (niebieska linia), temperatury wewnątrz kapsuły [°C] (pomarańczowa linia) i ciśnienia atmosferycznego [hPa] (żółta linia) zmierzonych podczas III misji stratosferycznej – Szczepanik 3 [24]

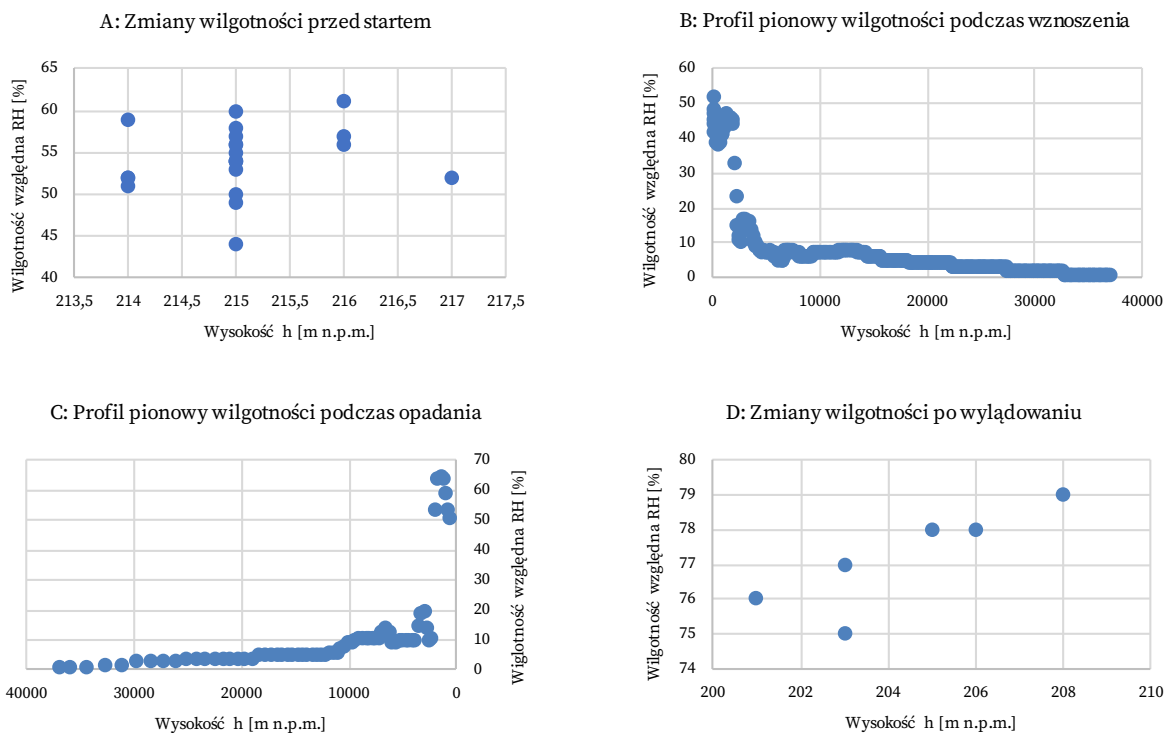
Pionowe profile wilgotności

Na podstawie danych ze strony Grafana [24] zostały sporządzone wykresy zależności wilgotności od wysokości w m n.p.m. W I misji nie dokonywano pomiarów wilgotności. W przypadku II misji pomiary wilgotności przed startem nie zostały uwzględnione w analizie ze względu na zbyt duże błędy pomiaru wysokości (dochodzące do 28%). Analizę pomiarów dla fazy wznoszenia balonu rozpoczęto dopiero od wysokości 486 m n.p.m., a zakończono na wysokości 27 436 m n.p.m. Uzyskana

zależność wilgotności od wysokości czujnika została przedstawiona na rysunku 8a. Podczas fazy opadania wilgotność została zmierzona jedynie w pięciu początkowych punktach – od wysokości 27 436 m n.p.m. do wysokości 23 724 m n.p.m. (rysunek 8b). W dalszej części fazy opadania pomiary nie zostały dokonane ze względu na przerwę w transmisji danych, której przyczyny nie są znane. Nie są również wiarygodne pomiary wilgotności po wylądowaniu (czujnik pokazywał wartość wilgotności względnej 0%), dlatego nie zostały uwzględnione w analizie.



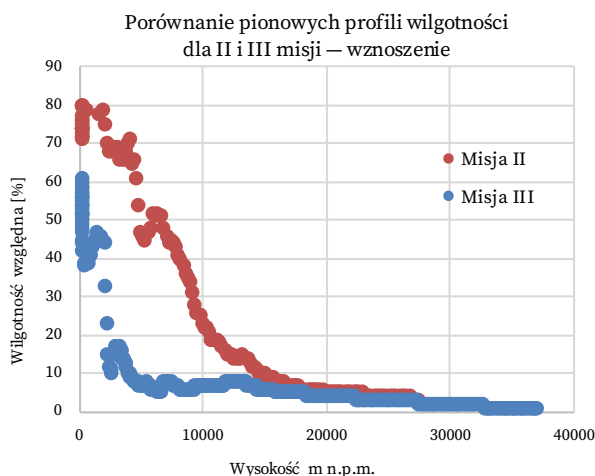
Rysunek 8. Wykresy przedstawiające pionowe profile wilgotności dla II misji stratosferycznej podczas: A: wznoszenia; B: opadania



Rysunek 9. Wykresy przedstawiające pionowe profile wilgotności dla III misji stratosferycznej

