

Jan Matysiak¹✉, Mirosław Antonowicz²
Akademia Leona Koźmińskiego

Ekologistyka Kosmiczna – wybór czy konieczność?

Space Ecologistics – choice or necessity

Synopsis. Niniejszy artykuł omawia tematykę ekologistyki kosmicznej w kontekście rozwoju badań w przestrzeni kosmicznej i rozwoju sektora kosmicznego jako ważnego komponentu współczesnych gospodarek. Przedstawiona została koncepcja ekologistyki kosmicznej wraz z uzasadnieniem ważności zagadnienia i przedstawieniem przykładów istniejących oraz koncepcyjnych rozwiązań problemu zagospodarowania odpadów występujących w przestrzeni kosmicznej. Celem opracowania jest wskazanie na konieczność podejmowania działań ekologicznych w przestrzeni kosmicznej. Celami szczegółowymi są rozpoznanie aktualnego stanu gospodarowania odpadami w przestrzeni kosmicznej oraz identyfikacja rozwiązań i barier występujących w realizacji działań ekologistyki kosmicznej. W podsumowaniu wskazano rodzaje przyszłych działań prewencyjnych w zakresie ekologistyki kosmicznej koniecznych do podjęcia celem minimalizacji odpadów w kosmosie. W artykule zastosowano metodę studiów literaturowych obejmującą studia polskiej i zagranicznej literatury w temacie logistyki kosmicznej oraz ekologistyki kosmicznej.

Słowa kluczowe: Sektor kosmiczny, Logistyka kosmiczna, Ekologistyka kosmiczna, Śmieci kosmiczne

Abstract. This article discusses the subject of space ecology in the context of the development of space research and the development of the space sector as an important component of modern economies. The concept of space ecology is presented, along with the justification of the importance of the issue and the presentation of examples of existing and conceptual solutions to the problem of waste management in space. The aim of the study is to indicate the necessity of undertaking ecological activities in space. The specific objectives are to identify the current state of waste management in space and to identify solutions and barriers in the implementation of space ecologistics activities. The summary

¹✉ Jan Matysiak – Akademia Leona Koźmińskiego, członek Koła Naukowego Logistyki i Łańcuchów Dostaw; e-mail: janmatysiak64@gmail.com

² Mirosław Antonowicz – Akademia Leona Koźmińskiego, Centrum Naukowo-Badawcze Zarządzanie Łańcuchami Dostaw; e-mail: maaw@kozminski.edu.pl; <https://orcid.org/0000-0001-7206-0625>

indicates the types of future preventive actions in the field of space ecology that need to be undertaken to minimize waste in space. The article uses the method of literature studies, which includes studies of Polish and foreign literature on space logistics and space ecology.

Key words: Space sector, Space logistics, Space ecology, Space debris

Kody JEL: L91, O33, O44, Q56, Q57

Wstęp

Sektor kosmiczny³ staje się coraz ważniejszym elementem gospodarek państw na świecie. Jak podaje raport firmy McKinsey rynek kosmiczny zanotował wzrost wartości z 280 mld USD w 2010 roku do 447 mld USD w 2022 roku, z potencjalnym wzrostem do 1 bln USD do 2030 roku [Brukardt i in. 2022]. Rynek ten charakteryzuje się dynamicznym rozwojem oraz zastosowaniem najnowocześniejszych technologii. Jednym z ważniejszych państw pod względem rozwoju sektora kosmicznego są Stany Zjednoczone. W 2016 roku amerykański sektor kosmiczny wygenerował około 110 mld przychodów oraz zatrudniał około 80 tys. osób. Intensywny rozwój sektora w USA spowodował, że w 2018 roku eksport osiągnął 151 mld USD. Innym krajem z wysoko rozwiniętym sektorem kosmicznym jest Francja. W francuskim sektorze pracuje ponad 14 tys. osób w około 160 podmiotach prowadzących działania z zakresu wykorzystania, tworzenia i rozwoju systemów kosmicznych. Przy uwzględnieniu również części przemysłu lotniczego aktywnie współpracującego w ramach Francuskiego Stowarzyszenia Przemysłu Lotniczego i Kosmicznego (GIFAS) ta branża obejmuje ponad 400 spółek. W kraju jak podaje POLSA (Polska Agencja Kosmiczna) [2021] w sierpniu 2020 roku polski sektor kosmiczny liczył 331 podmiotów, z czego większość należała do sektora małych i średnich przedsiębiorstw. Polska aktywnie uczestniczy w działaniach Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA)⁴.

Sektor kosmiczny zyskuje na znaczeniu w Polsce i na świecie jako obszar gospodarki, który wyznacza kierunki rozwoju technologicznego oraz innowacji. Inwestycje w badanie kosmosu zwracają się jako rozwiązania wdrażane w praktyce. Produkty i aplikacje, które powstają z udziałem sektora kosmicznego, mają szerokie zastosowanie. Przykładem takiego zastosowania jest nawigacja satelitarna, która jest wykorzystywana w branży logistycznej umożliwiając bezpieczną podróż oraz transport towarów. Powszechnie nawigację sate-

³ Sektor kosmiczny rozumiany zgodnie z OECD Space Forum obejmuje typowe działania związane z produkcją urządzeń kosmicznych, w tym systemów wynoszenia satelitów, a także działania, które wykorzystują dane pozyskiwane za pomocą urządzeń satelitarnych lub wiążą się ze świadczeniem innych usług za pośrednictwem urządzeń kosmicznych [PARP 2015].

⁴ Dla przykładu kraje członkowskie ESA w 2022 roku przyjęły plany związane z umacnianiem europejskiej pozycji w kosmosie. Badania naukowe kosmosu będą kontynuowane. Nacisk będzie położony na praktyczne wykorzystanie kosmosu. Coraz większe znaczenie mają technologie, które zwiększają bezpieczeństwo Europy, przyczyniają się do rozwoju gospodarek krajowych, a także zapewniają wygodę życia jej obywateli. Łączny budżet, którym dysponuje ESA w latach 2023–2025 na realizację powyższych założeń wynosi 17 mld EUR.

litarną stosuje się w obronności oraz łączności wojskowej. Wykorzystywana jest również przez służby ratownictwa medycznego. Ratownictwo medyczne stosuje także inne rozwiązania wywodzące się z sektora kosmicznego, m.in. folię termiczną. Sektor kosmiczny jest postrzegany jako zaawansowana technologicznie branża, która np. może przyczynić się do stworzenia nowego modelu rozwoju polskiej gospodarki⁵. Budżety poszczególnych państw przeznaczone na sektor kosmiczny przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Budżety wybranych państw na projekty kosmiczne

Table 1. Budgets of selected countries for space projects

Analizowane Państwa	Budżet Narodowy [mln EUR]		Europejska Agencja Kosmiczna (ESA) [mln EUR]			Inne [mln EUR] (w tym EUMETSTAT i inne organizacje międzynarodowe)	
	2019	2020	2019	2020	2021	2019	2020
Austria	8,3	8,9	66,99	53,26	54,77	11,9	11,3
Belgia	12,8	13	192,66	260,03	255,79	13,8	12,3
Czechy	14,76	14,75	32,83	48,67	43,05	5,1	4,84
Francja	1021,0	1249,0	1179,61	1311,65	1065,85	78,5	68,5
Hiszpania	56,0	26	202,85	249,52	223,64	36,2	43,3
Niemcy	729	758	928,65	981,72	988,64	107	94
Polska	24,41	24,04	42,64	38,38	38,96	12,79	12,04
Słowacja	1,0	1,0	N/A	N/A	N/A	2,6	2,4
Ukraina	63,34	19,92	N/A	N/A	N/A	Brak danych	Brak danych
USA	18595,56	194470,77	N/A	N/A	N/A	Brak danych	Brak danych
Węgry	0,5	0,5	8,63	11,68	20,37	3,4	3,0
Wielka Brytania	139,39	135,82	369,78	490,7	418,8	82,58	79,13
Włochy	272,1	256,5	500,49	665,78	589,89	63,0	50,8

Źródło: [Polska Agencja Kosmiczna 2021, s. 111].

