

А. В. КУПЧИН, д-р філософії

О. О. МАЦЮК, с. н. с.

Є. Я. ДЕМЧЕНКО, канд. техн. наук, с. н. с.

І. В. БОРОХВОСТОВ, д-р техн. наук, с. н. с.

О. Д. МЕЛЬНИК, канд. техн. наук

МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПРОРИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НАТО

Резюме. Пропонована увазі стаття має оглядовий характер і спрямована на систематизацію, узагальнення та висвітлення науково-методичних засад НАТО до проведення технологічного форсайту з визначення проривних технологій.

У статті описано загальні підходи, основні методологічні аспекти та показники оцінювання технологій, наведено спільні та відмінні риси у форсайтах 2020 та 2023 років. Відображено процес технологічного оцінювання за циклом Гартнера та рівнями технологічної зрілості.

Окремим блоком наведено результати технологічного форсайту з горизонтом прогнозування до 2043 року. Оцінено рівні технологічної зрілості та потенційного впливу на спроможності НАТО, визначено орієнтовні часові горизонти готовності технологій. До кожного науково-технологічного напрямку наведено короткий опис і показано декомпозицію на технологічні групи.

Ключові слова: проривні технології, перспективні технології, технологічний форсайт, військово-технічна політика, оборонно-промисловий комплекс, прогнозування, оцінювання технологій, цикл Гартнера, рівні технологічної зрілості.

ВСТУП

Висока капіталомісткість сучасних наукових досліджень і розробок не дає змоги навіть найбільш розвиненим країнам світу проводити дослідження у всьому спектрі наукової думки. Для розв'язання цієї проблеми одним із найбільш ефективних інструментів є технологічний форсайт, у результаті якого визначаються певні тенденції в науково-технологічній сфері.

Якісний форсайт забезпечує формування конкретного переліку технологій та подальшу концентрацію зусиль на прогнозовано найбільш необхідних та "виграшних" дослідженнях і розробках. Процес формування переліку проривних технологій (ПТ) і загалом технологічний форсайт у цій галузі знань є досить новою та дискусійною темою. Сфера визначення ПТ, зокрема оборонна, є новим сегментом наукових досліджень не лише для України, а й для більшості країн світу.

На відміну від критичних технологій (КТ), перелік яких кожна країна визначає для себе індивідуально, ПТ є більш широким поняттям загальносвітового масштабу, як результат досягнень світової науки [1].

Генеральною ознакою ПТ є проривний або революційний ефект від їх впровадження. Тобто, це такі технології, які змінюють усталені технологічні цикли, радикально підвищують власти-

вості (характеристики) або застосовують новітні фізичні принципи та розв'язують нові задачі [2].

Поштовхом до написання цієї статті став опублікований звіт Організації НАТО з питань науки та технологій (далі — STO) "Science & Technology Trends 2023–2043" [3], де визначено проривні та виникаючі технології (emerging and disruptive technologies, EDT) з прогнозованим горизонтом зрілості до 2043 року.

Наведений вище звіт є другим виданням подібного роду. Перша доповідь "Science & Technology Trends 2020–2040" була опублікована у 2020 р. та спричинила досить серйозний резонанс у наукових колах, особливо щодо питань трансформації технологічного форсайту в сучасних умовах [4].

Інтерес до цих звітів, окрім сформованих переліків ПТ НАТО, обумовлений досить змістовним описом методологічних аспектів під час прогнозування та оцінювання технологій. Саме здійснення аналізу підходів до проведення технологічного форсайту з визначення ПТ і є фокусом цього аналітичного дослідження, результати якого викладено далі.

Варто зауважити, що усталених трактувань термінів "emerging" та "disruptive" на разі немає, тому науковці НАТО приводять власне розуміння цих визначень [3].

Виникаючі або нові технології (emerging technologies) — це ті ембріональні технології чи наукові відкриття, які, як очікується, досягнуть зрілості до 2043 р., не використовуються широко зараз, або ж їхній вплив на оборонні спроможності Альянсу не зовсім зрозумілий.

Проривні технології (disruptive technologies) — це ті технології чи наукові відкриття, які, як очікується, матимуть революційний вплив на оборону, безпеку або виробничі потужності НАТО в 2023–2043 роках.

Конвергентні технології (convergent technologies) — це комбінації технологій, які створюють проривний ефект шляхом синергетичної інтеграції.

Метою цієї наукової статті є визначення типових рис технологічного форсайту ПТ, а також найбільш доцільних методів і показників оцінювання технологій.

Актуальність статті обумовлена двома факторами. По-перше, інтеграція України до євроатлантичної спільноти, зокрема НАТО, підштовхує до поступового переходу до західних стандартів технологічного форсайту, де формування переліку ПТ стоїть на щаблі не нижчому, ніж КТ.

По-друге, технологічний форсайт із горизонтом на 20 років визначить вузькі найбільш перспективні науково-технологічні напрями та не дозволить розпорошувати зусилля на проведення “недоцільних” наукових досліджень, що “вже сьогодні” створить підстави для довгострокового технологічного розвитку.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Технологічний форсайт із визначення ПТ є досить новою течією наукових досліджень, як власне і сама парадигма формування переліку ПТ.

Однак у мережі все ж є доступні публікації, які дають змогу здійснити аналіз методологій різних науково-дослідних установ та організацій у світі.

Так, у [5] описано процес визначення ПТ (бізнес-моделей). Зазначається, що єдиним інструментом при цьому був давно відомий метод бібліометричного аналізу. Для здійснення пошуків було обрано такі наукові бази даних: CAPES Journal Portal, EBSCO, SCOPUS та Web of Science, з яких відібрано лише 19 наукових публікацій. Автори зазначають, що такий підхід є ефективним під час прогнозування. У результаті було визначено певні технології та описано їх. Після цього відбувалося обговорення та формування відповідних висновків.

У праці [6] сформовано типологію основних форсайт-методів. Автором визначено, що най-

більш популярні методи засновані на різного роду експертних опитуваннях. Зокрема, це SWOT-аналіз, мозковий штурм, Делфі або звичайне інтерв'ю. До найбільш помітних аналітичних методів автор зараховує бібліометричний аналіз і визначення трендів.

Результати дослідження щодо визначення основних форсайт-методів наведено також у роботі [7]. Зазначено, що у світовій практиці використовується декілька десятків методів форсайту, з яких найбільш популярним є метод Делфі. До більш сучасних методів зараховують бібліометричний і патентний аналіз, метод технологічної дорожньої карти, сканування горизонту тощо. Дослідники, ґрунтуючись на здійсненому аналізі, визначають, що ідеального набору методів немає, у кожному форсайт-проєкті застосовується їх комбінація. Однак основа форсайту цілеспрямована на використання знань експертів.

У праці [8] запропоновано методіку форсайту на основі штучних нейронних мереж. Такий підхід безумовно є цікавим і сучасним, проте в статті наведено лише загальні положення без розкриття змісту прогнозування. Окрім того, не зазначено, які саме технології мають стати результатом прогнозування.

Доволі цікавий погляд на визначення та структурування ПТ представили дослідники Імперського коледжу Лондона [9]. Так, оцінюючи потенційний вплив технологій, визначено 100 технологій і структуровано їх у вигляді таблиці 10×10.

Вісь ординат визначає рівень проривного ефекту, а вісь абсцис — час. Таким чином, 100 технологій поділяються на чотири групи, перша з яких (зелені) — це ПТ, які вже впроваджуються. Технології другої групи (жовті) є ймовірними ПТ найближчого майбутнього (через 10–20 років). На даний час такі технології активно досліджуються та проводяться експерименти.