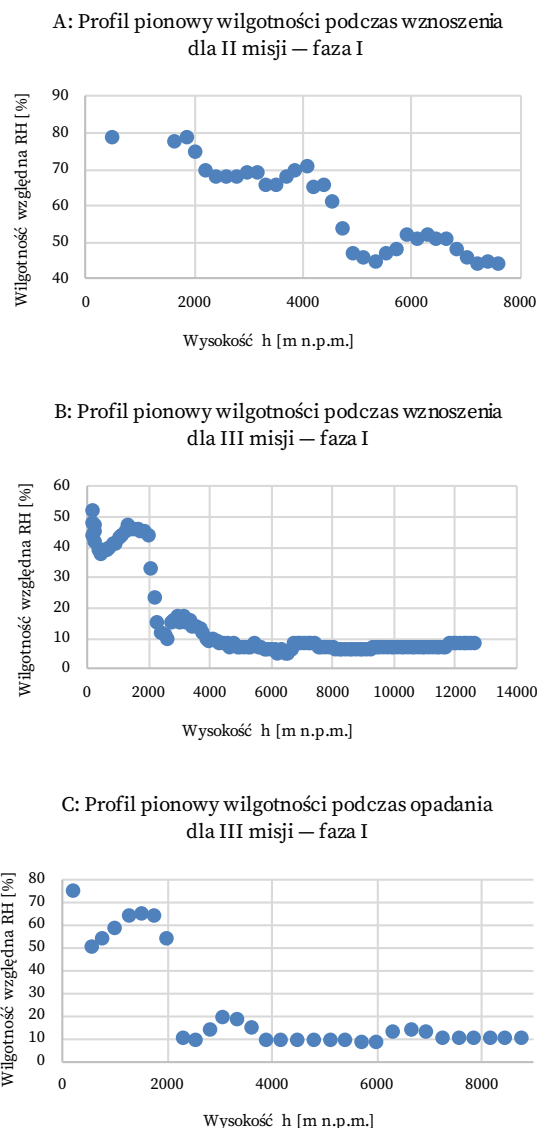
Zmiany wilgotności względnej w zależności od wysokości można uznać za wiarygodne dla III misji. Odczyty czujnika wilgotności przed startem balonu wahały się od 44% do 61% (rysunek 9a). Zmienność mogła być spowodowana przemieszczaniem czujnika podczas czynności przygotowawczych do startu. Ta sama przyczyna oraz obecność budynków mogła spowodować niewielkie (± 2 m) uchyby względem odczytu wysokości w m n.p.m. w miejscu startu (która wynosi według portalu Google Earth 216 m n.p.m.), w sytuacji, gdy radiosonda była przy powierzchni ziemi oraz zawyżenie czterech pomiarów wysokości o wartości między 11 m a 21 m w sytuacji, gdy balon był w górze na uwięzi, w miejscu startu. Zmiany wilgotności podczas wznoszenia balonu zostały zaprezentowane na rysunku 9b, natomiast podczas opadania na rysunku 9c. Rysunek 9d przedstawia zmiany wilgotności względnej po wylądowaniu balonu w misji Szczepanik 3. Relatywnie wysoka wilgotność w miejscu lądowania była prawdopodobnie spowodowana lądowaniem po zmierzchu nad brzegiem rzeki. Natomiast zmiany wysokości mogły być spowodowane m.in. zakłóceniami lokalizacji GPS ze względu na gęste zarośla, w których wylądowała radiosonda.

Na rysunku 10 jest przedstawione porównanie pionowych profili wilgotności dla II i III misji stratosferycznej. Na rysunku widać wyraźnie, że średni poziom wilgotności względnej dla II misji (31,77%) był znacząco wyższy od poziomu w III misji (10,96%). Można to wytłumaczyć deszczową pogodą z prawie całkowitym zachmurzeniem podczas II misji w porównaniu ze słoneczną pogodą z bezchmurnym niebem podczas III misji. Z rysunku 10 wynika, że dla wysokości około 18 000 m profile wilgotności zaczynają zrównywać się ze sobą (różnica w wartościach wynosi około 1%).

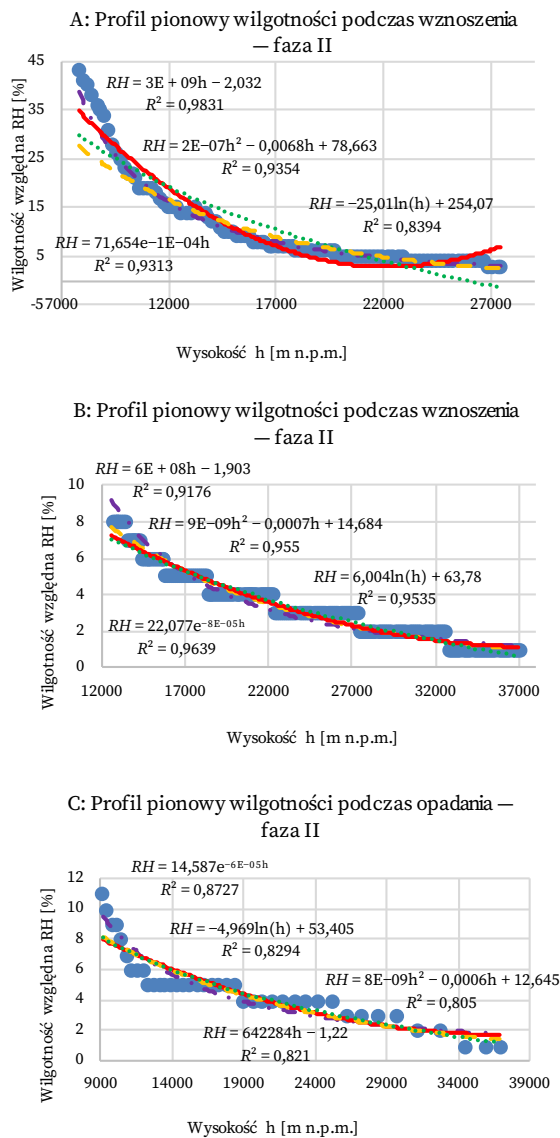


Rysunek 10. Porównanie pionowych profili wilgotności dla II i III misji stratosferycznej

W zależnościach wilgotności od poziomu wysokości zarówno w II, jak i w III misji można wyróżnić dwie charakterystyczne fazy. Faza I „oscylacyjna” cechuje się nieregularnymi zmianami ciśnienia (rysunek 11), jakkolwiek na wszystkich wykresach można dostrzec trzy lokalne maksima wilgotności dla wysokości około 1500 m, 3000–4000 m i 6500 m. Zauważone nieregularne zmiany wilgotności są zgodne z doniesieniami literaturowymi na ten temat [17].



Rysunek 11. Pionowe profile wilgotności podczas wznoszenia i opadania dla fazy I: A: II misja – wznoszenie; B: III misja – wznoszenie; C: III misja – opadanie



Rysunek 12. Pionowe profile wilgotności podczas wznoszenia i opadania dla fazy II: A: II misja – wznoszenie; B: III misja – wznoszenie; C: III misja – opadanie

Legenda: linia czerwona ciągła – regresja wielomianowa, linia pomarańczowa kreskowana – regresja wykładnicza, linia zielona kropkowana – regresja logarytmiczna, linia fioletowa kropkowano-kreskowana – regresja potęgowa.

Faza II z kolei charakteryzuje się dużo bardziej przewidywalnym, opadającym trendem zmian wilgotności (rysunek 12). W tabeli 1 pokazano dla fazy II równania linii regresji, które opisują dane wraz ze współczynnikami determinacji R^2 . Współczynnik determinacji R^2 użyty do analizy krzywych regresji prezentowanych w artykule pionowych profili wilgotności, ciśnienia i temperatury był wyznaczany według wzoru:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (2),$$

gdzie:

N – liczba obserwacji (punktów pomiaru) analizowanych wielkości (np. wilgotności),
 x_i – i -ta obserwacja (zmierzona wartość, np. wilgotności),
 \bar{x} – średnia arytmetyczna z N obserwacji,
 y_i – i -ta wartość wielkości (np. wilgotności) odpowiadająca i -tej obserwacji x_i odczytana z linii regresji,
 \bar{y} – średnia arytmetyczna z N wartości wielkości odczytanych z linii regresji.