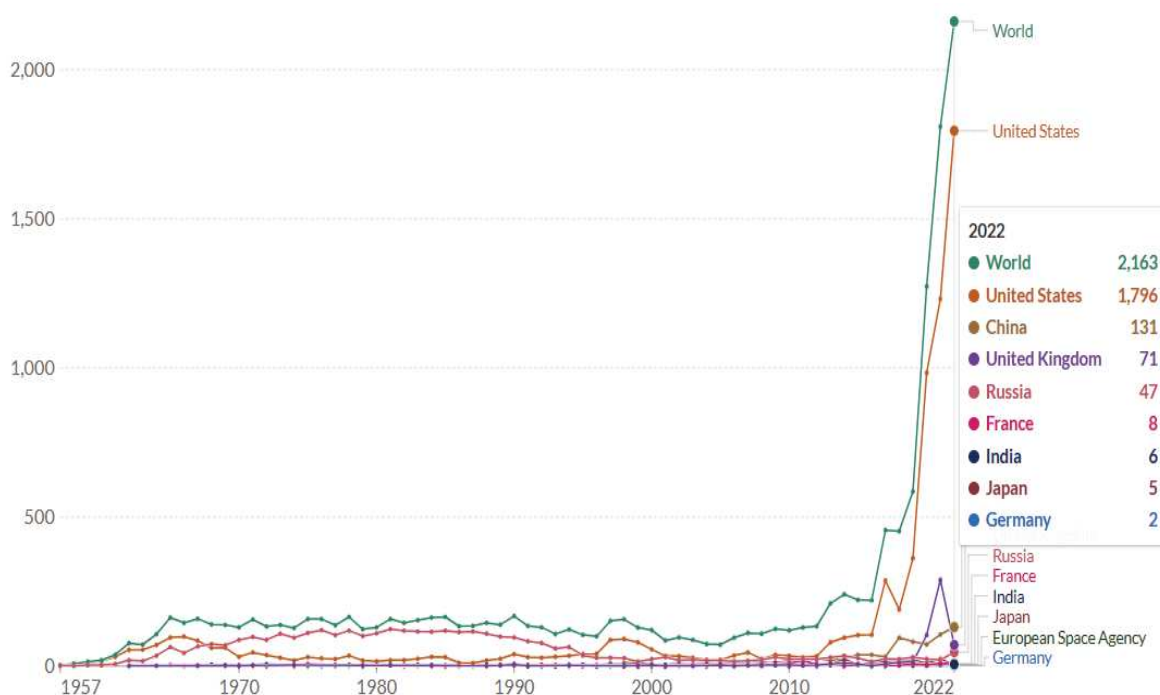
Source: [Polska Agencja Kosmiczna 2021, p. 111].

Technologie kosmiczne odgrywają istotną rolę w codziennym życiu ludzkości oraz są obecne w wielu sektorach gospodarki, które nie kojarzą się bezpośrednio z kosmosem. W górnictwie wykorzystuje się specjalne satelity do bieżącego monitorowania jednostek kopalni oraz emisji gazów cieplarnianych. W rolnictwie zastosowanie tego typu technologii jest powszechne do monitorowania stanu gleby, opadów czy pokrywy śnieżnej w celu tworzenia planów nawadniania lub prognozowania produkcji rolnej. W branży farmaceutycznej kluczowe jest wykorzystanie warunków mikrogravitacji do przeprowadzania eksperymentów, w celu opracowania nowych leków. Technologie kosmiczne wykorzystywane są również powszechnie w branży telekomunikacyjnej, transportowej, finansowej czy ubezpieczeniowej [Brukardt i in. 2022].

Innowacje w zakresie produkcji, napędów raketowych oraz ponownego użycia raket nośnych sprawiły, że wysłanie obiektu w przestrzeń kosmiczną stało się łatwiejsze oraz tańsze niż kiedykolwiek wcześniej. Niższe koszty wyniesienia rakiety znacznie obniżyły

⁵ Dla przykładu w 2022 r. powstało w Polsce Centrum Inkubacji Przedsiębiorczości ESA (ESA BIC). To największa sieć inkubatorów kosmicznych w Europie. Głównym celem ESA BIC-ów jest wspieranie przedsiębiorców z pomysłami biznesowymi związanymi z przemysłem i usługami kosmicznymi, a tym samym tworzenie i rozwijanie start-upów związanych z tą branżą w całej Europie.

barierę wejścia na rynek, co doprowadziło do wzrostu liczby przedsiębiorstw kosmicznych oraz zainteresowania usługami sektora kosmicznego. Prawdziwą rewolucją w dziedzinie logistyki kosmicznej było stworzenie rakiet nośnych ponownego zastosowania przez firmę SpaceX, która dokonała pierwszego w historii lądowania I stopnia rakiety orbitalnej na lądzie w 2015 roku. Możliwość ponownego zastosowania rakiet przyczyniła się do znacznego zmniejszenia kosztów wynoszenia. Według oficjalnych danych NASA (Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej USA) w 2008 roku koszt wyniesienia na niską orbitę okołoziemską (LEO) wynosił 10 tys. USD za 1 funt (0,45 kg) [NASA]. Obecnie firma SpaceX umożliwia wyniesienie 1 lb (funta – 0,45 kg) na orbitę LEO za 1,2 tys. USD [Chow 2022]. Obniżenie kosztów wyniesienia rakiety spowodowało wzrost dostępności takich usług, a tym samym przyczyniło się do zwiększenia liczby obiektów dostarczanych w przestrzeń kosmiczną. Nie jest to jednak jedyny czynnik rozwoju tego sektora. Ważnym elementem jest miniaturyzacja satelitów oraz popularyzacja satelitów typu CubeSat. Jest to rodzaj małego satelity, którego wymiary są ustandaryzowane poprzez podstawową jednostkę miary (1U). Satelita o wielkości 1U ma w chwili wystrzelenia objętość 1 l oraz wymiary kostki $10 \times 10 \times 10$ cm. Satelity mogą mieć różne wielkości od 0,25U do nawet 12U [California Polytechnic State University 2014]. Standaryzacja wymiarów najpopularniejszych miniaturowych satelitów pozwala na łatwiejsze planowanie przestrzeni ładunkowej statku kosmicznego, a tym samym przyczynia się do obniżenia kosztów całego procesu logistycznego. Większa standaryzacja, niższe koszty wynoszenia, rozwój technologiczny, popularyzacja rynku oraz coraz większe znaczenie sektora kosmicznego w bezpieczeństwie narodowym powodują, co



Rysunek 1. Roczna liczba obiektów wystrzelonych w kosmos

Figure 1. Annual number of objects launched into space

Źródło: [Annual number of...].

Source: [Annual number of...].

roku wzrasta liczba obiektów wysyłanych w przestrzeń kosmiczną. Jak podaje portal Our World in Data [Annual number of...] powiązany z Uniwersytetem Oksfordzkim w 2022 roku dostarczono oficjalnie na orbitę 2163 obiekty (rys. 1).