Технології третьої та четвертої груп (червоні та сірі) імовірно з'являться в більш віддаленому майбутньому (більше 20 років). Щодо таких технологій більшість дослідників займає вичікувальну позицію та стежить за поодинокими авантюрами розробками в цих сферах. До речі, сірі технології (четверта група) назвали привидами (Ghost Technologies), оскільки плацдарм для їхнього розвитку базується на маргінальному мисленні, іноді межуючи з безумством.

Методологічні підходи до форсайтів Імперського коледжу в публікаціях не наведені, проте визначено, що більшість досліджень відбуваються шляхом сканування зовнішнього середовища на предмет виявлення слабких сигналів змін, які

є індикаторами потенційних проривних ефектів. Зазначається, що кожен окремих форсайт-проект застосовує чітко визначені методології, які базуються на експертних оцінках.

Дослідники з Gartner Incorporation мають свою унікальну методологію визначення технологічних тенденцій. Для цього використовується так званий цикл Гартнера, про який буде більш детально розказано в основній частині [10]. Головним показником оцінювання є рівень уваги до технології, виходячи з чого й визначається її перспективність відповідно до функції (кривої) циклу Гартнера.

Окремої уваги заслуговує публікація на платформі LinkedIn, яка сформована штучним інтелектом [11]. Так, неймережа сформулювала дефініцію ПТ та методику їх визначення, оцінювання та впровадження. Загалом визначено шість основних кроків, перший з яких — сканування зовнішнього середовища на предмет виявлення слабких сигналів. Це можуть бути нові потреби клієнтів, їх уподобання, регулятивні зміни, соціальні тенденції чи технологічні прориви. Для цього можуть бути використані дані як від об'єктивних джерел, так і експертні оцінки.

Другим кроком визначено аналіз потенційного впливу виявлених технологій на певну галузь чи бізнес. Третій крок – тестування або запуск мінімально життєздатних продуктів для перевірки своїх припущень, збору відгуків і вимірювання результатів.

Наступні кроки стосуються адаптації технологій і передбачення майбутніх сценаріїв їх розвитку.

Здійснений аналіз наукових публікацій підтвердив судження авторів цієї статті, що в питаннях технологічного форсайту з формування переліку ПТ існує суттєве поле невизначеності. Причому більшість проаналізованих форсайт-проектів прямо чи опосередковано базуються на експертних оцінках, що завжди має певну похибку. В умовах довгострокової невизначеності провести якісне прогнозування без залучення експертів є надскладною задачею, а можливо й непосильною.

Усі проаналізовані роботи мають радше оглядовий характер і не показують конкретних кроків або хоча б алгоритму методик для визначення ПТ. Навіть аналізуючи праці основоположника теорії проривних інновацій Клейтона Крістенсена, стає зрозуміло, що його дослідження базуються на роз'ясненні необхідності та доцільності визначати ПТ для бізнесу [12]. При цьому, автор не визначає механізми та шляхи реалізації таких цілей.

На цьому фоні звіт STO виглядає потужною науковою роботою, де чітко та структуровано

визначено й описано етапи технологічного форсайту, основні та додаткові показники оцінювання технологій, а також інші важливі аспекти в процесі прогнозування.

З огляду на зазначене вище, було сформульовано актуальне наукове завдання цієї статті щодо аналізу методичних підходів до визначення ПТ НАТО.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

I. Загальний огляд підходів до технологічного форсайту STO у 2023 році

Визначення ПТ НАТО у 2023 р. значною мірою спирається на звіт трирічної давнини, але з певними уточненнями та покращеннями [3–4].

Як у попередньому, так і у цьогорічному звіті використано широкий спектр вхідних даних, які отримані з таких джерел:

- наявні дослідження, що проводяться в галузі науки і техніки;
- прогностична діяльність STO: аналіз карток спостереження за технологіями, звіти головних науковців, технологічні ігри та сканування горизонту Фон Кармана;
- бібліометричний і патентний аналізи;
- опитування наукової спільноти STO щодо розвитку, готовності та зрілості технологій;
- семінари та інноваційні проекти стосовно ПТ;
- дослідницькі програми “Alliance and Partners EDT”.

Усвідомлюючи нагальну потребу підтримувати технологічну перевагу Альянсу STO активно проводить постійне технологічне спостереження шляхом виявлення та документування потенційних ПТ і процесів у картках технологічного спостереження.

Ці картки містять оцінки зрілості науки чи технологій, а також коментарі щодо того, як наука або технології можуть вплинути на можливість Альянсу та потенційних супротивників.

STO підтримує взаємодію з приблизно 5000 активних учених, інженерів та аналітиків. Проте варто зауважити, що лише 8 % від загальної науково-експертної мережі STO взяли участь в опитуванні та надали свої відповіді на поставлені запитання. Такий відсоток відповідей є досить малим, але вважається достатнім для опитування такого роду [13].

З метою проведення якісної, сучасної аналітики та оцінювання ПТ науковці STO розробили модель оцінки науково-технологічної екосистеми (STEAM — Science and Technology Ecosystem Analysis Model). STEAM — це комп'ютерна модель на основі алгоритмів штучного інтелекту, яка є інструментом для аналізу та оцінки даних (опубліковані звіти, статті, матеріали конференцій

і семінарів тощо). Презентаційний скриншот інтерфейсу STEAM наочно показано на **рис. 1**.

Система використовує понад 7 млн різноманітних документів і 200 млн тез, забезпечуючи репрезентативну вибірку поточної дослідницької діяльності за останні п'ять років.

Базові дані відвантажуються в STEAM з таких баз зберігання наукової інформації, як Microsoft Academic, arXiv, MedRxiv та bioRxiv.

Попри потужність і високу спроможність STEAM, модель досі перебуває в стадії розробки та вдосконалення. У звіті [13] зазначається, що аналітичний матеріал, отриманий від STEAM, є скоріше орієнтовним, ніж остаточним.

Передбачається, що вдосконалена модель зможе працювати не лише з англійськими джерелами, а й навчиться парсити дані з патентних баз й наукових бібліотек.

Застосування комп'ютерної моделі у форсайті 2023 р. певно є основною відмінністю від попереднього технологічного передбачення 2020 року.

Окремо було проведено роботу щодо визначення ключових слів, які характеризують технологічні множини, їх зв'язки та окремі напрями науки. Проте через несуттєвий вплив на кінцевий результат у статті не буде розглянуто детально це питання.

Також було визначено ключові стратегічні чинники, які, імовірно, впливатимуть на технологічні тенденції впродовж наступних 20 років.

Цей розділ пропонує деякі думки та припущення щодо драйверів майбутнього в конкретних операційних доменах (космос, Арктика, інформаційна та урбаністична сфери).

Загалом інформаційна наповненість звіту 2023 р., який складається з двох томів, більш глибока за рахунок деталізованого опису та різноманітності додаткових досліджень. Окрім наведених вище, це опис геополітичної ситуації, аналіз інноваційної діяльності країн та окремих інституцій, визначення зв'язків гендеру та технологій, етичні та правові аспекти тощо.

На відміну від форсайту трирічної давнини, у 2023 р. показник "часовий горизонт" не застосовувався для оцінювання технологій [13]. Це досить доречно, оскільки інший важливий показник "технологічна зрілість" за своєю суттю визначає, хоч і не часовий, але все ж горизонт готовності технологій.

Порівнюючи технологічний форсайт STO 2023 р. з 2020 р., на думку авторів статті, можна виділити такі найбільш суттєві ознаки.

Спільні риси форсайтів:

- єдине бачення сутності та термінології;
- єдиний розподіл технологій за сферами наукових досліджень (фізична, біологічна та інформаційна);
- застосування основних чотирьох показників оцінювання технологій (технологічна зрілість, рівень уваги, інтеграція до спроможностей НАТО, потенційний військовий вплив).