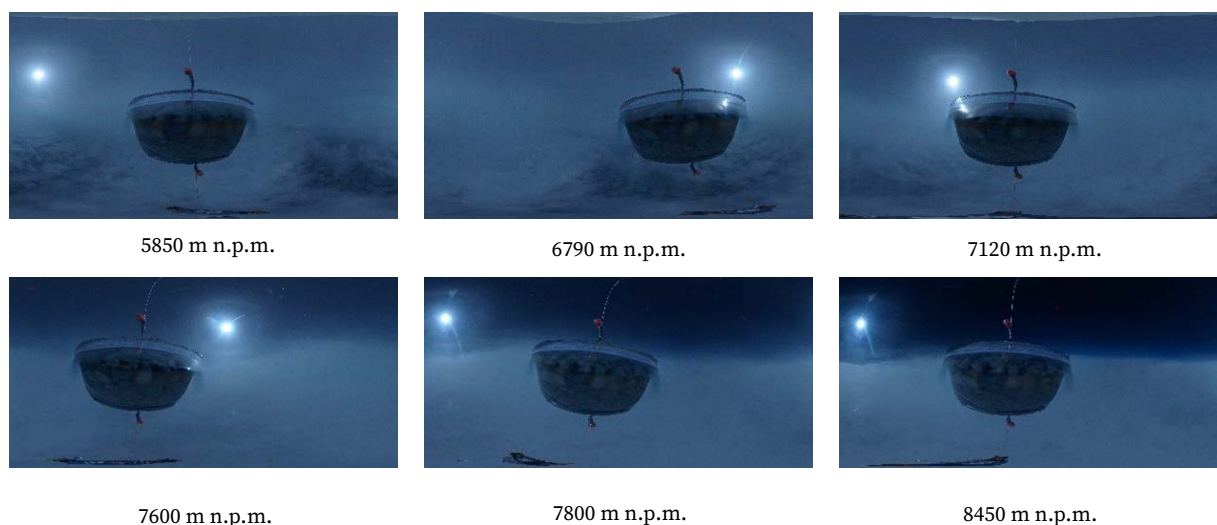
Pomimo widocznych regularnych trendów trudno jest jednoznacznie stwierdzić, która funkcja najlepiej opisuje zależność wilgotności powietrza od wysokości. W przypadku II misji w fazie wznoszenia zmiany najlepiej opisywała funkcja potęgowa. Dla III misji w fazie wznoszenia najlepiej trend opisuje wielomian, a w fazie opadania – funkcja wykładnicza. Biorąc pod uwagę średnią wartość współczynnika determinacji, zależność wilgotności od wysokości najlepiej opisuje funkcja wykładnicza.

Analizując moment, w którym nastąpiło przejście z fazy I do II podczas wznoszenia w II misji warto zauważyć, że przejście do fazy II nastąpiło na wysokości, na której kończyła się ostatnia warstwa chmur, czyli około 7600 m n.p.m. Przebieg przechodzenia sondy przez warstwę chmur jest uwidoczniony na zdjęciach (rysunek 13).

Tabela 1. Zestawienie równań krzywych regresji pionowych profili wilgotności w fazie II wraz z współczynnikami determinacji R^2

	Misja II wznoszenie	Misja III wznoszenie	Misja III opadanie	Średnia wartość R^2
Wielomian [$p =$]	$2E-07h^2 - 0,0068h + 78,663$	$9E-09h^2 - 0,0007h + 14,684$	$8E-09h^2 - 0,0006h + 12,645$	
R^2	0,9354	0,955	0,805	0,898
Funkcja wykładnicza [$p =$]	$71,654e^{-1E-04h}$	$22,077e^{-8E-05h}$	$14,587e^{-6E-05h}$	

	Misja II wznoszenie	Misja III wznoszenie	Misja III opadanie	Średnia wartość R^2
R^2	0,9313	0,9489	0,8727	0,918
Funkcja logarytmiczna [p=]	$-25,01 \cdot \ln(h) + 254,07$	$-6,004 \cdot \ln(h) + 63,78$	$-4,969 \cdot \ln(h) + 53,405$	
R^2	0,8394	0,9535	0,8294	0,874
Funkcja potęgowa [p=]	$3E+09 h^{-2,032}$	$6E+08 h^{-1,903}$	$642 284 h^{-1,22}$	
R^2	0,9831	0,9176	0,821	0,907



Rysunek 13. Obrazy zarejestrowane przez kamerę 360° na różnych wysokościach podczas pokonywania przez radiosondę warstwy chmur w trakcie wznoszenia w czasie trwania II misji

Pionowe profile ciśnienia

Podczas II i III misji sonda wykonywała pomiary ciśnienia atmosferycznego za pomocą czujnika Bosch BME280 o zakresie pracy 300–1100 hPa. Otrzymane

wyniki są zbliżone do orientacyjnych wartości ciśnienia atmosferycznego zarejestrowanego dla przykładowych wysokości nad poziomem morza [14]. Zestawienie pomiarów przedstawiono w tabeli 2.

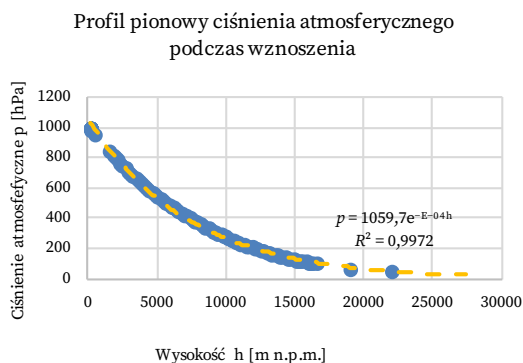
Tabela 2. Zestawienie wyników pomiarów ciśnienia w misjach II i III z orientacyjnymi wartościami ciśnienia dla różnych wysokości [14]

Przykład	Wartości orientacyjne		Zarejestrowane pomiary			
			Misja II		Misja III	
	Wysokość [m n.p.m.]	Ciśnienie [hPa]	Wysokość [m n.p.m.]	Ciśnienie [hPa]	Wysokość [m n.p.m.]	Ciśnienie [hPa]
Rabka-Zdrój	500	954,61	486	959	476	970
Kuźnice	1000	898,76	1061	898	1055	906
Pilsko	1500	845,58	1636	837	1468	863
Kasprowy Wierch	2000	794,98	2018	799	2003	810
Rysy	2500	746,98	2574	747	2543	758