Szybko zwiększająca się liczba obiektów w przestrzeni kosmicznej oraz niedostateczne uregulowanie rynku kosmicznego pod względem międzynarodowym prowadzi również do wzrostu liczby obiektów niedziałających, które stają się śmieciami kosmicznymi orbitującymi wokół Ziemi lub innych obiektów niebieskich⁶. Pojawiają się zatem pytania w zakresie sposobu radzenia sobie z tą sytuacją oraz możliwościami logistyki kosmicznej w tym obszarze.

Materiały i metody

W artykule zastosowano metodę studiów literaturowych obejmującą studia polskiej i zagranicznej literatury w temacie logistyki kosmicznej oraz ekologistyki kosmicznej. W ramach przeglądu literatury autorzy przestudiowali dostępne źródła i opracowania oraz zebrali dane poprzez przeszukanie baz naukowych i internetowych. Postawiono pytanie badawcze, a wyszukane artykuły i źródła internetowe zostały poddane analizie, co umożliwiło uporządkowanie i przegląd informacji o zagadnieniu ekologistyki w przestrzeni kosmicznej. Rezultatem opracowania było zaprezentowanie koncepcji ekologistyki kosmicznej, rozwiązań i barier realizacyjnych. Podsumowano zagadnienie i zaprezentowano wnioski dotyczące zapobiegania powstawania śmieci kosmicznych.

Wyniki badań i dyskusja

Koncepcja ekologistyki kosmicznej

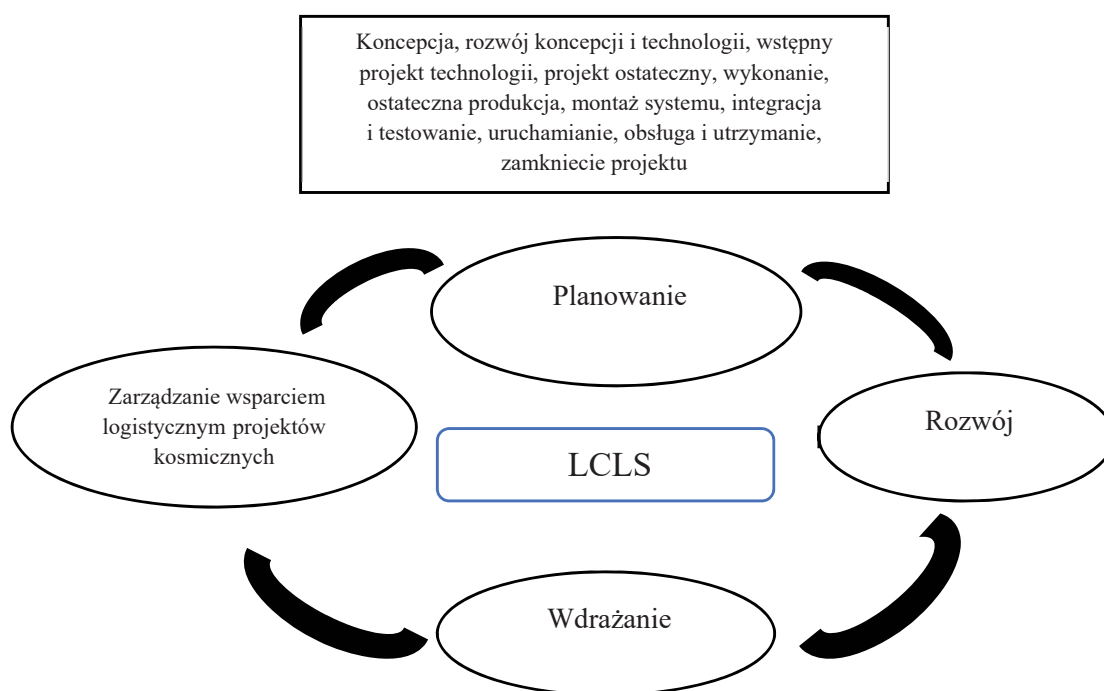
Źródeł powstania koncepcji logistyki kosmicznej można upatrywać w wydarzeniach związanych z początkiem podboju kosmosu i prowadzeniem badań przestrzeni kosmicznej przy wykorzystaniu obiektów bezzałogowych lub załogowych⁷. Koncepcja ta przez lata ewoluowała poprzez osiągnięcie kolejnych kamieni milowych np. wysłanie pierwszego człowieka w kosmos, program Apollo, program wahadłowców, badania Marsa, pierwsze udane lądowanie raket nośnych, czy wysłanie teleskopu Jamesa Webba. Najpopularniejsza definicja logistyki kosmicznej została opracowana przez Amerykański Instytut Aeronautyki i Astronautyki. Według niej logistyka kosmiczna to teoria i praktyka planowania oraz projektowania systemów kosmicznych pod kątem ich operacyjności oraz zarządzania przepływem materiałów, usług i informacji potrzebnych w całym cyklu życia systemu kosmicznego [AIAA Space Logistics Technical Committee]. Inne definicje wskazują również na przemieszczanie materiałów i/lub ludzi do oraz w przestrzeni kosmicznej wraz z działaniami utrzymania operacji w tej przestrzeni [AIAA 2004]. Generalnie logistyka kosmiczna odnosi się do działań związanych z projektami i systemami kosmicznymi podejmowanymi zarówno w kosmosie, jak i na ziemi i odpowiada za efektywność

⁶ Kosmiczne śmieci lub kosmiczne odpadki – obiekty wytworzone przez człowieka pozostające na orbicie okołoziemskiej, które nie wykonują już zaplanowanych dla nich zadań.

⁷ Umieszczenie na orbicie pierwszego obiektu sztucznego satelity Sputnik 1 w 1957 roku.

przepływów fizycznych i informacyjnych między ziemią a obiektami w kosmosie, ale także w przestrzeni kosmicznej [Baraniecka 2021, Kotomaj 2022]. Z uwagi na wpływ projektów kosmicznych na życie na ziemi, ale i bezpieczeństwo w przestrzeni kosmicznej pojawiają się poglądy, że logistyka kosmiczna powinna mieć charakter zrównoważony [Weck 2021] Rozważania nad tą problematyką podejmowano już w 2018 roku, dokonując przeglądu literatury w zakresie przestrzeni logistycznej, w tym źródeł danych, metod badawczych i teorii badawczych z perspektywy zrównoważonego [Meiling et al. 2018].

NASA zdefiniowała funkcje logistyki kosmicznej z punktu widzenia cyklu życia systemu logistycznego (rys. 2)⁸.



Rysunek 2. Funkcje logistyki kosmicznej

Figure 2. Space logistics functions

Źródło: [Baraniecka 2021, s. 2–14].

Source: [Baraniecka 2021, s. 2–14].

Należy założyć, że w systemie wsparcia znajdują się elementy obsługi obiektów kosmicznych, czyli zagadnienia związane z ekologią zajmującą się usuwaniem śmieci z przestrzeni kosmicznej. W opracowaniach naukowych można znaleźć twierdzenia, iż obecne i przyszłe kosmiczne systemy logistyczne zawierają w sobie między innymi system obsługi obiektów kosmicznych: zakup, transport osób, redystrybucja i serwis (np. górnictwo kosmiczne i ekologiya) [Baraniecka 2019]. Pojęcie ekologiy nie jest traktowane jednoznacznie⁹. Niezależnie od różnic pojęciowych ekologiya rozumiana jest najczęściej jako ogół procesów zarządzania przepływami odpadów, od miejsc ich powstawania do miejsca ich przeznaczenia w celu odzyskania warto-

⁸ LCLS – *Life Cycle Logistics Support*.

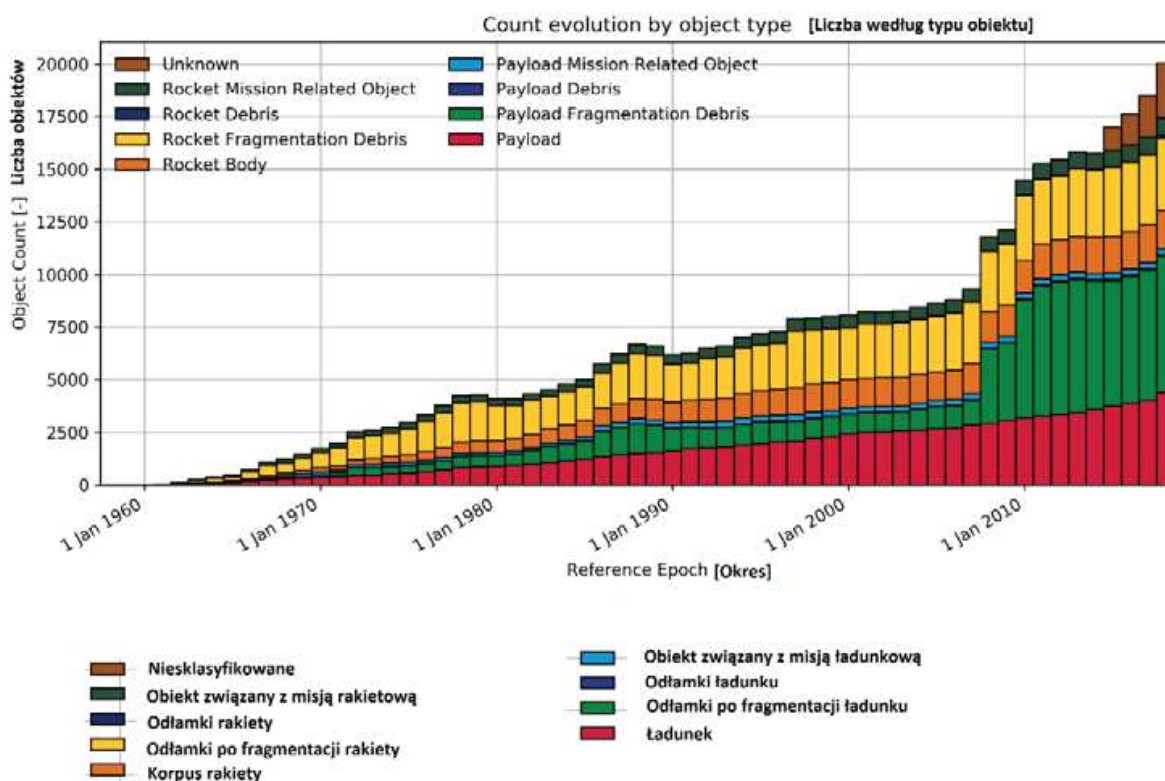
⁹ W literaturze spotykamy pojęcie zielonej logistyki, logistyki odpadów.

ści lub właściwego ich unieszkodliwienia i długoterminowego składowania w taki sposób, by przepływy te były efektywne ekonomicznie i minimalizowały negatywny wpływ odpadów na środowisko naturalne człowieka [Szołtysek 2009, s. 80]. Ekologistykę można także określić jako zintegrowany system, który umożliwia podejmowanie technicznych i organizacyjnych decyzji w kierunku zmniejszenia (minimalizacji) negatywnych skutków oddziaływania na środowisko, które towarzyszą realizacji procesów zaopatrzeniowych, przetwórczych, produkcyjnych, dystrybucyjnych i serwisowych w logistycznych systemach dostaw [Szymonik 2018]. Ekologistyka rozumiana jako podsystem systemu logistycznego zajmująca się działaniami i rozwiązaniami w zakresie zbiórki, gromadzenia i kierowania do utylizacji różnego rodzaju odpadów staje także elementem kształtowania społecznej odpowiedzialności biznesu [Korneć i Wereda 2017]. Dotyczy to także biznesu kosmicznego. Ekologistyka zajmuje się usprawnianiem i realizacją procesów przemieszczenia i utylizacji. Celem ekologistyki jest dążenie do minimalizacji lub redukcji negatywnego wpływu działań i procesów na środowisko naturalne [Korzeń 2001, Szprenglewski 2001, Szymonik 2021]. Ekologistyka, jako podsystem logistyki, zorientowana jest przede wszystkim na działania w zakresie usuwania i recyklingu różnych rodzajów odpadów powstałych na skutek działalności logistycznej w sposób nieuciążliwy dla środowiska naturalnego [Seroka-Stolka i Ociepa-Kubicka 2018]. Punktem wyjścia dla działań ekologistycznych powinno być oszacowanie potencjalnego ryzyka działalności logistycznej dla środowiska naturalnego w celu wdrożenia środków zapobiegawczych [Szydłowski 2015]. Zanieczyszczana jest nie tylko planeta, ale również przestrzeń kosmiczna ją otaczająca, gdzie „kosmiczne śmieci” stały się zagrożeniem dla bezpieczeństwa np. misji kosmicznych [Baraniecka i Gwóźdź 2021]. Działania ekologistyki w przestrzeni kosmicznej są zatem ukierunkowane na redukcję oddziaływania niekorzystnych dla środowiska kosmicznego i systemów kosmicznych przepływów fizycznych oraz informacyjnych w ramach logistyki kosmicznej [Baraniecka 2019]. Ekologistykę kosmiczną można zatem zdefiniować jako podsystem logistyki kosmicznej zajmującej się planowaniem oraz zarządzaniem projektami, systemami i przepływami w sektorze kosmicznym w zakresie zbiórki, gromadzenia i kierowania do utylizacji odpadów powstałych wskutek działań obiektów i ludzi w przestrzeni kosmicznej.

Według Agencji rządu Stanów Zjednoczonych USA – NASA [Vieira 2021, NASA] w 2021 roku w przestrzeni kosmicznej znajdowało się 27 tys. kawałków śmieci orbitalnych, które były śledzone przez czujniki Departamentu Obrony Stanów Zjednoczonych. Agencja stwierdziła także, że śmieci w kosmosie jest znacznie więcej, ale są one zbyt małe do śledzenia¹⁰. Śmieci poruszają się z ogromną prędkością nawet 15,7 tys. mph (25 266 km/h) na niskiej orbicie okołoziemskiej (LEO). Rosnąca liczba śmieci kosmicznych zagraża wszystkim obecnym (w tym Międzynarodowej Stacji Kosmicznej – ISS) oraz przyszłym statkom kosmicznym. Śmieci kosmiczne zwiększają ryzyko niepowodzenia misji kosmicznych oraz mogą zagrażać życiu astronautów znajdujących się na pokładzie statku lub wykonujących spacer kosmiczne. Obecnie

¹⁰ W ocena ESA na orbicie okołoziemskiej znajduje się ponad 30 tys. stworzonych przez człowieka obiektów powyżej 10 cm i około 1 mln odpadów większych niż 1 cm.

wszystkie misje kosmiczne muszą wziąć pod uwagę trajektorie śmieci kosmicznych. Wzrost liczby śmieci kosmicznych zobrazowano na rysunku 3 sporządzonym przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA). Śmieci kosmiczne oraz światło generowane przez nie może mieć również wpływ na jakość badań naukowych z powierzchni Ziemi poprzez blokowanie lub rozpraszanie docierającego promieniowania. Może to skutkować tworzeniem fałszywych sygnałów, które mogą być mylone z prawdziwymi zjawiskami astronomicznymi, wpływając na dokładność i wiarygodność danych.