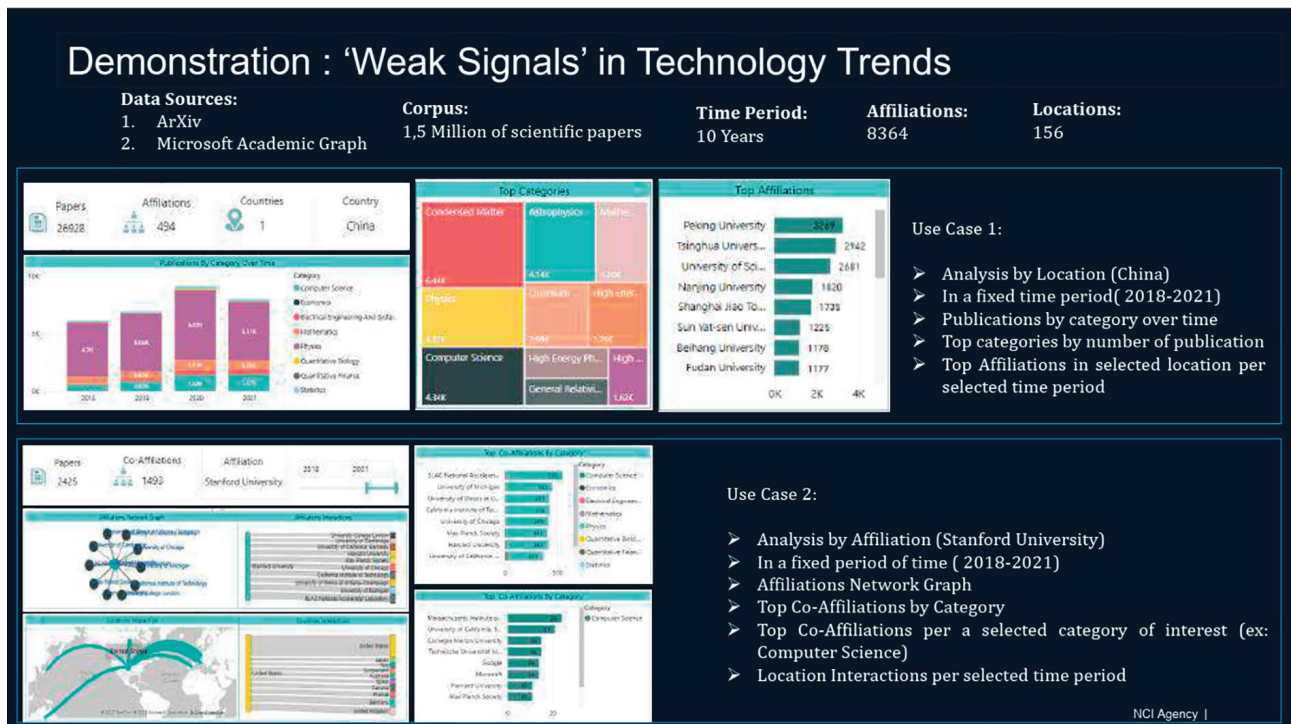


Рис. 1. Презентаційний інтерфейс STEAM

Різні риси форсайтів:

- відсутність показника “часовий горизонт зрілості технологій”;
- застосування комп’ютерної моделі на основі штучного інтелекту (STEAM).

II. Методологічні основи оцінювання технологій у ході технологічного форсайту STO 2023 року

У ході оцінювання технологій на предмет їх належності до множини проривних були враховані такі показники:

- технологічна зрілість;
- рівень уваги до технології;
- інтеграція до спроможностей НАТО;
- потенційний військовий вплив.

Технологічна зрілість

Загалом успішна технологія проходить шлях розвитку, який можна інтерпретувати як дев’ять рівнів готовності технології (Technology Readiness Levels, TRL).

Кожен рівень зрілості чи готовності технологій є потенційним відхиленням або паузою в їхньому розвитку (табл. 1). Перший рівень TRL 1 характеризується лише визначенням основних принципів, а на дев’ятому рівні TRL 9 вже відбувається успішне використання технології [1].

До речі, першими, хто запровадив і почав застосовувати TRL, були дослідники НАСА [14]. На даний час застосування TRL стало дієвим і досить поширеним інструментом для оцінювання не лише технологій. Подібні фреймворки доступні для рівнів готовності людини, алгоритму, виробництва, комерціалізації, машинного навчання тощо [15].

Рівні TRL є дискретною репрезентацією процесу еволюційного розвитку технологій.

Варто зазначити, що нові технології зазвичай знаходяться в діапазоні TRL від 1 до 5.

Рівень уваги

Зазвичай розвиток технологій є циклічним. Найвідомішим із таких є цикл Гартнера (Gartner Hype Cycle) (рис. 2) [10]. Загалом циклічність технологій стосується й TRL. Однак цикл Гартнера відображає соціально-технічний погляд на стан розвитку технології та ймовірність подальшого прогресу в цій галузі. По суті, це оцінка рівня уваги або зацікавленості щодо конкретної технології.

Кожна технологія в підсумку має пройти через п’ять ключових фаз: від моменту зародження ідеї про існування певної технології чи перших чуток про неї до етапу, на якому технологія вже впроваджена в конкретних неординарних продуктах (табл. 2) [10].

Варто зауважити, що багато технологічних відкриттів так ніколи і не прориваються до етапу зрілості технології. Після початкового етапу захопленості (пік завищених очікувань) вони зникають із суспільної свідомості як непродуктивні напрями розвитку або можуть з’явитися згодом як нові конвергентні розробки, що відроджують стару ідею.

На відміну від звіту STO 2020 р., у звіті 2023 р. вже не відстежувалися тенденції ажіотажу та “хайпу” навколо технологій, хоча й було використано річний звіт Gartner разом із багатьма іншими джерелами для формування загальної картини перспективності технологій.

Це рішення було засноване на переконанні, що оцінка за циклом Гартнера у минулому дослідженні 2020 р. мало на що вплинула. Таку інформацію було використано як додаткову при визначенні TRL [13].

Інтеграція до спроможностей НАТО

У цьому розділі розглянуто питання стосовно того, як певні технології можуть вплинути та/або бути інтегрованими в операційні (військові)

Таблиця 1

Рівні зрілості технології

Рівень зрілості технології	Опис
TRL 9	Проведені успішні операції. Технологія повністю зріла та вже використовується
TRL 8	Проведені всі тестування та демонстрації
TRL 7	Демонстрація прототипу системи в реальному середовищі
TRL 6	Демонстрація моделі в релевантних умовах
TRL 5	Перевірені компоненти та/або моделі в релевантних умовах
TRL 4	Перевірені компоненти та/або моделі в лабораторних умовах
TRL 3	Підтвердження дієздатності концепції. Визначені характеристики технології
TRL 2	Сформульована концепція розвитку технології
TRL 1	Визначені основні принципи



Рис. 2. Цикл Гартнера

та корпоративні (виробничі) спроможності Альянсу.

Загалом кожен ПТ оцінюють на предмет потенційного впливу на спроможності відповідно до таксономії оперативних спроможностей НАТО [13]. Відповідний каталог спроможностей є недоступним для широкого загалу, тому й не може бути проаналізованим.

Розгляд такого питання є найбільш складним для розуміння, оскільки в доповіді [3; 13]

не описано цей процес. Причому таблиці результатів оцінювання технологій не показують відповідні оцінки за цим показником. Імовірно, показник “інтеграція до спроможностей НАТО” сполучено з іншим показником “потенційний військовий вплив”, який є більш глибоким, зрозумілим і доречним.

