

AD ASTRA

Program badań nad astropolityką
i prawem kosmicznym

Nr 5/2022

Budowanie zdolności kosmicznych w zakresie obserwacji Ziemi – stan obecny oraz perspektywy rozwojowe

Building space capacity for Earth observation – current status and development prospects

DOI: 10.53261/adastra20220505

dr inż. Radosław Bielawski

Instytut Techniki Lotnictwa i Mechaniki Stosowanej Wydziału Mechanicznego, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej
<https://orcid.org/0000-0002-5701-4476>

WPROWADZENIE

Uznanie pod koniec 2019 roku przestrzeni kosmicznej za nowy obszar działań operacyjnych wojsk – piątą domenę walki – stało się początkiem rozwijania różnych zdolności operacyjnych. Oprócz tych z zakresu pozycjonowania, nawigacji i synchronizacji czasu, komunikacji satelitarnej, monitorowania środowiska atmosferycznego czy wczesnego ostrzegania, podczas realizacji zadań o charakterze militarnym ważną jest zdolność obserwacji Ziemi. Początkowo była ona wykorzystywana głównie w kartografii, lecz nowe możliwości satelitarne związane między innymi z wyższymi parametrami optycznymi pozwalają na poszerzenie możliwości wykorzystania tych zasobów. Obecnie zdolności satelitarnej obserwacji Ziemi wykorzystywane są do monitorowania sprzętu wojskowego, czy przemieszczania się wojsk, a w przyszłości w połączeniu z dużą ilością danych dostarczanych z rozproszonych źródeł i sztuczną inteligencją możliwe będzie wykorzystywanie tych systemów w autonomicznym wykrywaniu zagrożeń.

Celem artykułu jest przedstawienie zdolności kosmicznych obserwacji Ziemi i ich obecne i przyszłe wykorzystanie w różnych obszarach, w tym w działaniach sił zbrojnych. W dociekaniach naukowych wykorzystano teoretyczne metody badawcze – analizę, syntezę i uogólnienie.

1. CHARAKTERYSTYKA I MILITARNE UWARUNKOWANIA WYKORZYSTANIA SYSTEMÓW OBSERWACJI ZIEMI

Satelitarna obserwacja Ziemi (Earth Observation – EO) jest zdolnością realizowaną zazwyczaj przez satelity teledetekcyjne, krążące po orbicie okołoziemskiej, które w sposób optyczny, radiolokacyjny lub za pomocą podczerwieni zbierają dane geoprzestrzenne. Dane te są w dalszej kolejności przetwarzane i odpowiednio rozpowszechniane. Pierwsze tego typu obiekty satelitarne użyte były w latach 60. XX wieku. Początkowo zdolne były do wykonywania krótkich misji, których efektem były zdjęcia wykonane techniką analogową oraz materiały video. Obecnie krążące satelity systemów EO są zdolne do wykonywania długotrwałych (kilkuletnich) misji, dostarczając produkty kosmiczne w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego.

Systemy obserwacji Ziemi odznaczają się parametrami, do których głównie należą rozdzielczości: przestrzenna i czasowa. Parametry te definiują możliwości zastosowania systemów EO. Rozdzielczość przestrzenna (zwana także terenową) wyrażana jest poprzez odległość próbki gruntu (Ground Sample Distance – GSD). Definiuje się ją jako odległość pomiędzy środkami dwóch sąsiednich pikseli mierzona na Ziemi i wyraża się ją w centymetrach/metrach na piksel (cm(m)/px). Innymi słowy rozdzielczość przestrzenna jest właściwością pozwalającą na oszacowanie dokładności zobrazowania terenu, a w ujęciu militarnym możliwość dokonania detekcji, rozpoznania i identyfikacji elementów fotografowanych na Ziemi. Dla dużych elementów, typu most zakłada się następujące wartości: detekcja – 6m/px, rozpoznanie – 4,5m/px, identyfikacja – 1,5m/px. Dla elementów mniejszych np. samolot są to odpowiednio wartości: 4,5 m/px, 1,5 m/px, 0,15 m/px¹. Wartość rozdzielczości przestrzennej można wyznaczyć analitycznie znając dane: wysokość, szerokość sensora kamery, ogniskową kamer, szerokość obrazu i jego wysokość. Kolejnym parametrem systemów obserwacji Ziemi jest rozdzielczość czasowa. Wyrażana jest ona różnicą czasu jaki mija pomiędzy kolejnymi zobrazowaniami tego samego obszaru zainteresowania. Zależy ona od kilku czynników, takich jak: liczba satelitów systemu, rodzaj i parametry orbity, szerokość geograficzna obszaru zainteresowania².

Zastosowanie systemów obserwacji Ziemi jest obecnie bardzo szerokie. Przykłady zastosowania wraz z charakterystyką przedstawiono w tabeli poniżej (Tabela 1).

Tabela 1. Wybrane zastosowania i zdolności systemów obserwacji Ziemi

Lp.	Zastosowanie	Wymagania	Uwagi
1	badania klimatu, prognozowanie pogody	wysoka aktualność danych, wysoka rozdzielczość przestrzenna	brak
2	geologia, rolnictwo – badania rodzajów upraw i polonów	rozdzielczość przestrzenna powyżej 10 m/px, niska rozdzielczość czasowa w skali miesięcznej i kilkumiesięcznej	Satelity Sentinel 2 systemu Copernicus
3	rolnictwo precyzyjne, monitorowanie pokrycia terenu	rozdzielczość przestrzenna w granicach 1÷10 m/px, rozdzielczość czasowa w skali kilka razy/miesiąc	satelity wysokiej rozdzielczości HR
4	reagowanie w sytuacjach kryzysowych, sektor obronny	rozdzielczość przestrzenna poniżej 1 m/px, wąskie pasy zobrazowania do kilku kilometrów, konstelacje wielosatelitarne – od kilku do kilkunastu satelitów	satelity bardzo wysokiej rozdzielczości VHR

Z punktu widzenia militarnego systemu obserwacji Ziemi spełniają następujące funkcje: ocena strat, śledzenie ruchu wojsk, wykrywanie i identyfikowanie celów, opracowywanie map³. Pomimo, że obecnie widoczny jest trend do podwójnego wykorzystania (cywilno-wojskowego)⁴ systemów satelitarnych, to do użycia wojskowego muszą one spełniać kilka wymogów. Każda firma, która chce wystrzelić i eksploatować satelitę w celu rozpowszechniania danych zobrazowania Ziemi, musi wystąpić o zgodę do swojego rządu. Na przykład w USA systemy takie muszą uzyskać licencję na komercyjną obsługę od Narodowej Służby Oceanicznej i Atmosferycznej (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA), która to w tym przypadku pełni rolę koordynatora między agencjami rządowymi. Jej rola polega na sprawdzeniu zgodności licencji z zasadami bezpieczeństwa narodowego i polityki zagranicznej USA. Oprócz licencji istnieje kilka zasad, które w przypadku partycypacji w militarne zdolności EO podmiotów prywatnych muszą być przestrzegane. Po pierwsze wymaga się ograniczenia rozpowszechniania obrazów panchromatycznych o rozdzielczości lepszej niż 0,5 m/px lub obrazów wielospektralnych o rozdzielczości wyższej niż 2,0 m/px⁵ w ciągu 24 godzin od ich pozyskania dla podmiotów innych niż rząd USA. Po drugie rząd zastrzega sobie prawo do stosowania tzw. kontroli migawkowej (shutter control) – przerywania świadczenia usługi przez ograniczenie gromadzenia i dystrybucji produktów kosmicznych, co podyktowane jest względami bezpieczeństwa narodowego oraz interesem narodowym. Po protestach Izraela z 1998 roku zakazane jest rozpowszechnianie zdjęć tego obszaru o rozdzielczości przestrzennej wyższej niż 2,0 m/px. Dodatkowo przedsiębiorstwa prywatne świadczące usługi EO na rzecz rządu USA są zobligowane do posiadania poświadczenia bezpieczeństwa przemysłowego, a personel bezpośrednio zaangażowany w produkty tej usługi do posiadania poświadczenia bezpieczeństwa osobowego.

2. OBECNIE WYKORZYSTYWANE I ROZWIJANE SYSTEMY OBSERWACJI ZIEMI

Jednym z budowanych obecnie systemów obserwacji Ziemi jest zarządzany i koordynowany przez Komisję Europejską unijny program Copernicus. System oparty jest na satelitach rodziny Sentinel, którego pierwsza z nich oznaczona Sentinel-1A wyniesiona została w przestrzeń kosmiczną w 2014 roku. Ukończenie 20 satelitarnej konstelacji przewidziane jest do 2030 roku. Segment naziemny systemu tworzą również czujniki rozlokowane na lądzie, na morzu i w powietrzu. Dużą zaletą rozwijanego systemu jest możliwość archiwizacji dużych ilości pozyskanych danych. Dzięki temu zbiory takie można porównywać z danymi z wcześniejszych lat. Pozwala to na monitorowanie zmian, jak również budowanie wzorców meteorologicznych. System Copernicus traktuje o sześć obszarów tematycznych: atmosfera, środowisko morskie, obszary lądowe, zmiany klimatu, bezpieczeństwo i sytuacje kryzysowe. W zakresie monitorowania atmosfery dostarczana usługa dotyczy pięciu obszarów: jakości powietrza i składu atmosfery (obecność gazów cieplarnianych – dwutlenek węgla, metan i gazy reaktywne, takie jak: tlenek węgla, dwutlenek siarki, a także ozonu i aerozoli), warstwy ozonowej i promieniowania ultrafioletowego, emisji i strumieni powierzchniowych, promieniowania słonecznego, jak również wymuszeń klimatycznych. W zakresie monitorowania środowiska morskiego (Copernicus Marine Environment Monitoring Service – CMEMS) dostarczane są informacje dotyczące: bezpieczeństwa morskiego (prądy morskie, wiatry i lody morskie), zasobów morskich, środowiska przybrzeżnego i morskiego, pogody oraz sezonowych prognoz i klimatu – w tym zmiany temperatury, zasolenie, poziom wód morskich i oceanów.