Rysunek 3. Liczba śmieci kosmicznych na przestrzeni lat

Figure 3. Number of space junk over the years

Źródło: [About space...].

Source: [About space...].

Obecne i przyszłe rozwiązania ekologistyki kosmicznej

Narastający problem odpadów kosmicznych doprowadził do powstania Biura Programu NASA do szczątków kosmicznych (NASA Orbital Debris Program Office) w skrócie ODPO. Biuro to jest międzynarodowym liderem pod względem prowadzenia pomiarów środowiska orbitalnego oraz wypracowywania rozwiązań łagodzących wpływ śmieci kosmicznych na przestrzeń kosmiczną i ziemię. Zlokalizowane jest ono w centrum kosmicznym Johnsona. Jego zadaniem jest praca nad lepszym zrozumieniem środowiska śmieci orbitalnych i środków, które mogą być podjęte w celu kontroli wzrostu liczby śmieci. W ramach pracy biura wypracowano dwa rozwiązania informatyczne wspomagające kontrolę śmieci orbitalnych:

- NASA Debris Assessment Software (DAS) – narzędzie służące do oceny i weryfikacji zgodności statku kosmicznego, raket nośnych i ładunków z wymaganiami NASA dotyczącymi generowania śmieci, cyklu życia obiektu kosmicznego, bezpieczeństwa wejścia i wyjścia z atmosfery. Analiza DAS jest zgodna z wymaganiami agencji USA, ale również wielu innych agencji kosmicznych na całym świecie.
- NASA Orbital Debris Engineering Model (ORDEM) – narzędzie wykorzystujące złożone algorytmy do analizy danych i tworzenia modeli rozmieszczenia, liczby i rozmiaru śmieci na orbicie, co pozwala na symulację potencjalnych kolizji pomiędzy śmieciami a satelitami, statkami lub innymi obiektami kosmicznymi. Baza danych ORDEM jest stale aktualizowana o nowe dane i pomaga agencjom kosmicznym, przedsiębiorstwom oraz operatorom satelitów opracowywać strategie radzenia sobie ze skutkami kolizji lub tworzenia bardziej wytrzymałych statków i innych obiektów kosmicznych [Chow 2022].

Projektanci systemów kosmicznych w celu radzenia sobie z problemem śmieci kosmicznych w nowych misjach projektują obiekty i systemy kosmiczne w taki sposób, by po skończonej misji skierowały się w kierunku Ziemi i spłonęły w atmosferze [Borek 2016]. Jest to możliwe zastosowanie dla niektórych obiektów kosmicznych, jednak nie w każdym przypadku takie podejście jest słuszne. Niektóre śmieci kosmiczne mogą mieć wpływ na środowisko i atmosferę Ziemi poprzez emisję chemikaliów w procesie spalania. Może to powodować uszkodzenia warstwy ozonu, a w niektórych przypadkach przy niepomysłnym procesie spalania lub zastosowaniu odpornych materiałów np. tytanu, śmieci mogą się przedostać dalej i stanowić zagrożenie dla ludzkich osad.

W ramach koncepcji ekologistyki kosmicznej realizowane są różnorodne projekty i wdrażane technologie. Jednym z projektów jest rozwiązanie firmy ClearSpace. Celem tego rozwiązania jest stworzenie pierwszego pojazdu kosmicznego przechwytyjącego śmieci kosmiczne. Pojazd firmy ClearSpace w momencie znalezienia się w pobliżu celu, ma schwytać go za pomocą czterech mechanicznych ramion, a następnie deorbitować¹¹ się razem z nim i spłonąć w atmosferze. Pojazd ten ma pomóc przechwytywać śmieci kosmiczne, których samoistne skierowanie ku Ziemi jest niemożliwe [Aziz i in. 2021]. W ocenie Jędrzeja Barana z Centrum Badań Kosmicznych PAN, wspólna deorbitacja pojazdu wraz z przechwyconym obiektem jest bardziej opłacalna niż wynoszenie dodatkowego paliwa do zmiany orbity pojazdu. Może się to jednak zmienić wraz z rozwojem technologii kosmicznych [Pierwsza “kosmiczna śmieciarka”...]. Pierwszą demonstracyjną misją ClearSpace-1 ma być usunięcie z orbity wyższego stopnia rakiety Vespa z 2013 roku. Wizualizację pojazdu ClearSpace przedstawiono na rysunku 4.

Misja realizowana jest z ramienia ESA i zaangażowane jest w nią osiem krajów członkowskich: Szwajcaria, Polska, Niemcy, Czechy, Szwecja, Portugalia, Wielka Brytania oraz Rumunia. Kraje te wniosły do finansowania pierwszej misji łącznie 86 mln EUR. Oprócz usunięcia części rakiety, misja demonstracyjna ma zaprezentować technologię oraz otworzyć nowy rynek usług orbitalnych usuwania śmieci kosmicznych. Misja ma zostać zrealizowana w 2025 roku. [ESA commissions world’s...]. Rozwiązaniem zmierzającym do poprawy czystości przestrzeni kosmicznej jest wdrożenie technologii

¹¹ Deorbitacja – sprowadzenie statku kosmicznego z orbity w gęste warstwy atmosfery. Celem deorbitacji może być bezpieczne lądowanie statku kosmicznego na ziemi lub spalanie w gęstych warstwach atmosfery.

ograniczania odpadów (ang. *Space Debris Mitigation* oraz korygowanie ich ilości w przestrzeni kosmicznej (ang. *Space Debris Remediation*) [Muweis 2018]. Przy czym problem śmieci kosmicznych można rozwiązać wyłącznie przy międzynarodowej współpracy [Krag 2023]. Przykładem takiej współpracy są międzynarodowe działania zapobiegania odpadom kosmicznym podejmowane w ramach Międzyagencyjnego Komitetu Koordynacyjnego ds. Odpadów kosmicznych (IDAC).



Rysunek 4. Wizualizacja pojazdu ClearSpace

Figure 4. ClearSpace vehicle visualization

Źródło: [ClearSpace].

Source: [ClearSpace].

Celem IDAC jest poszerzanie współpracy w ramach badań naukowych w tym obszarze oraz wymiana informacji na temat śmieci kosmicznych. Jak wskazuje organizacja obowiązkową zasadą działania w przypadku misji kosmicznych powinno być usunięcie obiektu z przestrzeni kosmicznej po zakończonej misji. ESA zapowiada, że zamierza wdrożyć tę zasadę dla swoich misji od 2030 roku. W kontekście związków między klimatem na ziemi a przestrzenią kosmiczną zyskują na znaczeniu poglądy o konieczności zwiększenia wysiłków na rzecz aktywnego usuwania satelitów i śmieci kosmicznych z orbity [Lukacevic i in. 2022].

Bariery dla realizacji ekologii kosmicznej

Pomimo szybkiego rozwoju sektora kosmicznego oraz niewątpliwej konieczności wprowadzenia rozwiązań z zakresu ekologii, by zapobiec zbyt dużemu zaśmieceniu orbity wciąż istnieje wiele barier hamujących działania ekologii kosmicznej. Są to bariery natury polityczno-prawnej, finansowej i infrastrukturalnej.