Потенційний військовий вплив

Якщо під час оцінювання за попереднім показником враховується ймовірний вплив від

Таблиця 2

Ключові фази циклу Гартнера

Фаза	Опис
Тригер інновації	Проводяться початкові експерименти, що підтверджують наукові ідеї. Виникає перший суспільний інтерес до технології. Ця новина набирає все більшого розголосу. Зростає пошукова активність в Інтернеті. Реального продукту не існує
Пік завищених очікувань	Оприлюднюються певні історії успіху, хоча найчастіше вони супроводжуються безліччю невдач. Інтерес до технології — на найвищому рівні. Вживаються заходи щодо її дослідження і розвитку
Розчарування	Стають зрозумілими певні обмеження технології, а зусилля щодо її розвитку не дають корисних результатів. Загальний інтерес падає, а негативні історії частішають. Деякі дослідники призупиняють або закривають програми досліджень
Просвітлення	Настає краще розуміння практичного застосування технології, потенціал стає більш зрозумілим. З’являються пілотні продукти, зростає позитивна увага, поширюється інформація щодо успішності деяких випробувань
Плато продуктивності	Визначається ніша на ринку, стають зрозумілими всі обмеження та недоліки. Відзначається розуміння вартості та застосовності технології. Технологія стає добре інтегрованою в наявний технологічний ландшафт, її використання стає звичним

впровадження ПТ у кожен окрему спроможність/ підспроможність, то в процесі оцінювання показника “потенційний військовий вплив” визначається загальний вплив технології на стан Альянсу чи його технологічність. Цей показник досить абстрактний і визначається суб’єктивно шляхом експертного опитування.

Оцінка потенційного впливу нових або ПТ є складним процесом. Щоб досягти успіху у вирішенні такої наукової задачі необхідно врахувати величезну сукупність факторів. Так, поточне та прогнозоване безпечове середовище, правові та політичні обмеження, політичні чинники та інвестиційні рішення тощо [16]. Ці оцінки додатково ускладнюються, якщо шлях до рівня “проривності” охоплює складні комбінації технологій, наприклад, синергії, або вимагає розробки нових концептуальних рішень.

Самі ж дослідники STO НАТО зауважують, що цей показник у більшості випадків визначений неточно, тому має лише орієнтовний і рекомендаційний характер.

Загалом визначено три критерії оцінювання за цим показником, які наведено в **табл. 3** [13].

III. Результати технологічного форсайту STO у 2023 році

У розділі буде наведено результати оцінювання досліджуваних технологічних груп або науково-технологічних напрямів у ході технологічного форсайту з горизонтом прогнозування до 2043 року.

Попри те, що STO у два різні інформаційні блоки виокремлює ПТ і технології, що виникають (зароджуються), авторами цієї наукової статті вирішено об’єднати всі технології в єдиний перелік для наочності та простоти узагальнення.

Варто зауважити, що підходи до оцінювання всіх технологій є універсальними, тому результати не залежать від їх належності до блоку ПТ або виникаючих технологій.

Загалом список ПТ (враховуючи виникаючі) охоплює 10 науково-технологічних напрямів:

- “Інформація” (великі обсяги даних, ІКТ);
- “Штучний інтелект”;

- “Автономність” (автономні системи та роботизація);
- “Космічні технології”;
- “Гіперзвукові технології”;
- “Квантові технології”;
- “Біотехнології” (покращення людських можливостей);
- “Новітні матеріали” (матеріали та виробництво);
- “Енергія” (енергія та рушійна сила);
- “Електроніка та електромагнітні технології”.

Інформація

Насамперед у слові “інформація” закладається сенс обробки великих обсягів даних. Ця нова для світу проблема, пов’язана з тим, що необроблені цифрові дані збільшуються щосекунди у своєму обсязі. До того ж, з’являються нові наукові виклики щодо швидкості передачі, правдивості, візуалізації даних тощо.

Поява інтернету речей і нових сенсорів, запровадження передових режимів зв’язку та віртуалізація соціально-когнітивних просторів (наприклад, соціальних медіа) вже зробили величезний внесок у розвиток цього науково-технологічного напрямку.

Важливою складовою є передова аналітика, яка описує розширені аналітичні методи для розуміння та візуалізації великих обсягів інформації. Ці методи охоплюють різні підходи, взяті з дослідницьких сфер про прийняття рішень, штучний інтелект, оптимізацію, моделювання тощо.

Датчики включені до цього блоку як додатковий аспект, оскільки вони дотичні до питань збору, обробки та передачі інформації.

У **табл. 4** наведено результати оцінювання інформаційних технологій.

Штучний інтелект (ШІ)

Системи на основі ШІ можуть бути суто програмними, які діють у віртуальному світі (наприклад, голосові помічники, пошукові системи, системи розпізнавання мови та обличчя), або інтегрованими в апаратні пристрої (наприклад, роботи, автономні автомобілі, дрони, програми інтернету речей).

Таблиця 3

Потенційний військовий вплив

Критерії	Межі зміни характеристик (швидкість, дальність, точність, летальність, живучість, надійність або інші характеристики, що визначають можливості технології)
Помірний	10–50 %
Високий	50–100 %
Революційний	Більше 100 % або проведення заходів чи завдань досі вважалося недоцільним або неможливим

Таблиця 4

Результати оцінювання технологій за напрямом “Інформація”

Науково-технологічний напрям	Технологічна група	Рівень впливу	TRL	Часовий горизонт зрілості
Інформація	Передові обчислення	Високий	7–8	2025–2030
	Прийняття рішень	Високий	5–6	2030–2035
	Технології розподіленої книги	Високий	5–6	2025–2030
	Інноваційні мережі	Високий	5–6	2030–2035
	Мережеві датчики та сенсорювання	Високий	5–6	2025–2030
	Зберігання інформації	Високий	7–8	2022–2025
	Кібернетика	Високий	5–6	2025–2030

Варто зазначити, що наразі ШІ має деякі технічні неефективності та обмеження, проте, враховуючи дедалі більш широке його використання та застосування новітніх наукових методів, досить скоро ШІ може стати головною загрозою людства.

Дослідники STO виділяють три основні кроки створення типової системи ШІ:

1) експертні знання — інформація на цьому кроці представлена експертними знаннями або іншими авторитетними джерелами даних і записана в комп’ютерній програмі у формі експертної системи;

2) машинне або статистичне навчання — базове припущення, що є основою машинного навчання, яке полягає в тому, що все, що працювало в минулому, найімовірніше, продовжуватиме працювати й у майбутньому. По суті, машинне навчання є апроксимацією набору статистичних даних до певних залежностей або навіть математичних рівнянь;

3) контекстуальна адаптація — технологія ШІ може виконувати свої задачі вже після другого кроку. Однак для інтеграції до складних систем необхідне врахування контексту задачі та зв’язків з іншими системами.

У табл. 5 наведено результати оцінювання технологій за напрямом “Штучний інтелект”.

Автономність (автономні та роботизовані системи)

Автономність – це здатність реагувати на невизначені ситуації без людського втручання шляхом самостійного формування та вибору різних варіантів дій для досягнення цілей на основі отриманих знань та оцінки поточної ситуації [13]. Автономні (роботизовані) системи тісно пов’язані зі ШІ та спираються на таку програму під час прийняття рішення.

До речі, у 2022 р. стало відомо про наявність у НАТО Плану впровадження автономних систем. Коротке резюме про це з’явилося в мережі на невеликий проміжок часу, а на момент написання статті цю інформацію вилучили з загального доступу. Це наочний факт, який свідчить про зацікавленість та доцільність розвиватися в цьому тренді.