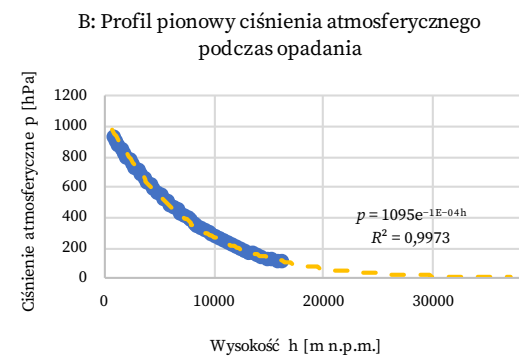
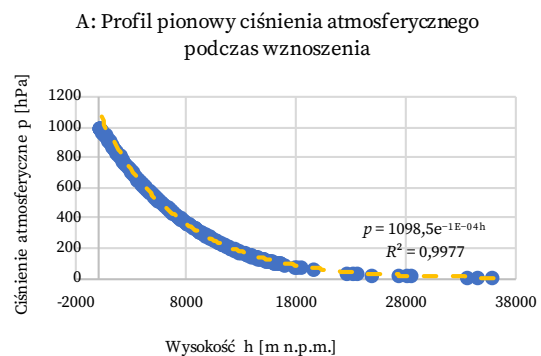
Przykład	Wartości orientacyjne		Zarejestrowane pomiary			
	Wysokość [m n.p.m.]	Ciśnienie [hPa]	Misja II		Misja III	
			Wysokość [m n.p.m.]	Ciśnienie [hPa]	Wysokość [m n.p.m.]	Ciśnienie [hPa]
Zugspitze	3000	701,12	2981	711	2962	720
Lhasa	3500	657,68	3512	666	3464	676
Piz Bernina	4000	616,45	4067	621	4020	631
Matterhorn	4500	577,33	4532	586	4451	598
Ararat	5000	540,25	5119	544	5031	557
Kilimandżaro	6000	471,87	6094	480	6018	489
Aconcagua	7000	410,66	7028	424	6983	431
Sziszapangma	8000	356,06	7978	373	8014	375
Mount Everest	9000	307,48	8948	325	9024	326
Samoloty (FL 330)	10000	264,42	10059	278	10016	283
Samoloty (FL 360)	11000	226,37	10987	241	11053	243

Z tabeli 2 można wywnioskować, że pomiary z II misji były średnio wyższe o 10 hPa, a w III misji wyniki były wyższe o 20 hPa od wartości orientacyjnych.

Kiedy ciśnienie atmosferyczne spada poniżej 100 hPa, występują przerwy w działaniu czujnika BME280. Wartości ciśnienia są wówczas wysyłane nieregularnie w dużych odstępach czasowych. Najprawdopodobniej spowodowane jest to znacznym przekroczeniem zakresu prawidłowego działania sensora, dla którego minimalne ciśnienie wynosi teoretycznie 300 hPa. Jednakże czujnik zdołał wysłać pojedyncze ramki, gdzie można odczytać minimalne ciśnienie około 9–10 hPa, na wysokości 35–36 km n.p.m., co mieści się w zakresie typowych wartości na tej wysokości [25]. Wykresy przedstawiające pionowe profile ciśnienia atmosferycznego dla II i III misji są przedstawione odpowiednio na rysunkach 14 i 15.



Rysunek 14. Pionowy profil ciśnienia atmosferycznego dla II misji stratosferycznej podczas wznoszenia się balonu



Rysunek 15. Pionowe profile ciśnienia atmosferycznego dla III misji stratosferycznej: a) faza wznoszenia, b) faza opadania

Ze względu na to, że w porównaniu z wykładniczymi krzywymi regresji inne krzywe dawały znacząco mniejsze współczynniki determinacji R^2 lub miały przebieg

znacznie odbiegający od teoretycznego (dla pewnych zakresów wysokości), zatem uznano, że wykładnicze krzywe regresji najlepiej reprezentują trendy zmian ciśnienia atmosferycznego w zależności od wysokości

nad poziomem morza. Równania wykładniczych krzywych regresji wraz ze współczynnikami R^2 przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie równań krzywych regresji pionowych profili ciśnienia dla II i III misji stratosferycznej wraz z współczynnikami determinacji R^2

	Misja II wznoszenie	Misja III wznoszenie	Misja III opadanie	Średnia wartość R^2
Funkcja wykładnicza [p =]	$1059,7e^{-1E-04h}$	$1098,5e^{-1E-04h}$	$1095e^{-1E-04h}$	
R^2	0,9972	0,9977	0,9973	0,9974

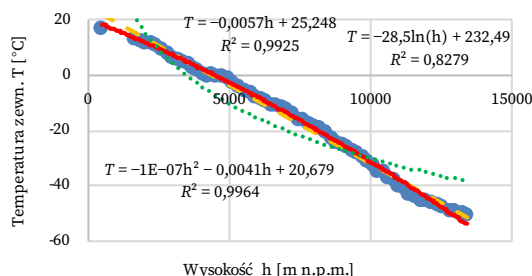
Pionowe profile temperatury otoczenia

Pomiary temperatury zewnętrznej zostały wykonane w trakcie II i III misji. Średnia temperatura przed startem radiosondy w II misji wynosiła 21,68°C. Z powodów opisanych w podrozdziale *Wilgotność względna* pomiary temperatury zewnętrznej przeanalizowano dopiero od wysokości 486 m n.p.m. Pionowe profile wysokości wraz z liniami regresji są przedstawione na rysunku 16. W przypadku fazy opadania udało się zarejestrować jedynie pięć początkowych pomiarów, natomiast po wylądowaniu czujnik wskazywał temperaturę równą 0°C, co ewidentnie świadczyło o jego awarii. Dlatego też pomiarów temperatury zewnętrznej dla II misji w fazie opadania nie uwzględniono w analizie. W początkowej fazie wznoszenia temperatura opadała w sposób w przybliżeniu liniowy ($R^2 = 0,9925$) od wartości 17,6°C na wysokości 486 m n.p.m. do wartości -50,3°C na wysokości 13 413 m n.p.m. Gradient temperatury wyniósł około -0,005253°C/m. Wskazuje to na wilgotno-adiabatycki gradient temperatury (co wydaje się potwierdzać deszczową pogodę w czasie misji). Natomiast w fazie wznoszenia powyżej 13 413 m n.p.m., kiedy nastąpiła inwersja temperatury, temperatura rosła również w przybliżeniu liniowo ($R^2 = 0,9621$), a końcowa jej wartość wyniosła -22,3°C na wysokości 27 436 m n.p.m. Gradient temperatury wyniósł 0,00196°C/m.

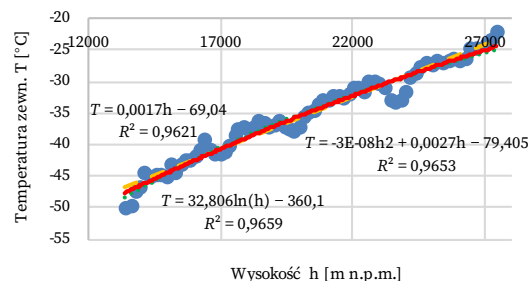
W trakcie III misji średnia temperatura przed startem wyniosła 22,19°C. Pomiary dla temperatury zewnętrznej w trakcie wznoszenia analizowano od wysokości 266 m n.p.m. Pionowe profile wysokości wraz z liniami regresji są przedstawione na rysunku 17. W początkowej fazie wznoszenia temperatura spadała w sposób w przybliżeniu liniowy ($R^2 = 0,9957$) od wartości 23,8°C na wysokości 266 m n.p.m. do wartości -43,1°C na wysokości 13175 m n.p.m.. Gradient temperatury wyniósł około

-0,00518°C/m, co podobnie jak w II misji wskazuje na wilgotno-adiabatycki gradient temperatur. Natomiast w fazie wznoszenia powyżej 13 175 m n.p.m., gdzie nastąpiła inwersja temperatury, temperatura rosła również w przybliżeniu liniowo ($R^2 = 0,9839$), a końcowa jej wartość wyniosła 1,3°C na wysokości 36 969 m n.p.m. Gradient temperatury wyniósł 0,001866°C/m.

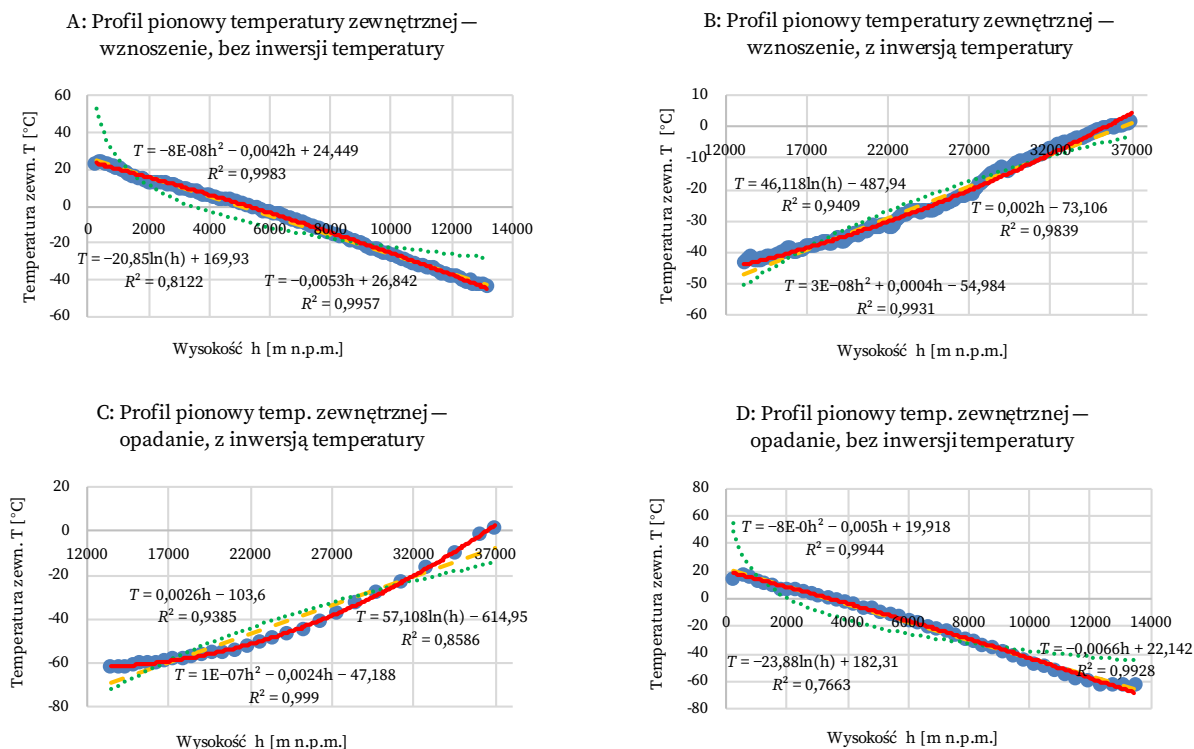
A: Profil pionowy temperatury zewnętrznej – wznoszenie, bez inwersji temperatury



B: Profil pionowy temperatury zewnętrznej – wznoszenie, z inwersją temperatury



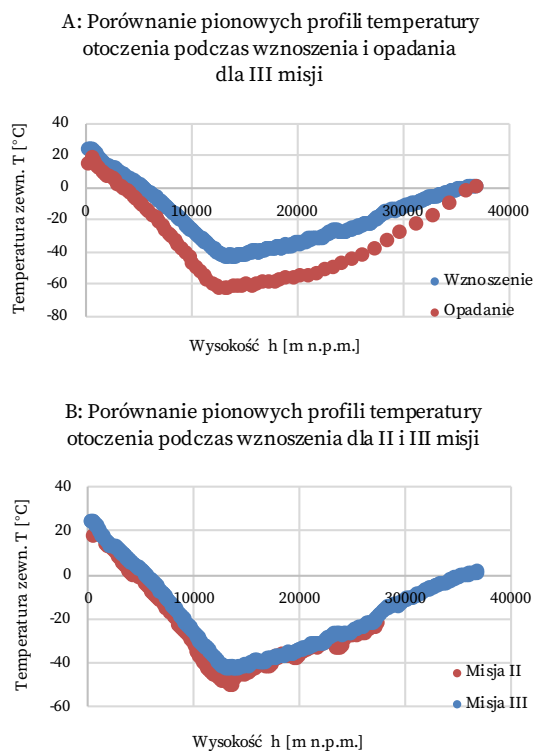
Rysunek 16. Pionowe profile temperatury zewnętrznej dla II misji stratosferycznej podczas wznoszenia się balonu: A: faza wznoszenia dla mniejszych wysokości (bez inwersji temperatury); B: faza wznoszenia dla większych wysokości (z inwersją temperatury)



Rysunek 17. Pionowe profile temperatury zewnętrznej dla III misji: A: faza wznoszenia bez inwersji temperatury; B: faza wznoszenia z inwersją temperatury; C: faza opadania z inwersją temperatury; D: faza opadania bez inwersji temperatury

Legenda: Krzywe regresji: linia pomarańczowa przerywana – funkcja liniowa, linia czerwona ciągła – funkcja kwadratowa, linia zielona kropkowana – funkcja logarytmiczna.

Podczas opadania radiosondy od wysokości 36 969 m n.p.m. do wysokości 13 469 m n.p.m. temperatura spadła od 1,3°C do -61,7°C. Jednak trend opadania był kwadratowy ($R^2 = 0,999$), tzn. zmiany temperatury na początku fazy opadania były większe niż w końcowej fazie wspomnianego zakresu wysokości. Można to wytłumaczyć dużą prędkością opadania radiosondy w początkowej fazie (około 300 km/h), ze względu na małą gęstość powietrza i niewielki opór aerodynamiczny spadochronu. Z kolei duża prędkość opadania powodowała zwiększone schładzanie się czujnika BMP 280. Wraz ze zmniejszaniem się prędkości spadania szybkość schładzania została spowolniona. Temperatura w zakresie wysokości od 13 469 m n.p.m. do 203 m n.p.m. wzrosła z -61,7°C do 15,3°C. Gradient temperatury wyniósł $-0,005804^\circ\text{C}/\text{m}$, czyli był większy niż analogiczny gradient w fazie wznoszenia. Porównanie profili pionowych temperatury między fazą wznoszenia i opadania dla III misji zostało przedstawione na rysunku 18a, natomiast pomiędzy misją II a III dla fazy wznoszenia na rysunku 18b.



Rysunek 18. Porównanie pionowych profili temperatury otoczenia dla: A: III misji podczas wznoszenia i opadania; B: II i III misji stratosferycznej podczas wznoszenia

W celu wyznaczenia krzywych regresji podzielono profile pionowe temperaturowe podczas wznoszenia i opadania sondy na zakres wysokości bez inwersji temperatury i z inwersją temperatury, a następnie dokonano aproksymacji. Wyniki przedstawiono w tabelach 4 i 5. W zakresie wysokości bez inwersji temperatury (tabela 4) zarówno podczas wznoszenia, jak i opadania uzyskano bardzo dobrą aproksymację zależności temperatury od wysokości za pomocą funkcji kwadratowej (średni $R^2 = 0,9964$) i nieznacznie gorszą za pomocą funkcji liniowej (średni $R^2 = 0,9937$). Ze względu na wysoki R^2 i jednocześnie prostotę matematycznego opisu,

funkcja liniowa wydaje się najlepszą krzywą regresji. Aproksymacja funkcją logarytmiczną dała dużo gorsze rezultaty (średni $R^2 = 0,8758$).

W zakresie wysokości z inwersją temperatury aproksymacja zależności temperatury od wysokości była ogólnie znacząco gorsza, o czym świadczą niższe współczynniki determinacji R^2 krzywych regresji w porównaniu zakresem wysokości bez inwersji temperatury. Jednakże warto odnotować, że w przypadku kwadratowej krzywej regresji dla III misji podczas opadania uzyskano bardzo dobrą aproksymację ($R^2 = 0,999$).

Tabela 4. Zestawienie równań krzywych regresji pionowych profili temperatury zewnętrznej wraz z współczynnikami determinacji R^2 dla zakresu wysokości bez inwersji temperatury

	Misja II wznoszenie	Misja III wznoszenie	Misja III opadanie	Średnia wartość R^2
Funkcja liniowa [T=]	$-0,0057h + 25,248$	$-0,0053h + 26,842$	$-0,0066h + 22,142$	
R^2	0,9925	0,9957	0,9928	0,9937
Wielomian [T=]	$-1E-07h^2 - 0,0041h + 20,679$	$-8E-08h^2 - 0,0042h + 24,449$	$-8E-08h^2 - 0,0055h + 19,918$	
R^2	0,9964	0,9983	0,9944	0,9964
Funkcja logarytmiczna [T=]	$-28,5 \cdot \ln(h) + 232,49$	$46,118 \cdot \ln(h) - 487,94$	$-23,88 \cdot \ln(h) + 182,31$	
R^2	0,8279	0,9409	0,8586	0,8758

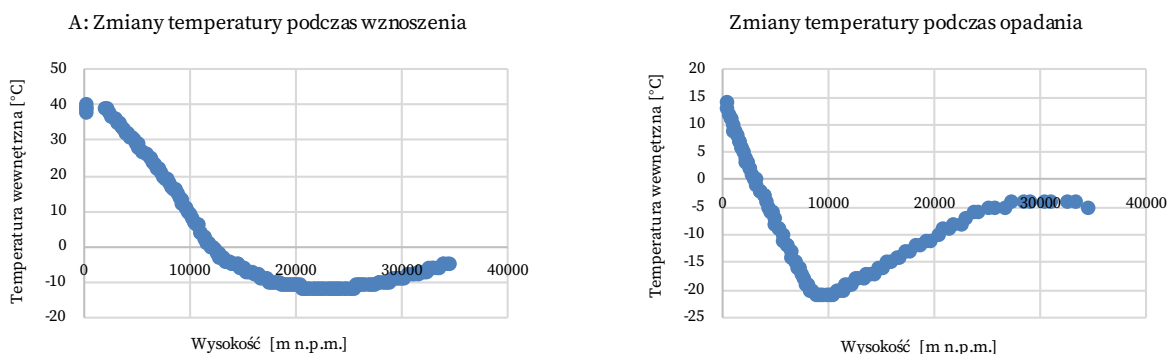
Tabela 5. Zestawienie równań krzywych regresji pionowych profili temperatury zewnętrznej wraz z współczynnikami determinacji R^2 dla zakresu wysokości z inwersją temperatury

	Misja II wznoszenie	Misja III wznoszenie	Misja III opadanie	Średnia wartość R^2
Funkcja liniowa [T=]	$0,0017h - 69,04$	$0,002h - 73,106$	$0,0026h - 103,6$	
R^2	0,9621	0,9839	0,9385	0,9615
Wielomian [T=]	$-3E-08h^2 + 0,0027h - 79,405$	$3E-08h^2 + 0,0004h - 54,984$	$1E-07h^2 - 0,0024h - 47,188$	
R^2	0,9653	0,9931	0,999	0,9858
Funkcja logarytmiczna [T=]	$32,806 \cdot \ln(h) - 360,1$	$46,118 \cdot \ln(h) - 487,94$	$57,108 \cdot \ln(h) - 614,95$	
R^2	0,9659	0,9409	0,8586	0,9218

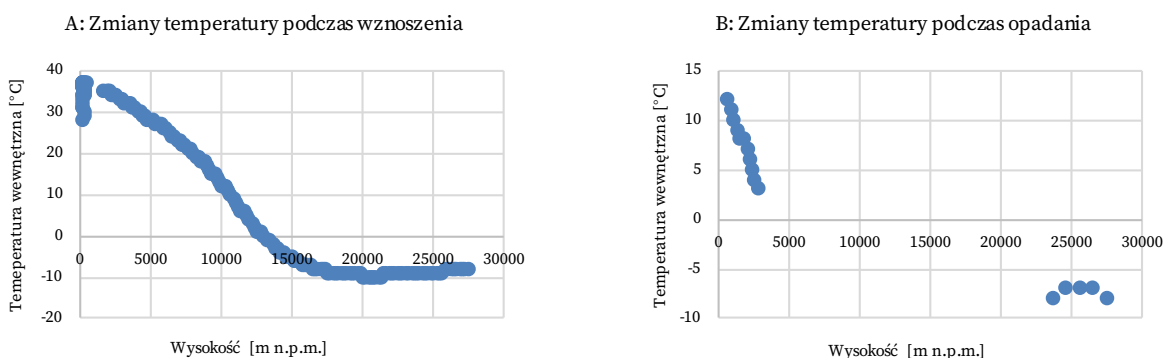
Pionowe profile temperatury wewnątrz kapsuły

Pomiary temperatury wewnętrznej zostały przedstawione na rysunkach 19–21. Pomiarów tych dokonano za pomocą wbudowanego czujnika temperatury w procesorze STM32F100C8T6. Wbudowany czujnik temperatury

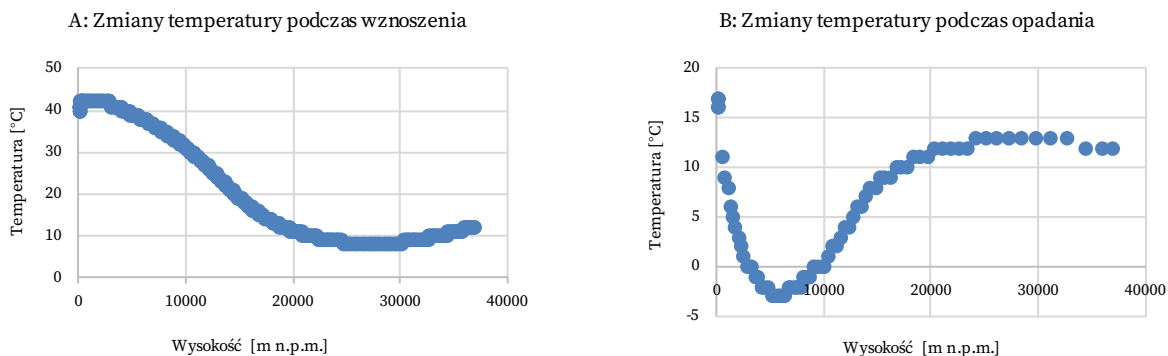
posiada rozdzielczość pomiarów na poziomie $0,2^\circ\text{C}$ [26, 27]. Na skutek ograniczenia systemów transmisji danych Horus V2 oraz APRS rozdzielczość pomiarów została ograniczona do 1°C [28]. Należy również wspomnieć, że błąd pomiaru wynikający z błędów przetwarzania przetwornika AC w procesorze STM32F100C8T6 może wynieść maksymalnie $\pm 3,17^\circ\text{C}$, a typowo $\pm 1,53^\circ\text{C}$ [27].



Rysunek 19. Pionowe profile temperatury wewnątrz kapsuły dla I misji podczas: A: wznoszenia; B: opadania



Rysunek 20. Pionowe profile temperatury wewnątrz kapsuły dla II misji podczas: A: wznoszenia; B: opadania



Rysunek 21. Pionowe profile temperatury wewnątrz kapsuły dla III misji podczas: A: wznoszenia; B: opadania

Jak można zauważyć, we wszystkich trzech misjach podczas wznoszenia temperatura wewnętrzna spadała, osiągając swoje pierwsze minimum na wysokości 25–28 km, a następnie lekko rosła. Podczas opadania temperatura wewnętrzna spadała, dopóki nie osiągnęła drugiego minimum na wysokości 10–5 km. Widoczny wpływ na temperaturę wewnętrzną miały zmiany temperatury zewnętrznej, których trend z pewnym opóźnieniem był widoczny w zmianach temperatury

wewnętrznej. Na temperaturę wewnętrzną wpływało jednak również wydzielanie się ciepła z aparatury elektronicznej (głównie procesora) oraz izolacja kapsuły. Warto zauważyć, że ze względu na coraz lepszą izolację termiczną w kolejnych misjach zwiększała się minimalna temperatura wewnętrzna. W I misji (najśłabsza izolacja termiczna) osiągnęła ona wartość -21°C , w II misji -14°C , natomiast w III misji (najlepsza izolacja termiczna) wyniosła -3°C .

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów ciśnienia, temperatury i wilgotności w troposferze i stratosferze uzyskane w trzech misjach stratosferycznych. Wyniki pomiarów w dużym stopniu potwierdzają ogólnie znane zależności parametrów fizycznych od wysokości w m n.p.m., jednakże wymagają one bardziej szczegółowej analizy, która zostanie dokonana w toku dalszych prac. Wyniki pomiarów pozwoliły również na ewaluację użytego w misjach sprzętu elektronicznego oraz pozyskanie informacji na temat jego słabych punktów, co zostanie wykorzystane do udoskonalania aparatury badawczej. Misje dostarczyły również danych na temat warunków pracy urządzeń elektronicznych, co może być przydatne dla inżynierów chcących projektować aparaturę do pracy w bliskiej przestrzeni kosmicznej. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu nie dokonano analizy niektórych danych, np. zmian napięcia w funkcji temperatury wewnętrznej, analizy obrazów otrzymanych z kamery 360°, parametrów transmisji radiowej oraz wartości promienionowania pomierzonego licznikiem Geigera. Analiza ta będzie przedmiotem dalszych prac.

Podziękowania

Autorzy składają serdeczne podziękowania obecnym i byłym studentom Akademii Tarnowskiej zrzeszonym w SKNE „Amper”: Jakubowi Chruszczowi, Łukaszowi Ciężadło (członkowi OSP Jodłówka-Wałki), Tomaszowi Jamro, Paulinie Knapczyk, Erykowi Lisowskiemu, Piotrowi Moryłowi, Piotrowi Nowakowi, Dawidowi Olszówce, Tomaszowi Pruchnickiemu, Konradowi Schabowi, Ewie Serafińskiej, Piotrowi Wojtanowskiemu; pracownikom Akademii Tarnowskiej: dr. inż. Jackowi Jasielskiemu, dr. inż. Wojciechowi Żyłce, dr. inż. Łukaszowi Mikowi; członkowi Zarządu Tarnowskiego Klubu Krótkofalowców i Modelarzy SP9KAO Waldemarowi Krauze (SP5GFN), członkom Ochotniczej Straży Pożarnej Jodłówka-Wałki: Sebastianowi Olszówce, Magdalenie Ciężadło, Mateuszowi Ciężadło, Dawidowi Brygowi, Bartoszowi Chudybie, oraz wszystkim innym niewymienionym tu osobom za pomoc i wsparcie w realizacji pierwszych trzech misji stratosferycznych Akademii Tarnowskiej.