Istotną barierą polityczno-prawną jest brak międzynarodowego konsensu w zakresie usuwania śmieci kosmicznych. Nie ma umowy międzynarodowej stanowiącej o śmieciach kosmicznych oraz regulującej wynoszenie obiektów w przestrzeń kosmiczną z zachowaniem zasad ekologii, której stronami byłyby wszystkie państwa korzystające z przestrzeni kosmicznej. Może to prowadzić do wielu nieporozumień

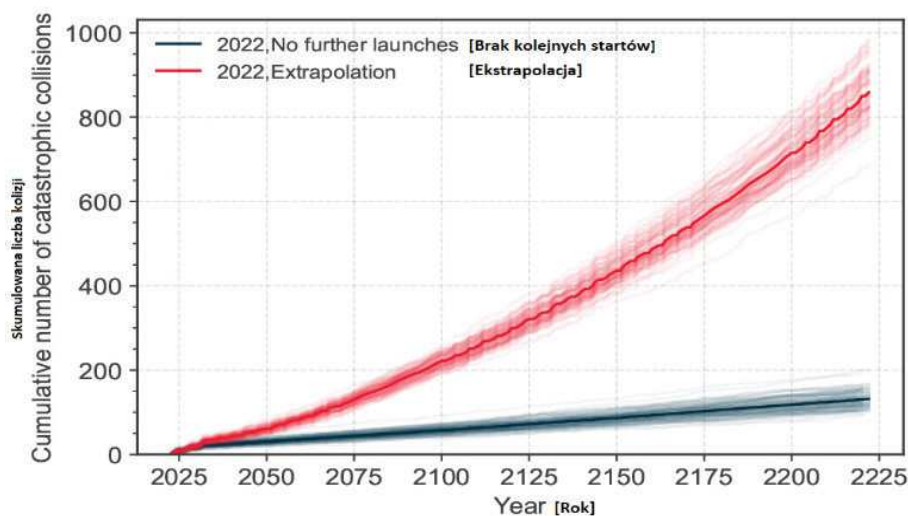
między narodowymi agencjami kosmicznym, ale również prywatnymi firmami z sektora kosmicznego. Przykładem takiej sytuacji są instrukcje Narodów Zjednoczonych dotyczące zmniejszenia liczby śmieci kosmicznych i pokojowego wykorzystania przestrzeni kosmicznej. Instrukcje te nie pełnią jednak funkcji prawnej i nie były w żaden sposób ratyfikowane, a wiele Państw ich nie przestrzega. W przypadku umowy międzynarodowej kluczowe jest osiągnięcie porozumienia międzynarodowego ponad podziałami politycznymi [Tallis 2015, Maurya i Mathur 2021].

Kolejną nieuregulowaną kwestią prawną jest własność śmieci kosmicznych oraz odpowiedzialność za ich utylizację i pozbywanie się z przestrzeni kosmicznej. Misje i operacje kosmiczne często realizowane są przez wspólne wysiłki wielu państw lub prywatnych przedsiębiorstw. Wspólnota misji powoduje problemy z podziałem odpowiedzialności w zakresie zarządzania i sprzątania śmieci kosmicznych. Następną kwestią związaną z zagadnieniem odpowiedzialności są potencjalne zniszczenia spowodowane przez statki kosmiczne sprzątające śmieci. W przypadku spowodowania szkody z powodu braku regulacji państwowych oraz trudności w wykryciu przyczyny uszkodzenia, nie ma możliwości przypisania odpowiedzialności [Swiss 2011]. Rozwiązaniem mogą być pojedyncze umowy między zleceniodawcą a zleceniobiorcą lub stworzenie jednolitych zasad dotyczących prawa i ubezpieczeń w przestrzeni kosmicznej [United Nations].

Barierą natury prawnej jest również brak regulacji prawnych w zakresie ekologistyki kosmicznej, jeśli chodzi o prawo własności intelektualnej. W przypadku rozwoju firm związanych ze zbieraniem śmieci kosmicznych pojawią się nowe technologie, które zostaną opatentowane, co może prowadzić do braku powszechnego dostępu, a tym samym do trudności z wdrożeniem technologii w zakresie ekologistyki na skalę międzynarodową. Taka sytuacja może mieć miejsce w przypadku komercjalizacji rynku ekologistyki kosmicznej i koncentracji prywatnych przedsiębiorstw na generowaniu zysków i ochronie praw własności intelektualnej zamiast promowania zrównoważonego rozwoju i bezpieczeństwa w przestrzeni kosmicznej. Problem ten może zostać rozwiązany poprzez otwarte (*open-source*) podejście do technologii, co ułatwi współpracę i rozwój innowacji w tej dziedzinie. Takie rozwiązanie musiałoby zostać ogólnie ustalone przez międzynarodowe prawo, co jest mało prawdopodobne z powodów polityczno-strategicznych [Weeden 2010].

Nieodłączną częścią rozwoju i zmiany w sektorze kosmicznym są fundusze oraz kontrakty. Z uwagi na wysokie koszty badań i rozwoju technologicznego w sektorze kosmicznym fundusze są niezbędne do rozwoju nowoczesnych technologii i rozwiązań w obszarze ekologistyki kosmicznej. Obecnie większość środków finansowych sektora pochodzi z funduszy i kontraktów publicznych przechodzących przez państwowe agencje kosmiczne. Innym sposobem pozyskania funduszy są inwestorzy *venture capital* i *private equity*. Przykładem firm z zakresu ekologistyki, które pozyskały fundusze przez *venture capital* są np. ClearSpace oraz Astroscale [Werner 2019]. Następnym możliwym źródłem finansowania w zakresie ekologistyki kosmicznej jest finansowanie społecznościowe (ang. *crowdfunding*) pozwalające na pozyskanie funduszy na mniejsze pojedyncze projekty.

Bariera infrastruktury związana ze śmieciami kosmicznymi, którą należy brać pod uwagę związana jest z tzw. syndromem Kesslera. Identyfikuje on ryzyko wzrostu liczby wysyłanych obiektów w przestrzeń kosmiczną bez proporcjonalnej rozbudowy infrastruktury do usuwania odpadów. Według Kesslera¹² zwiększająca się liczba obiektów w kosmosie powoduje większe prawdopodobieństwo zderzenia się, a tym samym generowania jeszcze większej liczby śmieci kosmicznych [Kessler 2010]. Przewidywania Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) w kontekście ilości śmieci kosmicznych na orbicie bez zastosowania rozwiązań ekologii kosmicznej zaprezentowano na rysunku 5.



Rysunek 5. Długoterminowa symulowana liczba kolizji na orbicie LEO

Figure 5. Long-term simulated number of collisions in LEO orbit

Źródło: [ESA 2022].

Source: [ESA 2022].

Górna linia wykresu ukazuje standardowy scenariusz zwiększania się liczby śmieci kosmicznych zakładający rosnącą liczbę lotów kosmicznych na podstawie historycznych danych, bez podejmowania działań w zakresie usuwania śmieci z orbity. Oznacza to, że bez rozwiązań w zakresie ekologii kosmicznej syndrom Kesslera nieuchronnie wystąpi. Druga linia pokazuje liczbę kolizji, zakładając brak jakichkolwiek misji kosmicznych zaczynając od 2022 roku. Jak wskazują dane na wykresie, nawet w tym scenariuszu będą generowane śmieci kosmiczne poprzez kolizje na orbicie. Krytyczny scenariusz zjawiska określanego mianem „efektu Kesslera” zakłada, że liczba odpadów w przestrzeni kosmicznej stworzy wokół Ziemi chmurę śmieci kosmicznych, które uniemożliwią dalszą eksplorację przestrzeni wokół naszej planety. Ten poziom krytyczny może zostać osiągnięty poprzez wykładniczy wzrost zderzeń wraz z każdym wysłanym obiektem w kosmos [Michalska 2022].