Поряд із цим, російсько-українська війна досить яскраво показала кричущу необхідність розвивати саме ці технології. Наразі жоден наступальний крок, робота артилерії чи будь-які інші військові дії не відбуваються без участі безпілотних розвідувальних авіаційних комплексів, які і є прикладом роботизованих систем.

Таблиця 5

Результати оцінювання технологій за напрямом “Штучний інтелект”

Науково-технологічний напрям	Технологічна група	Рівень впливу	TRL	Часовий горизонт зрілості
Штучний інтелект	Передовий (розширений) ШІ	Револьюційний	3–4	2035+
	Застосування та впровадження ШІ	Високий	5–6	2025–2030
	Технології протидії ШІ (контр ШІ)	Револьюційний	3–4	2030–2035
	Людино-машинний симбіоз	Револьюційний	3–4	2035+

Варто зауважити, що STO немає консенсусу щодо визначення дефініцій ані автономних, ані роботизованих систем, а їхнє тлумачення переважно залежить від контексту.

У **табл. 6** наведено результати оцінювання технологій за напрямом роботизації та автономності.

Космічні технології

У другій половині ХХ ст. провідні держави активно займалися розвитком і впровадженням широкого спектру технологій, що пов’язані з космосом. Такі програми мали виключний характер та були прерогативою держави. Проте нині бізнес перетнув цю лінію умовних заборон на використання космічних технологій і досліджень у цій сфері знань. Комерційні підприємства не просто зайшли на цей ринок, а й становлять стратегічну конкуренцію державним монополіям у сфері космосу.

Особливої уваги заслуговує інтернет-зв’язок StarLink, який хоч і не мав характеру “game change”, однак суттєво вплинув на комунікацію українських військ у районах бойових дій.

У **табл. 7** наведено результати оцінювання технологій за напрямом “Космічні технології”.

Гіперзвукові технології

Як відомо, до гіперзвукових носіїв належать такі, що розвивають швидкість понад 5 Махів (6125 км/год). Зауважимо, що гіперзвукові фази

польоту були досягнуті ще до того, як було проведено перші дослідження у сфері гіперзвуку (1930 р.), наприклад, під час повернення ракет із космосу в атмосферу або під час тривалого атмосферного польоту [17].

Особливість розвитку таких технологій полягає не у збільшенні швидкості руху, а в тому, що опір повітря стає настільки значним, що підвищення теплових навантажень становить надзвичайну загрозу для гіперзвукової платформи.

Фахівцями країн НАТО активно ведуться дослідження та розробки двигунів змішаного режиму для більш широкого військового застосування в авіації, гіперзвукових ракетних системах і засобах їх протидії.

Витрати країн на наукові дослідження та розробки гіперзвукових технологій за останні п’ять років зросли в чотири рази, а особливий науковий інтерес помічено після початку повномасштабного вторгнення росії в Україну в 2022 році [18]. Варто зауважити, що РФ хоч і не лідер у інвестиціях за цим науково-технологічним напрямом досліджень, проте посідає впевнене третє місце після Китаю та США [19].

У **табл. 8** наведено результати оцінювання технологій за напрямом “Гіперзвукові технології”.

Квантові технології

Квантові технології використовують квантову фізику та інші пов’язані явища на атомному

Таблиця 6

Результати оцінювання технологій за напрямом “Автономність”

Науково-технологічний напрям	Технологічна група	Рівень впливу	TRL	Часовий горизонт зрілості
Автономні та роботизовані системи	Передові роботизовані системи	Високий	5–6	2025–2030
	Технології протидії роботизації	Високий	3–4	2030–2035
	Людино-машинна взаємодія	Високий	3–4	2030–2035

Таблиця 7

Результати оцінювання технологій за напрямом “Космічні технології”

Науково-технологічний напрям	Технологічна група	Рівень впливу	TRL	Часовий горизонт зрілості
Космічні технології	Зв’язок у космосі	Високий	9	2022–2025
	Технології протидії космічним технологіям	Високий	5–6	2030–2035
	Космічні платформи	Високий	9	2022–2025
	Рушійна сила та запуск	Високий	9	2022–2025
	Датчики	Високий	7–8	2022–2025

та субатомному рівнях, зокрема квантову запутаність і суперпозицію.

Сучасні військові системи та загалом технології спираються на квантову фізику. Перша квантова революція відбувалася ще в минулому столітті та забезпечила основу для багатьох сучасних технологій, включаючи транзистори, комп'ютерні мікросхеми, лазери та сучасні засоби зв'язку.

Упродовж останніх сорока років повільно з'явилося нове покоління квантових технологій, що стало підґрунтям для другої квантової революції [20], яка очікувано матиме глибокий і революційний вплив.

Хоча практичне застосування квантових ефектів зараз лише досліджується, а готові технології є досить складними та мають одиничний характер, учені всього світу прогнозують, що саме квантові обчислення у цифровій сфері придуть на заміну класичним.

Квантові технології зазвичай поділяються на три великі групи (табл. 9).

Біотехнології (покращення людських можливостей)

Біотехнології використовують організми, тканини, клітини або молекулярні компоненти, отримані з живих істот, щоб впливати на самі живі істоти або шляхом втручання в роботу клітин або молекулярних компонентів клітин, включаючи їхній генетичний матеріал [13]. Також цей науково-технологічний напрям працює з неорганічними матеріалами для покращення або вдосконалення людини.

Свого роду, біотехнології — це біомедичні втручання в організм, які використовують для

покращення людських спроможностей, наприклад, фізичної форми, стану здоров'я, когнітивних здібностей.

У табл. 10 продемонстровано основні технологічні групи, які вважаються найбільш перспективними у сфері біотехнологій.

Новітні матеріали (матеріали та виробництво)

Науково-технологічний напрям новітніх матеріалів охоплює власне технології створення матеріалів і виготовлення на їх основі більш складних конструкцій (адитивне виробництво).

Новітні (удосконалені) матеріали – це штучні матеріали з унікальними чи досі невідомими властивостями. Насамперед це нанотехнології або технології синтетичної біології.

Розробка за такими напрямками може включати покриття з надзвичайною термостійкістю, високоміцну броню, стелс-покриття, збір і накопичення енергії, надпровідність, а також масове виробництво їжі, палива тощо. Особливий пріоритет мають дослідження графену та інших нових 2D-матеріалів, що є областю високого потенціалу й зростаючого інтересу.

Адитивне виробництво, яке часто використовується як синонім 3D-друку, – це процес створення майже довільного тривимірного твердого об'єкта з цифрової моделі шляхом пошарового додавання матеріалів. Сфера використання адитивних технологій поширюється від створення мінібіопротезів до друку величезних житлових будинків.

Широкий спектр технологій за цим напрямом досліджень згрупований у три групи (табл. 11).

Таблиця 8

Результати оцінювання технологій за напрямом “Гіперзвукові технології”

Науково-технологічний напрям	Технологічна група	Рівень впливу	TRL	Часовий горизонт зрілості
Гіперзвукові технології	Технології протидії космічним технологіям	Високий	3–4	2030–2035
	Рухомі засоби та рушійна сила	Високий	5–6	2030–2035

Таблиця 9

Результати оцінювання технологій за напрямом “Квантові технології”

Науково-технологічний напрям	Технологічна група	Рівень впливу	TRL	Часовий горизонт зрілості
Квантові технології	Зв'язок	Високий	3–4	2030–2035
	Обчислення	Високий	3–4	2035+
	Датчики	Високий	3–4	2035+

Таблиця 10

Результати оцінювання технологій за напрямом “Біотехнології”

Науково-технологічний напрям	Технологічна група	Рівень впливу	TRL	Часовий горизонт зрілості
Біотехнології	Біоінженерія та генетика	Високий	5–6	2030–2035
	Біоінформатика	Високий	7–8	2025–2030
	Біовиробництво	Високий	3–4	2030–2035
	Біодатчики та біоелектроніка	Високий	3–4	2030–2035
	Когнітивні технології	Революційний	3–4	2035+
	Людино-машинний симбіоз	Революційний	3–4	2035+
	Поліпшення фізичних можливостей	Високий	5–6	2030–2035
	Соціальне покращення	Високий	5–6	2030–2035

Таблиця 11

Результати оцінювання технологій за напрямом “Новітні матеріали”

Науково-технологічний напрям	Технологічна група	Рівень впливу	TRL	Часовий горизонт зрілості
Новітні матеріали (матеріали та виробництво)	Наноматеріали	Високий	5–6	2025–2030
	Аддитивне виробництво	Високий	5–6	2025–2030
	Новітні матеріали	Високий	3–4	2030–2035

Енергія (енергія та рушійна сила)

Реагуючи на зміну клімату та виклики у сфері безпеки перед науковою спільнотою постала нова наукова задача щодо створення передових технологій зберігання та генерування енергії.

Найбільш провідними напрямками наукових досліджень є дослідження в полі широкомасштабного та глобального виробництва сонячної енергії, створення наземних і позаземних космічних малих ядерних, торієвих і термоядерних реакторів. Прогнозується, що значні перспективи безпечного та широкодоступного виробництва енергії людство досягне у другій половині 2030-х або на початку 2040-х років.

Важливо зазначити, що ШІ та новітні матеріали були і залишатимуться тісно пов’язаними та критично важливими факторами таких розробок.

Застосування новітніх енергетичних технологій у військовій сфері неодмінно буде реалізовано на етапах проектування зразків озброєння. Традиційно військові операції є енергоємними та значною мірою вичерпали класичні технологічні рішення.

У **табл. 12** представлено основні групи технологій за напрямом “Енергія”.

Електроніка та електромагнітні технології

Електроніка належить до галузі технологій, яка використовується в цивільній сфері. Водночас такі технології є базисом під час створення новітніх зразків озброєння, адже саме елементи електроніки забезпечують зменшення масогабаритних показників готових виробів, підвищують проходження сигналів та покращують низку інших характеристик.

Загалом це широкий діапазон таких різноманітних електронних компонентів, як транзистори, діоди, інтегральні схеми, конденсатори тощо, які використовують потік електронів для виконання широкого кола завдань (обчислення, зв’язок і управління) [13].

Електромагнітні технології – це одна з найбільш затребуваних сфер досліджень для військової сфери, яка передбачає проектування та роботу антен, випромінювання та канали передачі сигналів, роботу з електромагнітними хвилями в різних спектрах (мікрохвилі, інфрачервоні, рентгенівські та гамма-промені) та електромагнітну сумісність [13].

Основні напрями досліджень у галузі розвитку електроніки та електромагнітних технологій лежать у векторі виходу за межі використання

Таблиця 12

Результати оцінювання технологій за напрямом “Енергія”

Науково-технологічний напрям	Технологічна група	Рівень впливу	TRL	Часовий горизонт зрілості
Енергія (енергія та рушійна сила)	Виробництво енергії	Високий	5–6	2025–2030
	Зберігання енергії	Високий	5–6	2030–2035
	Рушійна сила	Високий	5–6	2025–2030
	Трансмісія	Високий	5–6	2025–2030

Таблиця 13

Результати оцінювання технологій за напрямом “Електроніка та електромагнітні технології”

Науково-технологічний напрям	Технологічна група	Рівень впливу	TRL	Часовий горизонт зрілості
Електроніка та електромагнітні технології	Антени	Високий	9	2025
	Зброя спрямованої енергії	Високий	5–6	2030–2035
	Мікроелектроніка	Високий	9	2025
	Фотоніка та лазери	Високий	7–8	2025–2030
	Спектральне керування	Високий	5–6	2025–2030

кремнію [21], за рахунок проведення фундаментальних досліджень меж кремнієвої фізики. Такі дослідження тривають і прогнозовано будуть багатообіцяючими.

Значна частина цих досліджень згрупована в технологічні групи (табл. 13).

IV. Обговорення

Визначення найважливіших науково-технологічних напрямів та/або окремих технологій чи їх груп безумовно має бути пріоритетом військово-технічної політики держави. Ідеться не просто про тренди провідних країн світу, а й про недоцільність розпорошення зусиль нашої країни на проведення застарілих і неперспективних наукових досліджень.

Як було зазначено вище, поряд із визначенням переліків КТ окремих країн формується нова науково-прогностична парадигма щодо визначення ПТ. Варто зауважити, що список ПТ віддзеркалює загальносвітові тренди науково-технологічного ландшафту у світі.

Описані методологічні підходи до форсайту STO відображають найбільш доцільні показники оцінювання технологій у контексті передбачення їх проривного ефекту. Причому такою кількістю ресурсів, як матеріальних, так і людських, які були задіяні у форсайті 2023 р., похизуватися може далеко не кожна прогностична інституція. Тим не менш, розроблена STO модель прогно-

зування на основі штучного інтелекту STEAM є унікальною за своїми масштабами та можливостями.

Нашій країні варто перейняти провідний досвід НАТО щодо технологічного прогнозування, але з внесенням певних коректив, обмежень і спрощень.

До речі, одним із раціональних напрямів оптимізації форсайтів є об'єднання переліків КТ і ПТ. Такий підхід дає змогу зменшити навантаження в проведенні прогностичних досліджень, не знижуючи їхню якість.

Подібні дослідження не є новим сегментом вітчизняних наукових дискусій, а вже проводяться та мають на меті вироблення ефективної моделі технологічного форсайту [1; 2].

ВИСНОВКИ

Здійснене у даній праці аналітичне дослідження дало потужний поштовх формуванню сучасної вітчизняної парадигми технологічного форсайту з визначення ПТ. У статті в стислому й узагальненому вигляді наведено методичні підходи до визначення ПТ НАТО; розкрито типові ознаки технологічного форсайту з визначення ПТ, основні методи та підходи до прогнозування.

Проведено порівняння між критичними та ПТ, показано їх суть та місце в системі технологічного прогнозування.

Описано процес і масштаб отримання вхідних даних до форсайту, який проводився у 2023 році.

Показано спільні та відмінні риси форсайтів 2020 та 2023 рр., проаналізовано всі показники, які застосовувалися для оцінювання технологій, а також ті, що були наведені лише для ознайомлення. Причому оцінювання за такими показниками не бралось до уваги та мало виключно дорадчий характер.

Наведено стислий опис моделі оцінки науково-технологічної екосистеми (STEAM), яка була розроблена виключно під технологічний форсайт. Модель використовує алгоритми ШІ та здатна самостійно визначати рівень перспективності технологій, виходячи з аналізу наявної в інтернеті інформації.

У дослідженні були застосовані такі показники, як: технологічна зрілість, рівень уваги до технології, інтеграція до спроможностей НАТО та потенційний військовий вплив. Визначено, що у форсайті 2023 р. показник “часовий горизонт” не застосовувався, а горизонт готовності технології визначався за рівнями зрілості. Попри проведену роботу щодо побудови циклу Гартнера за всіма технологіями, такий показник не було застосовано під час оцінювання, а наведено як додаткову інформацію.

У статті наведено результати оцінювання досліджуваних технологічних груп або науково-технологічних напрямів у ході технологічного форсайту з горизонтом прогнозування до 2043 року. Виділено десять таких напрямів. ШІ, великі масиви даних та автономні системи визначено як найбільш проривні та перспективні напрями наукових досліджень.

Пропонована увазі читачів стаття може бути використана як базис для розроблення вдосконаленої методики технологічного форсайту з визначення проривних та/або критичних технологій в Україні.

Разом із тим, такі окремі складові під час оцінювання технологій, як цикл Гартнера, модель STEAM і рівні зрілості технологій, представляють науковий інтерес з точки зору набуття передового досвіду та формування вітчизняної парадигми технологічного форсайту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Слюсар В. І.* Проривні технології в оборонній сфері України / В. І. Слюсар, В. В. Сотник, А. В. Купчин // *Озброєння та військова техніка.* — 2020. — № 4 (28). — С. 13–23. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.4\(28\).13-23](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.4(28).13-23).
2. *Kupchyn A.* A model of disruptive technologies determination for defense sphere / A. Kupchyn, V. Sotnyk // *Issues of Armament Technology.* — 2021. — No. 156 (1). — P. 65–83. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.2529>.
3. *Reding D. F.* Science & Technology Trends 2023–2043. Across the Physical, Biological, and Information Domains [Electronic resource] / Dale F. Reding, Angelo De Lucia, Álvaro Martín Blanco, Col Laura A. Regan, Daniel Bayliss // NATO Science & Technology Organization. — Brussels, 2023. — Vol. 1: Overview. — 150 p. — Access mode: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/3/pdf/stt23-vol1.pdf.
4. *Reding D. F.* Science & Technology Trends 2020–2040. Exploring the S&T Edge [Electronic resource] / D. F. Reding, J. Eaton // NATO Science & Technology Organization. — Brussels, 2020. — 160 p. — Access mode: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2020/4/pdf/190422-ST_Tech_Trends_Report_2020-2040.pdf.
5. *Schiavi G. S.* Emerging technologies and new business models: a review on disruptive business models / G. S. Schiavi, A. Behr // *Innovation & Management Review.* — 2018. — No. 15 (4). — P. 338–355. <https://doi.org/10.1108/INMR-03-2018-0013>.
6. *Решетняк О. І.* Форсайт-методи в управлінні науково-технологічним розвитком [Електронний ресурс] / О. І. Решетняк // *Ефективна економіка.* — 2019. — № 12. — 11 с. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.12.67>.
7. *Паладченко О. Ф.* Сучасні підходи і методи проведення прогнозних досліджень: світовий досвід і можливість його використання в Україні [Електронний ресурс] / О. Ф. Паладченко, І. В. Молчанова // *Наука, технології, інновації.* — 2018. — № 2 (6). — С. 23–32. — Режим доступу: http://nti.ukrintei.ua/?page_id=1243.
8. *Мехович С.* Застосування штучних нейронних мереж та технологій форсайту у здійсненні технологічного реінжинірингу сучасного промислового виробництва / С. Мехович, О. Попов, С. Клепікова // *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит.* — 2022. — № 11–12 (177–178). — С. 3–20. <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.01>.
9. Table of disruptive technologies. Imperial Tech Foresight [Electronic resource] // Imperial College London. — Access mode: <https://imperialtechforesight.com/visions/table-of-disruptive-technologies-2>.
10. Hype Cycle Research Methodology [Electronic resource] // Gartner. — Access mode: <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle>.
11. How can you identify and evaluate disruptive technologies in your industry? [Electronic resource] // LinkedIn. — Access mode: <https://www.linkedin.com/advice/3/how-can-you-identify-evaluate-disruptive-technologies>.
12. *Bower J. L.* Disruptive technologies: catching the wave / J. L. Bower, C. M. Christensen // *Harvard Business Review.* — 1995. — No. 73 (1). — P. 43–53. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(95\)91075-1](https://doi.org/10.1016/0024-6301(95)91075-1).
13. *Reding D. F.* Science & Technology Trends 2023–2043. Across the Physical, Biological, and Information Domains [Electronic resource] / Dale F. Reding, Angelo De Lucia, Álvaro Martín Blanco Col Laura A. Regan, Daniel Bayliss // NATO Science & Technology Organization. — Brussels, 2023. — Vol. 2: Analysis. — 286 p. — Access mode: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/3/pdf/stt23-vol2.pdf.
14. *Manning C. G.* Technology Readiness Level / C. G. Manning // NASA. — Sep. 27, 2023. — Access mode: <https://www.nasa.gov/general/technology-readiness-level>.

15. See J. E. Human Readiness Levels Explained / J. E. See // *Ergonomics in Design*. — 2021. — No. 29 (4). — P. 5–10. <https://doi.org/10.1177/10648046211017410>.
16. O'Hanlon M. Forecasting change in military technology, 2020–2040 [Electronic resource] / M. O'Hanlon. — NW, Washington : Brookings, 2018. — 31 p. — Access mode: https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2018/09/FP_20181218_defense_advances_pt2.pdf.
17. Wright D. The Physics and Hype of Hypersonic Weapons [Electronic resource] / D. Wright, C. Tracy // *Scientific American*. — 2021. — Vol. 325 (2). — P. 64–71. — Access mode: <https://www.scientificamerican.com/article/the-physics-and-hype-of-hypersonic-weapons>.
18. Hypersonic Weapons: DOD Should Clarify Roles and Responsibilities to Ensure Coordination across Development Efforts: Report to Congressional Addressees [Electronic resource] // United States Government Accountability Office. — 2021. — Access mode: <https://www.gao.gov/assets/gao-21-378.pdf>.
19. Delcker J. China leads research into hypersonic technology: report [Electronic resource] / J. Delcker // POLITICO. — 2019. — Access mode: <https://www.politico.eu/article/china-leads-research-into-hypersonic-technology-report>.
20. Scheidsteger T. Historical Roots and Seminal Papers of Quantum Technology 2.0 / T. Scheidsteger, R. Haunschild, C. Ettl // *NanoEthics*. — 2022. — Vol. 16. — P. 271–296. <https://doi.org/10.1007/s11569-022-00424-z>.
21. Ramachandran V. Beyond Silicon: Deep Dive to Gartner's Emerging Tech Trend [Electronic resource] / V. Ramachandran // *Expersight*. — May 17, 2022. — Access mode: <https://expersight.com/beyond-silicon-deep-dive-to-gartners-emerging-tech>.
22. sight methods in the management of scientific and technological development]. *Efektivna ekonomika* [Efficient economy]. 12, 11 p. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.12.67> [in Ukr.].
23. Paladchenko, O. F., & Molchanova, I. V. (2018). Suchasni pidkhody i metody provedennia prohoznych doslidzhen: svitovyi dosvid i mozhlyvist yoho vykorystannia v Ukraini [Modern approaches and methods of forecasting research: world experience and the possibility of its use in Ukraine]. *Nauka, tekhnolohiyi, innovatsiyi* [Science, technology, innovation]. 2 (6), 23–32. Retrieved from: http://nti.ukrintei.ua/?page_id=1243 [in Ukr.].
24. Mehovich, S., Popov, O., & Klepikova, S. (2022). Zastosuvannya shtuchnykh neyronnykh merezh ta tekhnolohiy forsaytu u zdiysnenni tekhnolohichnoho reinzhynirynhu suchasnoho promyslovoho vyrobnytstva [The application of artificial neural networks and foresight technologies in the implementation of technological reengineering of modern industrial production]. *Enerhozberezhennya. Enerhetyka. Enerhoaudyt* [Energy saving. Energy. Energy audit]. 11–12 (177–178), 3–20. <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.01> [in Ukr.].
25. Table of disruptive technologies. Imperial Tech Foresight. *Imperial College London*. Retrieved from: <https://imperialtechforesight.com/visions/table-of-disruptive-technologies-2>.
26. Hype Cycle Research Methodology. *Gartner*. Retrieved from: <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle>.
27. How can you identify and evaluate disruptive technologies in your industry? *LinkedIn*. Retrieved from: <https://www.linkedin.com/advice/3/how-can-you-identify-evaluate-disruptive-technologies>.
28. Bower, J. L. & Christensen, C. M. (1995). Disruptive technologies: catching the wave. *Harvard Business Review*. 73 (1), 43–53. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(95\)91075-1](https://doi.org/10.1016/0024-6301(95)91075-1).
29. Reding, D. F., Lucia, A. D., Blanco, A. M., Regan, C. L. A., & Bayliss, D. (2023). Science & Technology Trends 2023-2043. Across the Physical, Biological, and Information Domains Vol. 2: Analysis. NATO Science & Technology Organization. Brussels, 286 p. Retrieved from: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/3/pdf/stt23-vol2.pdf.
30. Manning, C. G. (Sep. 27, 2023). Technology Readiness Level. NASA. Retrieved from: <https://www.nasa.gov/general/technology-readiness-level>.
31. See, J. E. (2021). Human Readiness Levels Explained. *Ergonomics in Design*. 29 (4), 5–10. <https://doi.org/10.1177/10648046211017410>.
32. O'Hanlon, M. (2018). Forecasting change in military technology, 2020-2040. Brookings, 31 p. Retrieved from: https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2018/09/FP_20181218_defense_advances_pt2.pdf.
33. Wright, D., & Tracy, C. (2021). The Physics and Hype of Hypersonic Weapons. *Scientific American*. 325 (2), 64–71. Retrieved from: <https://www.scientificamerican.com/article/the-physics-and-hype-of-hypersonic-weapons>.
34. Hypersonic Weapons: DOD Should Clarify Roles and Responsibilities to Ensure Coordination across Development Efforts. *United States Government Accountability Office*. Retrieved from: <https://www.gao.gov/assets/gao-21-378.pdf>.
35. Delcker, J. (2019). China leads research into hypersonic technology: report. POLITICO. Retrieved from: <https://www.politico.eu/article/china-leads-research-into-hypersonic-technology-report>.

REFERENCES

1. Slyusar, V. I., Sotnyk, V. V., & Kupchyn, A. V. (2020). Proryvni tekhnolohiyi v oboronniy sferi Ukrainy. [Disruptive technologies in the defense sphere of Ukraine]. *Ozbroyennya ta viys'kova tekhnika* [Armament and military equipment]. 4 (28), 13–23. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.4\(28\).13-23](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.4(28).13-23) [in Ukr.].
2. Kupchyn, A., & Sotnyk, V. (2021). A model of disruptive technologies determination for defense sphere. *Issues of Armament Technology*. 156 (1), 65–83. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.2529>.
3. Reding, D. F., Lucia, A. D., Blanco, A. M., Regan, C. L. A., & Bayliss, D. (2023). Science & Technology Trends 2023-2043. Across the Physical, Biological, and Information Domains. *NATO Science & Technology Organization*. Brussels, Vol. 1. 150 p. Retrieved from: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/3/pdf/stt23-vol1.pdf.
4. Reding, D. F., & Eaton, J. (2020). Science & Technology Trends 2020-2040. *NATO Science & Technology Organization*. Brussels, 160 p. Retrieved from: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2020/4/pdf/190422-ST_Tech_Trends_Report_2020-2040.pdf.
5. Schiavi, G. S., & Behr, A. (2018). Emerging technologies and new business models: a review on disruptive business models. *Innovation & Management Review*. 15 (4), 338–355. <https://doi.org/10.1108/INMR-03-2018-0013>.
6. Reshetnyak, O. I. (2019). Forsait-metody v upravlinni naukovo-tekhnolohichnym rozvytkom [Fore-

20. Scheidsteger, T., Haunschild, R., & Ettl, C. (2022). Historical Roots and Seminal Papers of Quantum Technology 2.0. *Nanoethics*, 16, 271–296. <https://doi.org/10.1007/s11569-022-00424-z>.
21. Ramachandran, V. (2022). Beyond Silicon: Deep Dive to Gartner’s Emerging Tech Trend. *Expersight*. Retrieved from: <https://expersight.com/beyond-silicon-deep-dive-to-gartners-emerging-tech>.

A. V. KUPCHYN, PhD

O. O. MATSYK, Senior Researcher

Ye. Ya. DEMCHENKO, PhD in Engineering, Senior Researcher

I. V. BOROHVOSTOV, D. Sc. in Engineering, Senior Researcher

O. D. MELNIK, PhD in Engineering

METHODOLOGICAL APPROACHES TO IDENTIFYING NATO BREAKTHROUGH TECHNOLOGIES

Abstract. *This scientific work has a review nature and is aimed at systematizing, generalizing and highlighting the scientific and methodological foundations of NATO in technological foresight to identify breakthrough technologies.*

The article describes general approaches, main methodological aspects and technology assessment indicators, and provides common and different features in foresights 2020 and 2023. In particular, the process of technology assessment according to the Gartner cycle and levels of technological maturity is reflected.

A separate block presents the results of a technological foresight with a forecast horizon until 2043. At the same time, the levels of technological maturity and potential impact on NATO capabilities were assessed, and the approximate time horizons for technology readiness were determined. Each scientific and technological area is given a brief description and decomposition into technological groups is shown.

Keywords: *breakthrough technologies, promising technologies, technological foresight, military-technical policy, military-industrial complex, forecasting, technology assessment, Gartner cycle, levels of technological maturity.*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Купчин Артем Валерійович — д-р філософії, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, просп. Повітрофлотський, 28, м. Київ, Україна, 03049; +38 (093) 316-77-18; kupchyn.artem@ukr.net; ORCID: 0000-0003-2013-691X

Мацюк Олександр Олександрович — с. н. с., Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, просп. Повітрофлотський, 28, м. Київ, Україна, 03049; +38 (063) 506-92-34; mats72@ukr.net; ORCID: 0009-0002-1627-2038

Демченко Євген Якович — канд. техн. наук, старший дослідник, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, просп. Повітрофлотський, 28, м. Київ, Україна, 03049; +38 (095) 128-30-88; 19ydemchenko@gmail.com; ORCID: 0000-0002-8743-923X

Борохвостов Ігор Валерійович — д-р техн. наук, старший науковий співробітник, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, просп. Повітрофлотський, 28, м. Київ, Україна, 03049; +38 (050) 382-33-61; borohvostov@icloud.com; ORCID: 0000-0002-5410-7140

Мельник Олександр Дмитрович — канд. техн. наук, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, просп. Повітрофлотський, 28, м. Київ, Україна, 03049; +38 (050) 743-14-39; melniksss@ukr.net; ORCID: 0000-0002-8723-5712

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kupchyn A. V. — PhD, Central Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, 28, Povitroflotskiy Ave, Kyiv, Ukraine, 03049; +38 (093) 316-77-18; kupchyn.artem@ukr.net; ORCID: 0000-0003-2013-691X

Matsyk O. O. — Senior Researcher, Central Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, 28, Povitroflotskiy Ave, Kyiv, Ukraine, 03049; +38 (063) 506-92-34; mats72@ukr.net; ORCID: 0009-0002-1627-2038

Demchenko Ye. Ya. — PhD in Engineering, Senior Researcher, Central Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, 28, Povitroflotskiy Ave, Kyiv, Ukraine, 03049; +38 (095) 128-30-88; 19ydemchenko@gmail.com; ORCID: 0000-0002-8743-923X

Borohvostov I. V. — D. Sc. in Engineering, Senior Researcher, Central Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, 28, Povitroflotskiy Ave, Kyiv, