

Тетяна Вікторівна **ГІЛЬОРМЕ**

д.е.н., доцент, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара; провідний науковий співробітник НДІ енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9598-6532>
e-mail: gillyorme@i.ua

ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ЯК ДЕТЕРМІНАНТ ГЛОБАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ

У статті досліджено екологічні ризики космічної діяльності у забезпеченні концепції Clean Space як складової міжнародної безпеки. Доведено, що техногенне сміття в орбітальному просторі досягло катастрофічних масштабів, що потребує негайних змін із метою сталого розвитку космічної активності. Побудовано класифікацію екологічних ризиків, що виникають в умовах космічної діяльності, за чотирьома групами: за джерелами ризиків, виду орбіт, причинно-наслідкові, за можливостями впливу. Визначено, що за структурою об'єктів космічного сміття за країнами світу станом на лютий 2020 р., найбільшими власниками орбітального сміття, є Росія (СРСР), США та Китай.

Ключові слова: екологічний ризик, безпека, ефект темпоральності, космічне сміття, Clean Space

ВСТУП

Пройшло майже 64 роки, як уперше успішно відправлено штучний супутник на орбіту Землі. В епоху New Space перед Людством постає глобальна проблема обмеженості космічного орбітального простору. Сталий розвиток космічної діяльності буде можливим лише тоді, коли користувачі космосу будуть реалізовувати технології та практики, придатні, щоб уникнути накопичення об'єктів на орбіті Землі.

Техногенне сміття в орбітальному просторі досягло катастрофічних масштабів. Станом на 2020 р. майже 85 % космічних об'єктів належать до класу не контрольованих супутників [1]. До них також повинно бути додано: верхні ступені пускової установки; дрібні уламки, викликаних вибухами, фрагментаціями, зіткненнями – сукупність уламків складається з мільйонів об'єктів. Космічне сміття – це об'єкти, що розподілені нерівномірно у космічному просторі – зосереджені на орбіті Землі (низька навколоземна орбіта (LEO) та геостаціонарна навколоземна орбіта (GEO)).

О.А. Машков, В.Ф. Фролов, А.М. Гурова [2] констатують, що боротьба з засміченням космосу починається на Землі, адже саме від забезпечення екологічної безпечності матеріалів, процесів і технологій під час повного циклу космічної діяльності залежить збереження екосистеми навколоземного космічного простору.

О. Косіцина, М. Дронь, В. Ємець [3] дослідили проблеми забруднення хлоровмісними продуктами згоряння сучасних твердих ракетних палив на основі амоній перхлорату та запропонували використовувати екологічне паливо.

Ж.Ю. Кочетова, Н.В. Маслова, О.В. Базарский [4] розрахували уточнений сумарний показник забруднення ґрунтів специфічними з'єднаннями авіаційно-космічної діяльності (гас, формальдегід, нітрати) та здійснили ранжування досліджуваних функціональних зон за типом екологічної ситуації.

Однією з особливостей здійснення ділової активності у космосі є юридична проблема щодо відсутності майнових прав на космічне сміття. У глобальному просторі, держави, космічні агенції досягли домовленості про спільну відповідальність за наслідки існування

космічного сміття на орбіті Землі. Пріоритетною відповідальністю у цьому секторі є екологічна відповідальність.

МЕТА роботи – дослідження екологічних ризиків, що виникають у космічній діяльності.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Теоретико-методологічною основою дослідження є сучасні теорії, концепції, гіпотези. Застосовано такі загальнонаукові та специфічні методи, що забезпечують достовірність отриманих результатів і висновків: діалектичні, гносеологічні й логічні, зокрема термінологічний аналіз, – для дослідження понятійно-категорійного апарату; індукції, дедукції, наукової абстракції й узагальнення – для обґрунтування економічних категорій і дефініцій; монографічний та порівняльний – для систематизації наукових підходів до конкретизації теоретичних засад розширення методологічного базису; прийоми абстрактно-логічного методу – для розроблення теоретико-методологічних узагальнень і формулювання висновків за результатами дослідження.

РЕЗУЛЬТАТИ

У XXI ст. на глобальному рівні партнерства відбулася поява концепції Clean Space [5]. Ця ініціатива має три напрями: EcoDesign – проектування проектів з вирішення впливу космічного сміття на навколишнє середовище; CleanSat – проектування заходів для зменшення формування космічного сміття; eDeorbit – видалення великих об'єктів космічного сміття з орбіти [5].

eDeorbit як технологічна платформа (розробник Європейське космічне агентство) здатна вирішувати такі завдання: заохочення створення нових ринків та послуг для профілактики та утилізації космічного сміття; здатність надавати приватним компаніям консультування з рішень наземних проблем із використанням космічних технологій (телекомунікації, системи спостереження за землею та навігаційними системами); оренда технологічної платформи для утилізації космічного сміття.