¹² Donald J. Kessler (ur. 1940) – amerykański astrofizyk i były naukowiec NASA znany z badań dotyczących śmieci kosmicznych. Pracownik Centrum Kosmicznego Johnsona, były członek “NASA Environmental Effects Project Office” [International Astronautical Federation 2022].

Podsumowanie i wnioski

Ekologistyka przestrzeni kosmicznej jest wschodzącą i niezwykle istotną dziedziną badań skupiającą się na zrównoważonych działaniach w przestrzeni kosmicznej. Jej rozwój jest kluczowy dla bezpieczeństwa ludzi i powodzenia misji kosmicznych. Niestety obecnie nie podejmuje się wystarczająco dużej liczby działań dążących do zapobiegania generowaniu śmieci kosmicznych lub sprzątanii ich z orbity. Z uwagi na dążenia do jak najszybszego zagospodarowania przestrzeni kosmicznej, w celu zdobycia przewagi geostrategicznej, aspekt ekologistyki kosmicznej jest niedostatecznie doinwestowany przez państwa i państwowe agencje kosmiczne. Jak wskazują wspólne symulacje Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA), Włoskiego Instytutu Krajowej Rady ds. Badań Naukowych (ISTI–CNR) oraz Instytutu Astrofizyki Kosmicznej i Fizyki Kosmicznej w Mediolanie (INAF–IASF) [Rossi 2009] należy jak najszybciej wdrażać rozwiązania niwelujące śmieci kosmiczne na orbicie, by uniknąć wystąpienia syndromu Kesslera.

Pierwszym działaniem powinna być edukacja oraz zainteresowanie opinii publicznej tematem śmieci kosmicznych. Liczne kampanie społeczne i wzrost świadomości społeczeństwa może spowodować presję na rządach państw do działań w zakresie zrównoważonej polityki kosmicznej. Następnym istotnym aspektem jest stworzenie międzynarodowego prawa umożliwiającego rozwiązanie takich kwestii jak własność intelektualna, czy ubezpieczenia w zakresie zbierania śmieci kosmicznych. Utworzone umowy prawne powinny zawierać konkretne zobowiązania i zasady dotyczące wysyłania obiektów w przestrzeń kosmiczną uwzględniające zasady ekologistyki kosmicznej dla każdego pojedynczego obiektu. Ważne w tym kontekście jest ustalenie, jak nie zwiększać lub niwelować liczbę śmieci kosmicznych pomimo rosnącej liczby lotów w kosmos. Przykładem może być obowiązkowa deorbitacja obiektu kosmicznego w atmosferę lub przesunięcie go na dedykowaną orbitę. Zasady prawne powinny obowiązywać dla wszystkich krajów wynoszących obiekty na orbitę. Należy również wziąć pod uwagę międzynarodową współpracę agencji w ramach usuwania odpadów z orbity. Działania te wymagają jednak chęci politycznej współpracy w tym aspekcie, co jest mało prawdopodobne ze względu na rosnące geostrategiczne i militarne znaczenie kosmosu.

Rozwój ekologistyki kosmicznej uzależniony jest od międzynarodowej polityki kosmicznej, a tym samym od inwestycji i kontraktów publicznych. Pomimo wzrostu konkurencyjności w sektorze kosmicznym poprzez pojawianie się startupów oraz innych firmy prywatnych to kontrakty narodowych agencji kosmicznych wyznaczają główny kierunek prowadzenia działalności w sektorze kosmicznym [Brukardt i in. 2021]. Rozwój ekologistyki kosmicznej jest zatem uwarunkowany politycznym i narodowym interesem państw. Kluczowym wnioskiem w kontekście usuwania odpadów orbitalnych oraz rosnącej ilości śmieci na orbicie jest potrzeba zmiany statusu quo w zakresie działań ekologistyki kosmicznej. Podając za pracę opublikowaną w czasopiśmie „Science” należy wyciągnąć wnioski z błędów popełnionych przy negocjacjach trwających ponad pięć lat dotyczących traktatu BBNJ (Biodiversity Beyond National Jurisdiction treaty) i rozpocząć uwspólnione międzynarodowe działania w kontekście prewencji powstawania nowych śmieci kosmicznych oraz usuwania aktualnych [Napper et al. 2023]. W przeciwnym wypadku bardzo szybki wzrost ilości śmieci kosmicznych może powodować zagrożenie dla ludzkiego życia oraz powodzenia misji kosmicznych, a w konsekwencji spowolnienie rozwoju sektora kosmicznego i technologii.

Bibliografia

- About space debris, [źródło elektroniczne] https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/About_space_debris [dostęp: 06.05.2023].
- AIAA Space Logistics Technical Committee Position Paper, 2004: Recommended Government Actions to Address Critical U.S. Space Logistics Needs, [źródło elektroniczne] https://www.aiaa.org/docs/default-source/uploadedfiles/issues-and-advocacy/policy-papers/information-papers/2004-information-papers/sltc-paper.pdf?sfvrsn=3a3c716e_0.&ref=moni-07b.spac [dostęp: 07.05.2023].
- AIAA Space Logistics Technical Committee, [źródło elektroniczne] www.aiaa-sltc.org [dostęp: 07.05.2023].
- Annual number of objects launched into space, [źródło elektroniczne] <https://ourworldindata.org/grapher/yearly-number-of-objects-launched-into-outer-space> [dostęp: 06.05.2023].
- Aziz S., Biesbroek R., Cipolla S., Piguat L., Richard-Noca M., Wolahan A., 2021: The ClearSpace-1 Mission: ESA and ClearSpace team up to remove debris, 8th European Conference on Space Debris, ESA Space Debris Office, 1–3.
- Baraniecka A., 2019: Ekologistyka jako odpowiedź przedsiębiorstw na kryzys środowiskowy, *Marketing i Rynek* 26(11), 3–14, <https://doi.org/10.33226/1231-7853.2019.11.1>
- Baraniecka A., 2019: Space Logistics – status and perspectives, *Transport Economics and Logistics, Research Journal of the University of Gdansk* 82, 67–78, <http://doi.org/10.26881/etil.2019.82.06>
- Baraniecka A., 2021, Znaczenie międzyplanetarnych łańcuchów dostaw w zrównoważonej eksploracji kosmosu, *Gospodarka Materiałowa i Logistyka* 12, 2–14, <https://doi.org/10.33226/1231-2037.2021.12.1>
- Baraniecka A., Gwóźdź K., 2021: Poziom dojrzałości ekologistyki w organizacji – identyfikacja i ocena. Wyniki badań pilotażowych, *Gospodarka Materiałowa i Logistyka* 63(1), 21–33, <https://doi.org/10.33226/1231-2037.2021.1.3>
- Borek R., 2016: Powstawanie i rozprzestrzenianie śmieci kosmicznych w świetle przepisów Unii Europejskiej, *Obronność Zeszyty Naukowe* 1(17), 17–31.
- Brukardt R., Klempner J., Pachthod D., Stokes B., 2022: The role of space in driving sustainability, security, and development on Earth, McKinsey&Company, [źródło elektroniczne] <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/the-role-of-space-in-driving-sustainability-security-and-development-on-earth> [dostęp: 05.06.2023].
- Brukardt R., Klempner J., Stokes B., 2021: R&D for space: Who is actually funding it?, McKinsey&Company, [źródło elektroniczne] <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/r-and-d-for-space-who-is-actually-funding-it> [dostęp: 11.05.2023].
- Byers M., Wright E., Boley A., Byers C., Unnecessary risks created by uncontrolled rocket reentries, *Nature Astronomy* 6, 1–9, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.02188>
- California Polytechnic State University, 2014: CubeSat Design Specification REV 13, 5.
- Chow D., 2022: o cheaply go: How falling launch costs fueled a thriving economy in orbit, NBC News, [źródło elektroniczne] <https://www.nbcnews.com/science/space/space-launch-costs-growing-business-industry-rcna23488> www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov [dostęp: 06.05.2023].
- ClearSpace, [źródło elektroniczne] www.clearspace.today [dostęp: 07.05.2023].