Bibliografia

- [1] Wzloty do stratosfery na balonach. Tłum. J. Bloch. Przegląd Lotniczy. 1937;2:215.
- [2] Matuszak T. „Gwiazda Polski”: próba pierwszego polskiego lotu stratosferycznego. Piotrkowskie Zeszyty Historyczne. 2004;6:141–154.
- [3] Wolfke M. Zagadnienia naukowe lotów stratosferycznych. Przegląd Mechaniczny. 1938;94(7–8):3–12.
- [4] Flight altitude record. In: Wikipedia: The Free Encyclopedia [Internet; cited 2023 Oct. 20]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_altitude_record.
- [5] Alan Eustace and the Paragon StratEx Team make stratospheric exploration history at over 135,000 feet. [Internet; cited 2023 Oct. 20]. Available from: <https://www.paragonsdc.com/stratex>.
- [6] Japanese startup Iwaya Giken Joins Space Tourism Race, promises a 25 km stratospheric travel in helium balloon to get stunning views of Earth. [Internet]. 2023 [cited 2023 Oct. 20]. Available from: <https://swarajyamag.com/science/japanese-startup-iwaya-giken-joins-space-tourism-race-promises-a-25-km-stratospheric-travel-in-helium-balloon-to-get-stunning-views-of-earth>.
- [7] Reserve your life-changing journey to the edge of space today. [Internet; cited 2023 Oct. 20]. Available from: <https://spaceperspective.com>.
- [8] Cyga-Karpiński T. Zagadnienia lotnictwa stratosferycznego. Skrzydłata Polska 1934;2:35.
- [9] A brief history of upper-air observations. [Internet; cited 2023 Oct. 20]. <https://www.weather.gov/upperair/reqdahdr>.
- [10] Zabłocki G, Biszczuk-Jakubowska J. Od latawców, po automaty. Historia polskiej aerologii. Obserwator: magazyn popularnonaukowy. [Internet]. 2022 [cited 2023 Oct. 20]. Available from: <https://obserwator.imgw.pl/2022/08/03/od-latawcow-po-automaty-historia-polskiej-aerologii>.
- [11] Durre I, Yin X, Vose RS, Applequist S, Arnfield J. Enhancing the data coverage in the Integrated Global Radiosonde Archive. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2018;35(9):1753–1770. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0223.1>.
- [12] SQ6KXY Radiosonde Tracker Database. [Internet; cited 2023 Oct. 20]. Available from: <https://radiosondy.info>.
- [13] Sondehub. [Internet; cited 2023 Oct. 22]. Available from: <https://sondehub.org>.
- [14] Atmosfera Ziemi. In: Wikipedia: wolna encyklopedia. [Internet; cited 2023 Oct. 22]. Available from: https://pl.wikipedia.org/wiki/Atmosfera_Ziemi.
- [15] Wzór barometryczny. In: Wikipedia: wolna encyklopedia. [Internet; cited 2023 Oct. 22]. Available from: https://pl.wikipedia.org/wiki/Wzór_barometryczny.
- [16] Profil pionowy atmosfery. In: Zintegrowana Platforma Edukacyjna ministerstwa Edukacji Narodowej. [Internet; cited 2023 Oct. 22]. Available from: <https://zpe.gov.pl/b/profil-pionowy-atmosfery/P8VsASUVO>.
- [17] Turgut ET, Usanmaz Ö. An analysis of vertical profiles of wind and humidity based on long-term radiosonde

- data in turkey. *AUJST-A*. 2016;17(5):830–844. <https://doi.org/10.18038/aubtda.279852>.
- [18] Popkiewicz M, Kardaś A, Malinowski S. Efekt cieplarniany dla średniozaawansowanych (1): Termiczna struktura atmosfery. In: *Nauka o klimacie dla sceptycznych*. [Internet]. 2020 [cited 2023 Oct. 22]. Available from: <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/efekt-cieplarniany-dla-sredniozaawansowanych-1-termiczna-struktura-atmosfery-408>.
- [19] Antosz J, Arabik R, Jasielski J, Witek M, Ciężadło Łukasz. Stratospheric missions of the University of Applied Sciences in Tarnow: Part 1: Hardware and software. *Science, Technology and Innovation*. 2023;18(3–4):30–45. <https://doi.org/10.55225/sti.565>.
- [20] BME280 Data sheet. [Internet]. 2018. [cited 2023 Oct. 22]. Available from: <https://www.mouser.com/data-sheet/2/783/BST-BME280-DS002-1509607.pdf>.
- [21] Badanie wpływu warunków panujących w stratosferze na kiełkowanie nasion i wzrost siewek rzeżuchy oraz na położenie tłoka w strzykawce. In: *Zespół Szkół Technicznych im. I. Mościckiego w Tarnowie – Mościcach*. [Internet]. 2023 [cited 2023 Oct. 22]. Available from: https://zst-tarnow.pl/badanie-wplywu-warunkow-panujacych-w-stratosferze-na-kielkowanie-nasion-i-wzrost-siewek-rzezuchy-oraz-na-polozenie-tloka-w-strzykawce/?fbclid=IwAR3k_MEl4VStOpPBHym57mVuWcLGF8PHwmaSX-7mIEfPsEFwTiwE3_cj8lAg.
- [22] Post Zespół Szkół Technicznych w Tarnowie. In: Facebook. [Internet] 2023 [cited 2023 Oct. 30]. Available from: <https://www.facebook.com/zst.tarnow/posts/pfbid02muYqRs-JgU9e68pHANhHXuJFrJt5BXFh3Pw12hQcwwd5U1AEf-ngxsKFE2Ti7upKqHl>.
- [23] Badania koła fizycznego ZSME. In: *Zespół Szkół Mechaniczno-Elektrycznych w Tarnowie*. [Internet] 2023 [cited 2023 Oct. 30]. Available from: <https://zsme.tarnow.pl/wp/badania-kola-fizycznego-zsme>.
- [24] Grafana. [Internet; cited 2023 Oct. 22]. Available from: https://grafana.v2.sondehub.org/d/HJgOZLq7k/basic?var-Payload=SP5GFN&from=1695997800000&to=1696006800000&orgId=1&fbclid=IwZXh0bgNhZW0C-MTAAAR2mq8RCY-WFupC6ecuYeMqXW6l7Dsf68x-MY6vWk1ql0DvDjs1pFhNiOLD4_aem_AdCAiHPmqN-7BTMIQ_nCcWkDvoP_u0fwEfMXwLva71Cz9dxjvC_lAc-QkT7rRIOcG1N0dJA1mH1AkUsGrzNUFSzM_.
- [25] Rozkład ciśnienia atmosferycznego na Ziemi i jego konsekwencje. In: *Zintegrowana Platforma Edukacyjna ministerstwa Edukacji Narodowej*. [Internet; cited 2023 Oct. 30]. Available from: <https://zpe.gov.pl/a/przeczytaj/DdsOy9ZRb>.
- [26] RM0041 Reference manual, STM32F100xx advanced Arm®-based 32-bit MCUs. [Internet]. 2022 [cited 2023 Oct. 22]. Available from: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0041-stm32f100xx-advanced-arm-based-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf.
- [27] STM32F100x4 STM32F100x6 STM32F100x8 STM32F100xB: Low & medium-density value line, advanced ARM®-based 32-bit MCU with 16 to 128 KB Flash, 12 timers, ADC, DAC & 8 comm interfaces. [Internet]. 2016 [cited 2024 Oct. 22]. Available from: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f100cb.pdf>.
- [28] Jessop M. 4PacketFormatDetails. [Internet]. 2023 [cited 2023 Oct. 22]. Available from: <https://github.com/projecthorus/horusdemodlib/wiki/4-Packet-Format-Details>.