Необхідно наголосити, що Європейське космічне агентство (далі – ЄКА) та Національне управління США з аеронавтики та дослідження космічного прос-

тору (НАСА) в оцінюванні космічної продукції використовують концепцію життєвого циклу (Life Cycle Assessment (LCA)). У документі «Процедурні вимоги управління ризиком» (Agency Risk Management Procedural Requirements) від 16.12.2008 [6] детально описано процедуру аналізу життєвого циклу космічного устаткування у широкому його значенні. Для цього витрати операційної діяльності структуровано так: довиробничі (розроблення формування виробу, виготовлення технологічної оснастки, відпрацювання виробу на технологічність, пуско-налагоджувальні роботи, придбання необхідного обладнання); виробничі витрати (прямі витрати на виробу, непрямі витрати виробництва); поза виробничі витрати (адміністративні та комерційні витрати на збут); після виробничі витрати (утилізація відходів та технологічної оснастки). Так, цей документ зобов'язує підприємства космічного сектору під час розрахунку вартості продукції враховувати ліквідаційну вартість – вартість утилізації космічного сміття. Головним недоліком цього документу є неможливість визначення впливу на довкілля.

Цей недолік враховано у розробці «Вимоги та процес управління програмами та проектами НАСА» від 2005 р. Передбачено формування плану заходів, яких необхідно вжити для забезпечення населення, космонавтів, обладнання й майна НАСА, а також визначення всіх видів діяльності, таких як: безпека, надійність і ремонтпридатність, забезпечення якості, гарантій безпеки програмного забезпечення, навколишнього середовища, пов'язаних із проектуванням і випробуванням, охоплюючи запобігання утворенню орбітального сміття [7]. Обов'язковим елементом вартості космічної продукції є здійснення екологічної оцінки.

Спільними критеріями оцінки для ЄКА та США також є такі технічні стандарти Міжнародної організації стандартизації, як: ISO 24113:2011 «Космічні системи. Вимоги з мінімізації космічного сміття», ISO/PRF TR 18146 «Космічні системи. Проектування та операційна настанова для космічних апаратів, які функціонують у середовищі космічного сміття», ISO/TR 16158:2013 «Космічні системи – уникнення зіткнень з орбітальними об'єктами», ISO 16126:2014 «Системи космічні. Оцінка життєвості конструкції непілотованого космічного апарату щодо космічного сміття та метеоритних тіл для забезпечення успішного відокремлення після польоту».

З приводу превентивних заходів засміченості космічного простору, у правовому полі діють Принципи з використання ядерних джерел енергії в космічному просторі, схвалених ГА ООН 14.12.1992 (Principles Relevant to the Use of Nuclear Power Sources In Outer Space). В оцінюванні безпеки враховується додаткова компенсація: відшкодування належним чином обґрунтованих витрат на проведення операцій з пошуку, евакуації та розчистки, включаючи витрати на допомогу, одержану від третіх сторін [8].

Національні нормативні вимоги більше враховуються у ліцензуванні космічної діяльності. Так, відповідно до Закону про космічні операції Французької Республіки (French Space Operations Act) від 22.05.2008 [9] розглянуті питання формування плану із запобігання ризиків, які несуть неактивні космічні об'єкти

як навколишньому середовищу Землі, так і навколоземному космічному простору, а також оцінювання дотримання моральних, фінансових, професійних та технічних вимог, проводиться в межах дозвільних процедур.

В Україні фактично відсутні жодні норми, які зобов'язували виробників космічної техніки мінімізувати створення космічного сміття та видаляти космічний об'єкт після закінчення строку його функціонування.

З метою сталої космічної діяльності необхідно здійснювати оцінювання загрози для безпеки населення стосовно кожної стадії місії (передпускова стадія; запуск; вивід на орбіту; входження в щільні шари атмосфери) з урахуванням запланованих операцій та ліцензованої діяльності. Оцінювання повинне включати: аналіз можливих неполадок носія й корисного навантаження, здатних вплинути на безпеку (включаючи безпеку інших активних космічних апаратів); оцінку ймовірності їх виникнення, підтверджену теоретичними й історичними даними стосовно надійності носія; аналіз наслідків таких неполадок.

Оцінювання екологічних ризиків, що виникають у умовах здійснення космічної діяльності, повинно охоплювати: ризики, що виникають на стартовому полігоні; небезпеки, що загрожують районам, розташованим вздовж траєкторії запуску, у зв'язку з падінням відпрацьованих частин апаратів; ризики, пов'язані з польотом; орбітальні ризики, зокрема ризик зіткнення та/або утворення сміття на проміжних і кінцевих орбітах верхніх щаблів носія; ризики, пов'язані із входженням верхніх щаблів носія й корисних навантажень у щільні шари атмосфери.

Відповідно до здійсненого контент-аналізу можна побудувати класифікацію екологічних ризиків, що виникають у космічній діяльності (рис. 1). *Група 1 «Джерело ризиків»* – до цієї групи відносяться технічні об'єкти, основними з яких є: ракетні, корабельні, супутникові, орбітальні. Так, максимальний термін служби техніки на орбіті заввишки до 2000 км не повинен перевищувати 25 років, після чого він підлягає утилізації [10].

Водночас у розробленні космічної техніки необхідно врахувати такі положення: відповідність технологічних можливостей платформи – наскільки бортові системи дозволяють автономно здійснювати маневри з відведення з орбіти/переходу на іншу орбіту без втручання з Землі; критерії для визначення закінчення терміну служби ракетно-космічної техніки та досягнення 90 % ймовірності успішного відведення відпрацьованих супутників та аналіз експлуатації великих супутникових угруповань тощо.

Група 2 «Види орбіт». Можна розділити просторову щільність у відсотках. Фактично, більше 70 % об'єктів знаходяться на LEO, близько 20 % знаходяться на проміжних високо ексцентричних і середніх навколоземних орбітах (GEO від 12846 км до 33786 км) і менше 10 % знаходяться на околгеостационарних орбітах. У районі LEO ймовірність зіткнення з уламками, відповідно до моделі NASA ORDEM, становить $8 \cdot 10^{-3}$ в рік для супутника з діаметром 10 м². Ця відносно висока ймовірність пояснюється високою щільністю уламків і їх значною середньою швидкістю.

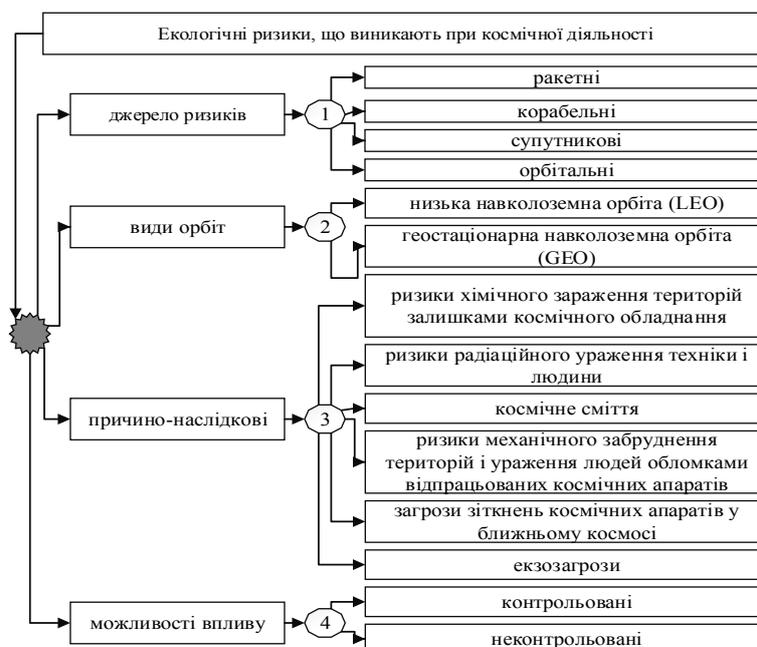


Рис. 1. Класифікація екологічних ризиків, що виникають при космічній діяльності [систематизовано автором]

Вірогідність зіткнень в GEO, – навпаки менше, – між $3 \cdot 10^{-6}$ і $3 \cdot 10^{-7}$. Ця менша ймовірність пов'язана з обмеженою кількістю уламків, їх великим просторовим розподілом і більш низькими середніми відносними швидкостями. На GEO є багато критично важливих і комерційних корисних навантажень, як правило, більше й дорожче, ніж супутники LEO.

Група 3 «Причино-наслідкові». Ризики хімічного зараження територій залишками космічного обладнання, насамперед, це компоненти твердого та рідкого ракетного палива. З урахуванням токсичності компоненти діляться на чотири класи небезпеки (у напрямку зниження небезпеки): перший клас – горючі гідразінового ряду (гідразин, несиметричний диметилгідразин та продукт Люмінал-А); другий клас – деякі вуглеводневі горючі (модифікації гасу й синтетичні горючі) й окислювач перекис водню; третій клас – окислювачі азотний тетроксид (АТ) й АК-27І (суміш HNO_3 – 69,8%, N_2O_4 – 28%, J – 0,12... 0,16%); четвертий клас – вуглеводневу пальне РГ-І (керосин), спирт етиловий та бензин авіаційний. Багато компонентів ракетного палива здійснює негативний вплив на екологію Землі та Людини. Так, перхлорати негативно впливають на рослинний покрив землі, трифторид азот як парниковий газ провокує глобальне потепління, гідразин – у разі гострого хімічного отруєння призводить до летального випадку. У разі використання ракет з екологічно чистими компонентами палива заходи з ліквідації наслідків у місцях падіння частин зводяться до механічних способів збору залишків металоконструкцій.

Космічне сміття. Проблема космічного сміття поступово стає все більш важливою для майбутнього використання космічного простору. Багато симуляцій на основі моделювання EVOLVE припускають, що кількість об'єктів на орбіті буде нелінійно зростати,

навіть якщо у космос більше не буде додаватися нові об'єкти, – через зіткнення, що викликані вже існуючими уламками. Цей каскад зіткнень може потенційно привести до ситуації ланцюгової реакції – ефект «доміно» (ефект Кесслера). На рис. 2 розглянута структура об'єктів космічного сміття за країнами світу станом на лютий 2020 р. відповідно Звіту ОЕСР [11].

Ймовірність зіткнення залежить від таких основних чинників: конфігурація орбіти, тривалість перебування на орбіті, фізичні габарити та просторова щільність знаходження об'єктів на заданій висоті. Узгодження робочих процедур щодо необхідної утилізації чи переходу на більш високу орбіту або відведення на нижчу орбіту, повинно бути враховано до початку штатного режиму експлуатації космічної техніки [12; 13].

Необхідно не забувати про ефект темпоральності – ефект «розтягнутого» часу поєднується з ефектом його прискорення (сингулярністю) – прискоренням розвитку ситуаційних змін. Це впливає на катастрофічний стан захарашеності космічним сміттям орбіти Землі з моменту запуску першого штучного супутника (1957 р.). Еволюцію зростання космічного сміття можна розділити на три основних етапи: 1960–1996 рр., коли зростання було майже лінійним зі швидкістю 260 уламків у рік; 1996–2006 рр., впродовж яких зростання все ще був майже лінійним, ймовірно через виконання керівних принципів зі зменшення утворення сміття; 2006–2019 рр., протягом яких у результаті двох зіткнень утворювалося більше 1250 уламків у рік.

Група 4 «Можливості впливу». Штучні космічні об'єкти розподіляються за можливості впливу на них на дві підгрупи: контрольовані та неконтрольовані. Так, після закінчення терміну експлуатації великі космічні об'єкти (наприклад, космічна станція «Мир») керують затоплюють на «кладовищі космічних кораблів» у Тихому океані – точка Немо.

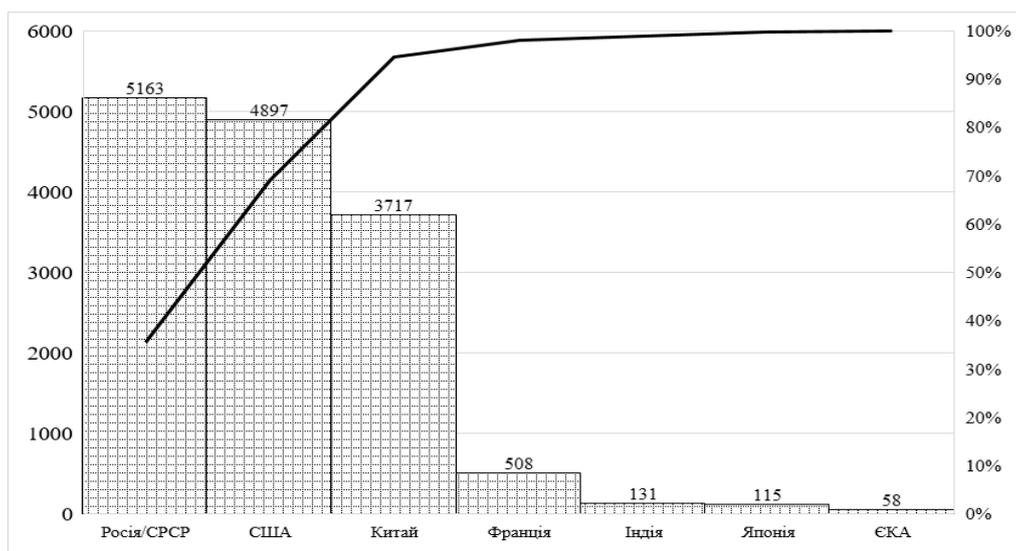


Рис. 2. Структура об'єктів космічного сміття за країнами світу станом на лютий 2020 р. [побудовано на основі [11]]

ВИСНОВКИ

Аналіз вимог із визначення загальної ефективності ЄКА та США, її складових: економічної, соціальної, екологічної, свідчить про нечіткі за ступенем своєї ефективності та неуніфіковані критерії оцінювання впливу на навколишнє середовище та на навколоремний космічний простір.

Українське національне законодавство у сфері космічної діяльності знаходиться на етапі гармонізації з міжнародними космічними агенціями. Залишається багато недостатньо обґрунтованих питань: вдосконалення Технічного регламенту космічної діяльності, Порядку страхування відповідальності за шкоду, завдану космічному об'єкту, адже відповідний страховий договір має бути одним із документів, обов'язкових для отримання дозволу, щоб виконати міжнародне зобов'язання держави із несення відповідальності за будь-яку національну космічну діяльність. Це повинно сприяти підвищенню ефекту дієвої комерціалізації космач-

ної діяльності в умовах виконання міжнародних зобов'язань України із несення відповідальності за космічну діяльність.

Необхідно відмітити, що у статті розглянуто певний спектр ризиків відповідно до двох фаз життєвого циклу космічної техніки – «Експлуатація» (Operation) та «Утилізація» (Utilization). Це обумовлено, що саме на цих фазах існує найбільша ймовірність виникнення масштабних ризиків «впливу». Перспективами подальших досліджень є розроблення системи оцінювання ризиків впливу на всіх фазах життєвого циклу космічної техніки: фаза 0 «Визначення місії/ідентифікація потреб» (Mission analysis/needs definition); фаза А «Обґрунтування проекту» (Feasibility); фаза В «Попереднє визначення проекту» (Preliminary design); фаза С «Детальне визначення проекту» (Detailed design); фаза D «Випробування та виробництво» (Qualification & Production); фаза Е «Експлуатація» (Operation); фаза F «Утилізація» (Utilization).

Список використаних джерел

1. The space report 2020. URL: <https://www.thespacereport.org/register/the-space-report-2020-quarter-1-pdf>
2. Машков О.А., Фролов В.Ф., Гурова А.М. Еколого-правові механізми запобігання засміченню навколоремного космічного простору. *Стандартизація. Сертифікація. Якість*. 2017. № 2. С. 31–36.
3. Kositsyna O.S., Dron M.M., Yemets V.V. The environmental impact assessment of emission from space launches: the promising propellants components selection. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2020. № 28(2). pp. 186–193.
4. Кочетова Ж.Ю., Маслова Н.В., Базарский О.В. Оценка влияния авиационно-космической деятельности на экологическое состояние урбанизированной территории. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2018. № 4. С. 107–117.
5. Clean Space. The European Space Agency. URL: https://www.esa.int/Safety_Security/Clean_Space
6. Agency Risk Management Procedural Requirements. NASA. URL: <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=8000&s=4B>
7. Program and Project Management. NASA. URL: https://www.nasa.gov/offices/oc/funcions/prog_proj_mgmt.html
8. Principles Relevant to the Use of Nuclear Power Sources In Outer Space. United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). URL: <http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/principles/nps-principles.html>
9. French Space Operations Act (2008). Centre National D'etudes Spatiales. URL: <https://www.unoosa.org/pdf/pres/lsc2009/pres-04.pdf>
10. Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities. Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. URL: https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2018/aac_1052018crp/aac_1052018crp_20_0_html/AC105_2018_CRP20E.pdf
11. US Air Force definition of debris and ownership. US Air Force. URL: <https://www.space-track.org>
12. Hilorme T., Dron M. Substantiation of projects in the space debris market in the age of new space. European vector of development of the modern scientific researches: collective monograph. Riga: «Baltija Publishing», 2021. pp. 68–88.
13. Gilorme T.V., Shachanina Y.K. Corporate Social Reporting as a Dominant of Information Support for Enterprise

Management. *Economics and Society*. 2016. № 5. pp. 672–677.