- ESA commissions world's first space debris removal [źródło elektroniczne] https://www.esa.int/Space_Safety/Clean_Space/ESA_commissions_world_s_first_space_debris_removal [dostęp: 07.05.2023].
- ESA, 2022: ESA'S Annual Space Environment Report, ESA Space Debris Office, [źródło elektroniczne] https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf [dostęp: 23.11.2023].
- International Astronautical Federation, 2022: International Astronautical Congress, Donald J. Kessler, [źródło internetowe] <https://www.iafastro.org/biographie/donald-j-kessler.html> [dostęp: 11.05.2023].
- Kessler D.J., Johnson N.L., Liou J.C., Matney M., 2010: The Kessler Syndrome: Implications to future space operations, AAS Publications Office, San Diego.
- Korneć R., Wereda W., 2017: Ekologistyka elementem kształtowania społecznej odpowiedzialności biznesu, *Nowoczesne systemy Zarządzania Zeszyt* 12(1), 233–245.
- Korzeń Z., 2001, *Ekologistyka*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań.
- Kotomaj K., 2022, *Logistyka misji kosmicznych na przykładzie misji na Księżyc*, [w:] A. Baraniecka, J. Marcinkowski (red.), *Trendy w Logistyce*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław.
- Krag H., 2023: Wywóz sieci w kosmosie ESA, [źródło elektroniczne] <https://www.deutschland.de/pl/topic/srodowisko/usuwanie-kosmicznych-smieci-miedzynarodowa-wspolpraca-w-kosmosie> [dostęp: 11.05.2023].
- Lukacevic J., Kertuysowa K., Heise R., 2022: Związek pomiędzy klimatem ziemi i przestrzenią kosmiczną- nowe podejścia do wzmocnienia odporności NATO, [źródło elektroniczne] <https://www.nato.int/docu/review/pl/articles/2022/08/18/zwiazek-pomiedzy-klimatem-na-ziemi-i-przestrzeni-kosmiczna-nowe-podejscia-do-wzmocnienia-odpornosci-nato/index.html> [dostęp: 07.05.2023].
- Maurya M.R., Mathur S., 2021: Space debris and international laws: the next generation concern, *The Daily Guardian*, [źródło elektroniczne] <https://thedailyguardian.com/space-debris-and-international-laws-the-next-generation-concern/> [dostęp: 11.05.2023].
- Meiling H., Jiaren S., Xiaohui W., Jiamqiang L., 2018: Logistics Space: A Literature Review from the Sustainability Perspective, *Sustainability* 2018, <https://doi.org/10.3390/su10082815>
- Michalska J., 2022: Śmieci w kosmosie. Zagrożenie życia na ziemi, WP, [źródło elektroniczne] <https://tech.wp.pl/smieci-w-kosmosie-zagrozenie-dla-zycia-na-ziemi,6790388384893696a> [dostęp: 18.07.2022].
- Muweis J., 2018: Odpady w przestrzeni kosmicznej i próby ich minimalizacji, *Kosmos Problemy Nauk Biologicznych* 67(2), 449–454, https://doi.org/10.36921/kos.2018_2403
- Napper I.E., Davies A.J., Jah M., Miner K.R., Thompson R.C, Quinn M., Koldewey H. J., 2023: Protects Earth's orbit: Avoid high seas mistakes, *Science* 379, 6636, 990–991, <https://doi.org/10.1126/science.adg8989>
- NASA, [źródło elektroniczne] www.nasa.gov [dostęp: 06.05.2023].
- PARP, 2015: Raport dotyczący potencjału i możliwości rozwoju branży kosmiczno-robotycznej w Polsce, Warszawa.
- Pierwsza “kosmiczna śmieciarka” poleci na orbitę w 2025 roku, [źródło elektroniczne] <https://naukawpolsce.pl/tag/misja-clearspace-1> [dostęp: 07.05.2023].
- POLSA, 2021: Analiza sektora kosmicznego wybranych państw, Departament Strategii i Współpracy Międzynarodowej, Warszawa.

- Polska Agencja Kosmiczna, 2021: Analiza sektora kosmicznego wybranych państw, Warszawa.
- Rossi A., Anselmo L., Pardini C., Jehn R., Valsecchi G.B., 2009: The New Space Debris Mitigation (SDM 4.0) Long Term Evolution Code, 5th European Conference on Space Debris.
- Seroka-Stolka O., Ociepa-Kubicka A., 2019: Green Logistics and circular economy, *Transportation Research Procedia* 39, 471–479.
- Swiss Re, 2011: Space debris: On collision course for insurers?, Zurich.
- Szołtysek J., 2009: Logistyka zwrotna, Wydawnictwo Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań.
- Szprenglewski B., 2019: Znaczenie ekologii w gospodarce i działalności firm logistycznych, *Zeszyty Naukowe. Ekonomika i Organizacja Logistyki* 4(1), 79–90, <https://doi.org/10.22630/EIOL.2019.4.1.7>
- Szydłowski C., 2015: Rola ekologii w zarządzaniu odpadami w mieście, *Acta Scientifica Academiae Ostroviensis. Sectio A, Nauki Humanistyczne, Społeczne i techniczne* 6(2), 29–45.
- Szymonik A., 2017: Ekologia w systemie logistycznym łańcuchu dostaw, Łódź.
- Szymonik A., Stanisławski R., Błaszczak A., 2021: Nowoczesna Koncepcja Ekologii, Difin, Warszawa.
- Tallis J., 2015: Remedating Space Debris Legal and Technical Barriers, *ASPJ Africa Francophonie* 9(1), 86–99.
- United Nation, [źródło elektroniczne] www.unoosa.org [dostęp: 11.05.2023].
- Vieira F., Farias De Sousa Junior A., de Almeida Leitão R., de Oliveira Dias M., 2021: Space Debris Mitigation and the Brazilian Foreign Space Policy, *Noble International Journal of Scientific Research* 5(2), 16–21.
- Weck O., 2021, Space Logistics:enabler of the final frontier, *Sustainable Space Logistics*, Lusanne/Switzerland
- Weeden B.C, 2010: Overview of the legal and policy challenges of orbital debris removal 27(1), 38–43.
- Werner D., 2019: Astroscale, ClearSpace aim to make a bundle removing debris, *Space News*, [źródło elektroniczne] <https://spacenews.com/astroscale-clearspace-aim-to-make-a-bundle-removing-debris/> [dostęp: 11.05.2023].