Serwis monitorowania obszarów lądowych systemu Copernicus (Copernicus Land Monitoring Service – CLMS) obejmuje 5 głównych komponentów, do których zalicza się: systematyczne monitorowanie parametrów biofizycznych, mapowanie pokrycia terenu i użytkowania gruntów w tym mapowanie punktów newralgicznych oraz usługa danych obrazowych i referencyjnych. Oprócz obszarów tematycznych dotyczących atmosfery i środowiska morskiego system Copernicus dostarcza również danych wskazujących na globalne zmiany klimatyczne (Copernicus Climate Change Service – C3S). Za pomocą pozyskanych danych, w połączeniu z modelowaniem powstanie spójny, kompleksowy i wiarygodny opis przyszłego klimatu. Pozwoli on również na opracowanie polityki ochrony ludności przed zagrożeniami związanymi ze zjawiskami pogodowymi o dużej sile oddziaływania, jak również poprawę planowania działań łagodzących i adaptacyjnych w odniesieniu do kluczowych działań ludzkich i społecznych⁶. System Copernicus dostarcza również usługi służące bezpieczeństwu w trzech kluczowych obszarach: ochrona granicy państwowej, nadzór morski, wsparcie działań wewnętrznych UE. W zakresie ochrony granicy, głównym celem systemu jest dostarczanie usług służących zwiększeniu bezpieczeństwa, poprzez walkę z przestępczością transgraniczną oraz monitorowanie imigracji. Nadzór morski w zakresie usług dostarczanych przez system Copernicus ma na celu przeciwdziałanie nielegalnego rybołówstwa oraz zwalczanie zanieczyszczenia morza. Pozyskane dane satelitarne są wykorzystywane między innymi przez Europejską Agencję do spraw Bezpieczeństwa na Morzu (European Maritime Safety Agency – EMSA). Ostatnim z kluczowych obszarów dotyczących bezpieczeństwa jest wsparcie działań zewnętrznych UE. Polega na pomocy państwom trzecim znajdującym się w sytuacji kryzysowej lub w sytuacji zagrożenia kryzysem. Ostatnim – szóstym – obszarem tematycznym systemu Copernicus są sytuacje kryzysowe (Copernicus Emergency Management Service – EMS). Usługa ta składa się z dwóch komponentów – mapowania i wczesnego ostrzegania. Komponent mapowania, o zasięgu ogólnosiwiatowym, stanowi wsparcie we wszystkich etapach cyklu zarządzania sytuacjami kryzysowymi, a więc: zapobieganie, zmniejszanie ryzyka, działanie w sytuacji kryzysu oraz przywracanie stanu wyjściowego. Komponent wczesnego ostrzegania stanowi komasację trzech podsystemów: europejskiego systemu informowania o powodziach (European Flood Awareness System – EFAS), europejskiego systemu informacji o pożarach lasów (European Forest Fire Information System – EFFIS) oraz Europejskiego Obserwatorium ds. Susz (European Drought Observatory – EDO). Kolejnym obecnie dynamicznie rozwijanym, cywilno-wojskowym, systemem obserwacji Ziemi jest Pléiades. Trzonem systemu są satelity bardzo wysokiej rozdzielczości VHR dostarczające obrazy optyczne w wysokiej rozdzielczości przestrzennej i czasowej (Tabela 2).

Tabela 2. Parametry satelitów konstelacji systemu obserwacji Ziemi Pléiades

Lp.	Konstelacja	Szerokość sceny	Rozdzielczość przestrzenna	Rozdzielczość czasowa
1	Pléiades 1A i 1 B	20 km	Panchromatyczna: 50 cm/px Multispektralna: 2 m/px	12h
2	SPOT 6/7	60 km	Panchromatyczna: 1,5 m/px Multispektralna: 6 m/px	12h
3	Pléiades Neo (start XI.2021 r.)	14 km	Panchromatyczna: 30 cm/px Multispektralna: 1,2 m/px	12h

Konstelacja systemu składa się z czterech satelitów Pléiades 1A i 1B oraz SPOT 6 i 7, z których pierwszy wyniesiony został 17 grudnia 2011 roku. System uzupełnia konstelacja Pléiades Neo, złożona z czterech jednakowych satelitów. System posiada wydolność wykonania pół miliona kilometrów kwadratowych zdjęć dziennie, przesyłając je na Ziemię z prędkością 450 mbit/s, a następnie umieszczając je na cyfrowej platformie. Platforma dostarcza usługę natychmiastowego dostępu do aktualnych danych, danych archiwalnych, jak również do obszernych analiz udostępnianego rezerwuaru. Dodatkowym rozwiązaniem jest możliwość zlinkowania systemu Pléiades z geostacjonarnymi satelitami systemu European Data Relay System (EDRS). Umożliwia to pilne pozyskiwanie danych np. na potrzeby zarządzania kryzysowego⁷, które dostępne są w ciągu 40 minut od zgłoszenia. Konstelacja zapewnia również większą dokładność geolokalizacji i szersze informacje o pasmach spektralnych. Pozwoli to na uzyskanie większej ilości informacji dla różnych zastosowań, w tym monitorowanie strategicznych miejsc, działalności handlowej, stref morskich i środowiska, a także mapowania infrastruktury i rozwoju miast. Dane pozyskane z systemu pozwalają również na tworzenie wiarygodnych teksturowanych modeli 3D i Cyfrowych Modeli Elewacji (Digital Elevation Model – DEM). W zastosowaniach wojskowych system obserwacji Ziemi Pléiades pozwala na tworzenie map topograficznych w skali do 1:2000 z możliwością częstych ich aktualizacji.

Innym obecnie eksploatowanym systemem EO jest RapidEye (BlackBridge) – konstelacja satelitów przeznaczona jest do komercyjnej obserwacji Ziemi. Składa się ona z pięciu mini satelitów orbitujących na wysokości 630 km, posiadających takie same wartości kalibracyjne. Taka konfiguracja pozwala na uzyskanie obrazów o wysokiej rozdzielczości przestrzennej, przy jednoczesnym pokryciu relatywnie większych fragmentów powierzchni Ziemi. Satelity systemu są nosicielami systemu obrazowania opartego na matrycy światłoczułej CCD (Charge-Coupled Device). Zawiera on 6 pasm spektralnych – w zakresie światła widzialnego, bliskiej podczerwieni oraz pasm panchromatycznych. System posiada możliwości generowania obrazów o wielkości 150×1000 km przy rozdzielczości 6,5 m. Zapewnia to codzienne zobrazowanie około 5 mln km² powierzchni. Oprócz wyposażenia optycznego na satelitach rozmieszczona jest jednostka przetwarzania i przechowywania danych oraz system szybkiej komunikacji w paśmie X. Czas rewizyty systemu wynosi 5,5 dnia.

3. WYMAGANIA I ZASTOSOWANIA WOJSKOWE SATELITARNYCH SYSTEMÓW OBSERWACJI ZIEMI

Należy zauważyć, że w ostatnich latach zastosowanie systemów satelitarnych dla sił zbrojnych uległo zmianom. Przed wszystkim zobrazowania satelitarne były początkowo wykorzystywane przez wywiad, obecnie natomiast produkty te mają zastosowanie operacyjne. W zakresie wywiadu nadal wykorzystuje się je do nadzoru nad działaniami jądrowymi i kontroli zbrojeń. Dodatkowo w zakresie militarnym produkty są niezbędne w kartografii – dostarczając cyfrowe modele wysokościowe, mapy miejskie, jak również modele terenowe 3D. Kolejny obszar wykorzystania to lokalizacja celów (współrzędne, modele 3D), jak również ocena zniszczeń po zastosowaniu uzbrojenia (w szczególności lotniczego). Można przyjąć, że uzyskane parametry zdjęć satelitarnych są porównywalne z wykonywanymi przez bezzałogowe statki powietrzne lub samoloty. Jednakże przewagą nad możliwościami satelitarnymi jest to, że zdjęcia mogą być wykonywane nad każdym obszarem, bez względu na to czy przestrzeń powietrzna nad nim jest wolna czy zakazana.

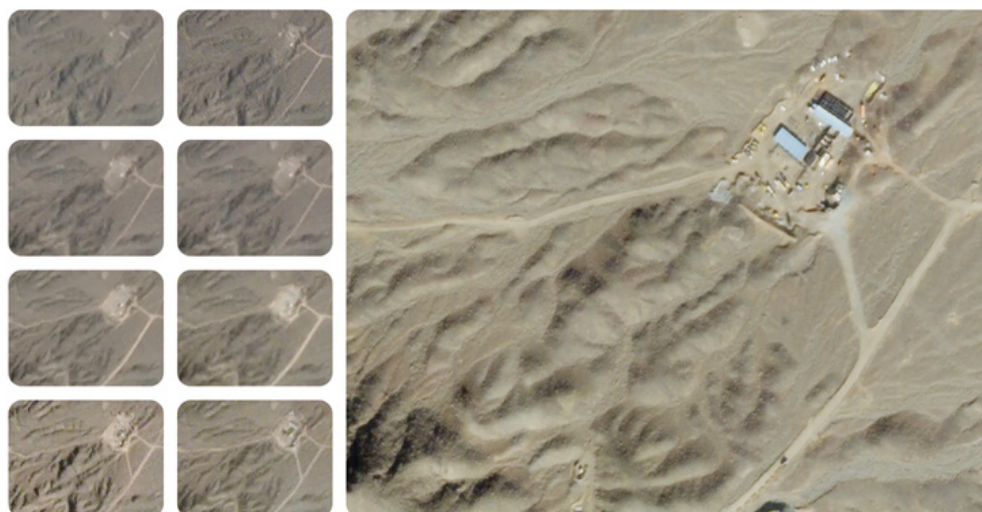
Wykorzystanie systemów obserwacji Ziemi w zakresie wojskowym wiąże się z wysokimi wymaganiami technicznymi. Po pierwsze oczekuje się jak największej wydajności – wysokiej rozdzielczości przestrzennej i czasowej tych systemów. Drugą sprawą jest kwestia podatności systemów EO. Oczekuje się dużej odporności na zakłócenia oraz stosowanie algorytmów kryptograficznych, chroniących dane wrażliwe. Zalicza się do nich telepolecenia, a więc informacje wysyłane z Ziemi do satelity w celu wydawania poleceń. Kolejna grupa danych to telemetrie satelitarne – informacje wysyłane przez satelitę na Ziemię o jego statusie. Trzecia grupa podatnych danych to produkty satelitarne, które pozyskiwane są przez czujniki i przesyłane do stacji naziemnych. Poza tym systemy EO powinny również charakteryzować się bardzo wysoką niezawodnością. Są one bowiem uważane za elementy strategiczne systemów obronnych⁸.

Jednym z dostawców usług komercyjnego zabezpieczenia działalności wojskowej jest amerykańska firma MAXAR. Dla działalności rządowej jest dostawcą produktów zobrazowania kosmicznego, działającym zgodnie z programem otwartych danych. Polega on na dostarczaniu produktów kosmicznych, jak również ich analiz na potrzeby klęsk żywiołowych oraz innych sytuacji kryzysowych. W odniesieniu do wojskowych operacji kosmicznych przedsiębiorstwo realizuje drugą fazę programu One World Terrain (OWT) którego koordynatorem są siły zbrojne USA. Jego celem jest opracowanie map 3D o dużym odwzorowaniu terenowym. Maja one służyć symulacjom prowadzenia działań taktycznych, budowie świadomości sytuacyjnej, planowaniu misji, nawigacji i nauce celowania. Kolejnym obszarem zainteresowania militarnego firmy są aplikacje służące do przetwarzania danych misji, realizowanych na rzecz Sił Kosmicznych USA⁹. W ramach trwającego programu FORGE MDP (Future Operationally Resilient Ground Evolution Mission Data Processing) rozwijane są zdolności aplikacyjne, które polegają na pozyskaniu danych satelitarnych, a na ich podstawie generowanie ostrzeżeń, alertów i innych informacji dostarczanych dla uczestników operacji militarnych – np. z ostrzeżeniem przed atakiem raketowym. Innymi usługami świadczonymi na rzecz sił zbrojnych jest zautomatyzowany system danych geoprzestrzennych oparty na chmurze obliczeniowej. Jego opracowanie umożliwi rozwiązywanie problemów wywiadowczych, poprzez szybkie dostarczanie wyselekcjonowanych i użytecznych informacji. Kolejnym obszarem dostarczania produktów kosmicznych na potrzeby sił zbrojnych jest usługa mobilnego, taktycznego systemu dostarczania danych geoprzestrzennych i obrazowania satelitarnego. System ten umożliwi szybkie przesyłanie, analizowanie i przesyłanie danych z komercyjnych satelitów obserwacji Ziemi w celu wspierania misji wojskowych, humanitarnych i pomocy w przypadku katastrof. Jego zaletą jest zwiększenie wydajności poprzez źródła elektrooptyczne i systemy radiolokacyjne. Jest on również przewidziany do integracji z systemem TITAN (Tactical Intelligence Targeting Access Node), stanowiącym taktyczną stację naziemną. Jej możliwości polegają na śledzeniu dalekich celów. Istotą działania tego systemu jest integracja z wieloma źródłami danych (w tym również kosmicznych) na podstawie których śledzone są potencjalne zagrożenia. Ma on szczególne znaczenie podczas potrzeby podejmowania decyzji w krótkim czasie. W przeciągu kilku sekund dostarczane są precyzyjne informacje dotyczące celu¹⁰.

Innym komercyjnym dostawcą produktów obserwacji Ziemi wykorzystywanych na potrzeby sił zbrojnych jest firma Planet. Dostarczane przez firmę usługi realizowane są poprzez dwie konstelacje PlanetScope o rozdzielczości przestrzennej 3,7 m/px oraz SkySat o rozdzielczości przestrzennej 0,5 m/px. Rozdzielczość czasowa oby-

dwu konstelacji wynosi 24h. Głównym celem dedykowanej usługi jest identyfikacja zmian, do czego wykorzystywane jest uczenie maszynowe. Przykładem możliwości świadczonej usługi jest analiza zdjęć satelitarnych wykonywanych pomiędzy 7 a 16 września 2020 r. Dzięki nim śledzono i wykryto prace budowlane w ośrodku nuklearnym w Natanz w Iranie (Rys. 1)¹¹.

Rys. 1. Zobrazowanie satelitarne budowy naziemnej infrastruktury w ośrodku nuklearnym w Natanz w Iranie (7-16 września 2020 r.)¹²



4. ROZWÓJ SYSTEMÓW OBSERWACJI ZIEMI

Badania i publikowane na ich podstawie raporty¹³ wskazują na dynamiczne zwiększającą się liczbę satelitów i systemów obserwacji Ziemi. Obecnie notuje się poziom dochodów wynoszący 3,3 mld USD, a do roku 2028 ma on osiągnąć poziom 7,2 mld USD¹⁴. Do tego czasu zakłada się wyniesienie w przestrzeń kosmiczną ponad 1100 satelitów obserwacji Ziemi. Z raportu wynika również, że największym odbiorcą usług kosmicznych są siły zbrojne (23% dochodów) oraz sektor rządowy (20% dochodów), które wykazują zapotrzebowanie na obrazy o wysokiej rozdzielczości wraz z ich analizą¹⁵. Obecnie widoczna jest tendencja do budowy małych satelitów¹⁶ i ich konstelacji. Pierwszym argumentem przemawiającym za rozwojem tego typu rozwiązań jest aspekt finansowy. Małe satelity oraz budowanie konstelacji i mini systemów satelitarnych dedykowanych obserwacji Ziemi stanowi szansę dla aktorów o małych zdolnościach finansowych. Takie rozwiązania umożliwiają również budowę szerszych systemów – stacji naziemnych, miejsc służących do ich wynoszenia, struktur dystrybucji danych i metod zarządzania systemem kosmicznym. Oprócz niskich nakładów budżetowych misje wykonywane przez małe satelity posiadają kilka zalet. Przede wszystkim możliwe jest prowadzenie misji z dużą częstotliwością, a co za tym idzie częstsze dostarczanie produktów badań i użytkowych. Wykorzystanie małych satelitów pozwala również na poszerzenie bazy wiedzy technicznej i naukowej, a także inspiruje zaangażowanie małego i średniego, często lokalnego przemysłu¹⁷.

Należy również zauważyć, że misje małych satelitów w porównaniu z misjami ich dużych odpowiedników uznaje się za komplementarne niż za konkurencyjne. Dodatkowo są one wspierane przez kilka współczesnych trendów. Jednym z nich jest postęp w miniaturyzacji układów elektronicznych oraz dziedzinach techniki, takich jak: optyka, mechanika, materiałoznawstwo, sztuczna inteligencja (uczenie maszynowe), przetwarzanie sygnałów, technologie informatyczne, komunikacja i nawiga-

cja¹⁸. Kolejnym trendem jest rozwój niskomasowej techniki raketowej, między innymi polegający na wykorzystaniu zmodyfikowanych rakiet wojskowych do wynoszenia małych satelitów. Budowa małych satelitów i ich konstelacji sprzyja zwiększeniu poziomu niezależności w przestrzeni kosmicznej. Małe satelity dla wielu aktorów to niskobudżetowy sposób uzyskania zdolności do obserwacji Ziemi, bez konieczności korzystania z użyczanych, często kosztownych usług. W odniesieniu do segmentu naziemnego z dużym prawdopodobieństwem należy wskazać, że nowo powstałe systemy mini satelitów i ich konstelacje, których zadaniem będzie obserwacja Ziemi oparte będą na systemach otwartych, z dużym poziomem automatyzacji i autonomii. Realizowane misje mają charakteryzować się wielosesyjnością oraz mają być wspomagane technologią internetową.

Kolejny kierunek rozwojowy systemów obserwacji Ziemi to Big Data. Jednym z tego typu rozwiązań dla bezpieczeństwa jest platforma morska Leonardo, wdrożona przez e-GEOS. Jej celem jest utrzymanie wysokiego poziomu bezpieczeństwa morskiego, monitorowanie nielegalnego ruchu morskiego, ochronę środowiska i walkę z piractwem morskim. System działa w oparciu o Big Data (ok. 7 milionów sygnałów dziennie). Są nimi dane kosmiczne pochodzące z różnego rodzaju sensorów satelitarnych, jak również z innych źródeł, takich jak: przybrzeżne stacje radiolokacyjne, bazy danych – rejestry statków, dane meteorologiczne i inne. Są one zbierane oraz porównywane z wcześniej zaimplementowanymi wzorcami, co pozwala na wskazywanie różnic i anomalii¹⁹.

Duże ilości różnorodnych danych znalazły również zastosowania dla sił zbrojnych. Przykładem rozwiązania Big Data dla zastosowań militarnych jest lotnictwo wojskowe. Duże ilości danych wspomagają proces decyzyjny w zakresie stale zwiększającego się ruchu lotniczego. Optymalne wykorzystanie elementów przestrzeni powietrznej przekłada się na zrównoważenie ekosystemu lotniczego poprzez zmniejszenie kosztów oraz poziomu zanieczyszczenia powietrza. Analiza oparta na wielu źródłach zwiększa również poziom bezpieczeństwa wykonywanych operacji lotniczych. Innym obszarem wykorzystania militarnego Big Data jest rozpoznanie wojskowe. Różnorodne zdjęcia satelitarne oraz algorytmy sztucznej inteligencji są podstawą do automatycznej identyfikacji sprzętu wojskowego znajdującego się na terenie będącym przedmiotem zainteresowania oraz do wykrywania wszelkich nietypowych ruchów. Dzięki nim możliwe jest wykrywanie, rozpoznanie i identyfikacja samolotów, pojazdów czy obiektów morskich oraz ich przemieszczanie się. Innym przykładem zastosowania Big Data w lotnictwie wojskowym do nominacji celów powietrznych. Korzysta się tutaj z powiązania wielu danych w czasie zbliżonym do rzeczywistego (Near-Real-Time – NRT), w ten sposób dokładnie lokalizując i potwierdzając cel bez zbędnej zwłoki czasowej. Taka technika pozwala również na rażenie celów bez wykonywania wcześniejszych lotów rozpoznawczych²⁰.

Innym trendem rozwojowym Big Data jest wykorzystanie zasobu danych dla zapobiegania konfliktom i budowania pokoju. Podstawą są tutaj dane pochodzące z mediów społecznościowych – w szczególności treści generowane przez użytkowników i internetowe sieci społecznościowe przekazujące informacje na temat emocji i nastrojów społecznych. Są one dodatkowo wspomagane danymi na temat społecznych, politycznych i geograficznych uwarunkowań miejsc zainteresowania. Na tej podstawie możliwe jest śledzenie migracji (dane z telefonów komórkowych, mapowanie adresów IP), identyfikacje mowy nienawiści (monitorowanie sieci społecznościowych), identyfikacje, jak również wczesne wykrycie i modelowanie rewolucji społecznych (poprzez np. śledzenie cen i dostępności żywności w regionie)²¹.

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań naukowych, można postawić kilka wniosków o charakterze ogólnym:

1. W zastosowaniach obronnych oraz w procesie reagowania w sytuacjach kryzysowych wymagane jest stosowanie systemów EO o bardzo wysokiej rozdzielczości, a więc systemów najbardziej zaawansowanych technologicznie. Dzięki takim właściwościom możliwa jest detekcja, rozpoznanie i identyfikacja obiektów naziemnych na potrzeby sił zbrojnych.
2. Obecne rozwijane systemy obserwacji Ziemi są szeroko stosowane w zakresie bezpieczeństwa, jak również do monitorowania atmosfery i zjawisk pogodowych – badanie jakości powietrza, składu atmosfery, w tym do badania obecności gazów cieplarnianych, monitorowania środowiska morskiego, zmian pogody i klimatu. W obszarze bezpieczeństwa współcześnie rozwijane systemy znalazły w realizacji zadań w zakresie ochrony granicy państwowej, nadzoru morskiego oraz wsparcie działań wewnętrznych Unii Europejskiej.
3. Systemy obserwacji Ziemi dedykowane zastosowaniom wojskowym muszą spełniać wysokie wymagania techniczne. Przede wszystkim oczekuje się wysokiego poziomu ich zabezpieczeń przez zakłóceniami. Dodatkowo w przypadku systemów cywilnych muszą one otrzymać licencje rządową, zgodną z polityką bezpieczeństwa i polityką zagraniczną danego rządu. Dodatkowo produkty o wysokiej jakości muszą być w pierwszej kolejności dostępne dla zastosowań rządowych i militarnych. Dodatkowo wymaga się od firm posiadania poświadczenia bezpieczeństwa przemysłowego, a od pracowników mających bezpośredni kontakt z produktami poświadczenia bezpieczeństwa osobowego.
4. Podstawowym obszarem wykorzystania produktów systemów obserwacji Ziemi jest wywiad. W realizacji tych zadań są one wykorzystywane np. do kontroli zbrojeń czy posiadania broni jądrowej. Inne produkty, takie jak modele terenowe znajdują zastosowanie w kartografii wojskowej, nominowaniu celów i ocenie zniszczeń. Są one również wykorzystywane do symulacji prowadzenia działań taktycznych, planowania misji oraz w nauce celowania, podnosząc w ten sposób poziom świadomości sytuacyjnej.
5. Przyszły rozwój systemów obserwacji Ziemi wskazuje na dwa podstawowe kierunki rozwoju. Pierwszy związany jest z wykorzystaniem mini-satelitów. Za argumentem tym przemawia obniżenie kosztów, jak i zwiększenie częstotliwości i ilość pozyskiwanych danych obrazowych. Drugi kierunek rozwojowy wskazuje na wykorzystanie Big Data wspomaganie sztuczną inteligencją. Takie rozwiązania pozwalają na automatyczne identyfikowanie i śledzenie sprzętu wojskowego, a także zmiany w zakresie ich lokalizacji. Duża ilość dobrze wyselekcjonowanych danych zwiększy również poziom dokładnej lokalizacji i wysokiego poziomu wiarygodności nominowanych celów, wspomagając w ten sposób proces targetingu.

- ¹ R. Dąbrowski, A. Orych, P. Walczykowski, *Ocena możliwości wykorzystania wysokorozdzielczych zobrażeń satelitarnych w rozpoznaniu obrazowym*, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 2007, nr. 21, s. 79.
- ² Im wyższa szerokość geograficzna obszaru zainteresowania, tym wyższa częstotliwość wykonywania zdjęć.
- ³ P. A. Bosc, *Earth Observation for Security and Dual Use* [w:] *Handbook of Space Security*, New York 2015.
- ⁴ Obecnie ok. 90% potrzeb sił zbrojnych w zakresie obserwacji Ziemi można zaspokoić przy pomocy komercyjnych systemów obrazowania. Na początku XXI wieku rynek komercyjny w zakresie EO rośnie o 9 % w skali roku.
- ⁵ Dla porównania – regulacje francuskie przyjmują wartość graniczną rozdzielczości przestrzennej 2 m/px, natomiast zgodnie z regulacjami w Niemczech wartość ta wynosi 2,5 m/px.
- ⁶ C. Buontempo et al., *Fostering the development of climate services through Copernicus Climate Change Service (C3S) for agriculture applications*, *Weather and Climate Extremes* 2020, vol. 27 (DOI:10.1016/j.wace.2019.100226), link: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212094719300994>.
- ⁷ D. Ravi Shankar, *Remote Sensing of Soils*, Berlin, Heidelberg 2017, s. 76.
- ⁸ P. A. Bosc, *Earth Observation for Security and Dual Use...*
- ⁹ M. Czajkowski, *Sino-american rivalry in space — selected strategic and political issues*, *Roczniki Nauk Społecznych* 2021, vol. 13(49), no. 4 (DOI:10.18290/rns21494.5).
- ¹⁰ MAXAR [at:] link: <https://www.maxar.com> [dostęp: 1 lipca 2022 r.].
- ¹¹ Planet [at:] link: <https://www.planet.com> [dostęp: 1 lipca 2022 r.].
- ¹² *Ibidem*.
- ¹³ *Satellite-Based Earth Observation (13th Edition)*, 2021 r., link: <https://www.nsr.com/?research=satellite-based-earth-observation-13th-edition> [dostęp: 1 lipca 2022 r.].
- ¹⁴ Skumulowany roczny wskaźnik wzrostu (ang. *Compound Annual Growth Rate – CAGR*) wynosi 8,2%. Zob.: D. Kasaboski, *The Future of Satellite-Based Earth Observation*, 2020, link: <https://www.nsr.com/the-future-of-satellite-based-earth-observation> [dostęp: 1 lipca 2022 r.].
- ¹⁵ *Ibidem*.
- ¹⁶ W nomenklaturze przedmiotu istnieją różne podziały mini satelitów. Według ESA małe satelity zawierają się w przedziale masowym 350÷700 kg (R. Sandau, *Status and trends of small satellite missions for Earth observation*, *Acta Astronautica* 2010, vol. 66, no. 1–2 (DOI:10.1016/j.actaastro.2009.06.008), link: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094576509003488> [dostęp: 1 lipca 2022 r.]. Według NASA są to obiekty o masie poniżej 180 kg (NASA, *What are SmallSats and CubeSats?* [at:] link: <https://www.nasa.gov/content/what-are-smallsats-and-cubesats> [dostęp: 1 lipca 2022 r.]). Z kolei inne pozycje literaturowe wskazują na to, że mini-satelity to obiekty których ciężar nie przekracza 500 kg (P. Murugan, Y. Agrawal, *Small Satellites Applications, Classification and Technologies*, *International Journal of Science and Research* 2020, vol. 9, no. 7).
- ¹⁷ R. Sandau, *Status and trends of small satellite missions for Earth observation...*
- ¹⁸ H. Jiang, Y. Tang, *Development of Mechanical Design, Manufacturing and Automation*, *Journal of Physics: Conference Series* 2022, vol. 2160, no. 1 (DOI: 10.1088/1742-6596/2160/1/012060), link: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2160/1/012060> [dostęp: 1 lipca 2022 r.].
- ¹⁹ *SEonSE Platform is now online: Satellites and Big Data analytics provide new eyes to protect the sea* [at:] link: <https://www.telespazio.com/en/news-and-stories-detail/-/detail/170718-platform-is-now-online-satellites-and-big-data-analytics-provide-new-eyes-to-protect-the-sea> [dostęp: 1 lipca 2022 r.].
- ²⁰ S.P. Hamilton, M.P. Kreuzer, *The Big Data Imperative Air Force Intelligence for the Information Age*, *Air&Space Power Journal* 2018.
- ²¹ I. Idris, *Benefits and risks of Big Data Analytics in Fragile and Conflict Affected States*, 2019 r. PRZYPIS NIEPEŁNY

ABSTRAKT:

PL: W artykule przedstawiono proces budowy, jak również obecne i przyszłe wykorzystanie systemów obserwacji Ziemi. Analizy poprzedzone zostały charakterystyką systemów, porządkując w ten sposób rezerwar zebranej wiedzy. Określono podstawowe parametry systemów, przykłady zastosowania, jak również wymagania w stosunku do systemów możliwych do eksploatacji w siłach zbrojnych. Na podstawie regulacji amerykańskich określono możliwości wykorzystania produktów systemów obserwacji Ziemi na potrzeby rządowo-militarne. W dalszej części artykułu opisano obecne wykorzystanie systemy obserwacji Ziemi, realizowane na potrzeby bezpieczeństwa. Na podstawie tych treści przedstawiono wymagania w stosunku do systemów obserwacji Ziemi przeznaczonych do użycia przez siły zbrojne. Ostatnia część artykułu traktuje o rozwój systemów obserwacji Ziemi. Powołano się w niej na obecne raporty wskazujące na zwiększenia zainteresowania produktami tych systemów. Dokonano określenia kierunków rozwoju. Dokonano antycypacji trendów związanych z przyszłą budową systemów, do których zaliczono: rozwój mini satelitów, Big Data oraz sztuczną inteligencją, a także integracja tych trzech determinantów.

ENG: The article presents the process of construction, as well as the current and future use of Earth observation systems. The analyses were preceded by the characteristics of the systems, thus organizing the reservoir of collected knowledge. The basic parameters of the systems, examples of application, as well as the requirements for systems that can be operated in the armed forces were identified. On the basis of U.S. regulations, the possibility of using Earth observation system products for government-military purposes is identified. The rest of the article describes the current use of Earth observation systems implemented for security purposes. Based on this content, the requirements for Earth observation systems intended for use by the armed forces are presented. The last part of the article deals with the development of Earth observation systems. It cites current reports indicating increased interest in the products of these systems. A determination of the directions of development was made. Anticipation of trends associated with the future construction of the systems was made, which included: the development of mini satellites, Big Data and artificial intelligence, as well as the integration of these three determinants.

SŁOWA KLUCZOWE:

PL: przestrzeń kosmiczna, bezpieczeństwo, zdolności militarne, obserwacja Ziemi

ENG: przestrzeń kosmiczna, bezpieczeństwo, zdolności militarne, obserwacja Ziemi
Space, security, military capabilities, Earth Observation – EO