References

1. The space report 2020. URL: <https://www.thespacereport.org/register/the-space-report-2020-quarter-1-pdf>
2. Mashkov O., Frolov V., Hurova A. Environmental and legal mechanism for preventing from nearearth space environment pollution. *Standardization, certification, quality*. 2017. № 2. pp. 31–36. (in Ukrainian).
3. Kositsyna O.C., Dron M.M., Yemets V.V. The environmental impact assessment of emission from space launches: the promising propellants components selection. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2020. № 28(2). pp. 186–193.
4. Kochetova Zh., Maslova N., BazarSKIY O. Assessment of the impact of aerospace activities on the environmental state of an urbanized area. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanism*. 2018. № 4. pp. 107–117. (in Russian).
5. Clean Space. The European Space Agency. URL: https://www.esa.int/Safety_Security/Clean_Space
6. Agency Risk Management Procedural Requirements. NASA. URL: <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=8000&s=4B>
7. Program and Project Management. NASA. URL: https://www.nasa.gov/offices/oce/functions/prog_proj_mgmt.html
8. Principles Relevant to the Use of Nuclear Power Sources In Outer Space. United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). URL: <http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/principles/nps-principles.html>
9. French Space Operations Act (2008). Centre National D'etudes Spatiales. URL: <https://www.unoosa.org/pdf/pres/lsc2009/pres-04.pdf>
10. Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities. Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. URL: https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2018/aac_1052018crp/aac_1052018crp_20_0_html/AC105_2018_CRP20E.pdf
11. US Air Force definition of debris and ownership. US Air Force. URL: <https://www.space-track.org>
12. Hilorme T., Dron M. Substantiation of projects in the space debris market in the age of new space. European vector of development of the modern scientific researches: collective monograph. Riga: «Baltija Publishing», 2021. pp. 68–88.
13. Gilorme T.V., Shachanina Y.K. Corporate Social Reporting as a Dominant of Information Support for Enterprise Management. *Economics and Society*. 2016. № 5. pp. 672–677.

Tetiana HILORME

Doctor of Economics, Associate Professor, Oles Honchar Dnipro National University; Leading Researcher of Scientific Research Institute of Power

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9598-6532>

e-mail: gillyorme@i.ua

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL RISKS OF SPACE ACTIVITIES AS A DETERMINANT OF GLOBAL SECURITY

The paper investigates environmental risks of space activities in ensuring the concept of Clean Space as an integral component of global security. It has been proven that man-made debris in orbital space reached catastrophic proportions which calls upon immediate changes with the purpose of sustainable development of space activities. The work incorporates an elaborated classification of environmental risks that occur in the process of space activities, divided into four groups: by the source of risk, by type of orbit, by cause and effect and by the possibility of influence. It has been determined that countries to have generated the most space debris objects are Russia (the USSR), USA and China. Ukrainian national legislation in the sphere of space activities is currently at the stage of harmonization with international space agencies. Numerous issues remain insufficiently substantiated: improvement of the Technical Regulations for space activities, Procedures of liability insurance for damage inflicted to the space object, since the respective insurance contract must be one of the documents mandatory for fulfilling international obligations of the state with regard to its accountability for any type of national space activities. It has been established that apart from the Kessler effect there also exists a temporality effect – the effect of “lengthened” time combined with the effect of its acceleration (singularity) – accelerated development of situational changes. This affects the catastrophic state of space debris cluttering in Earth’s orbit since the launch of the first artificial satellite. The paper examines a particular range of risks in accordance with two phases of the technological lifespan of space systems – ‘Operation’ & ‘Utilization’. It is stipulated by the fact that namely in these phases there exists the highest probability of occurrence of major risks of “influence”. Prospects of further research consist in the development of the system for assessment of risks of influence at all phases of the technological lifespan of space systems: ‘Mission analysis/needs definition’; ‘Feasibility’; ‘Preliminary design’; ‘Detailed design’; ‘Qualification & Production’; ‘Operation’; ‘Utilization’.

Keywords: environmental risk, security, temporality effect, space debris, Clean Space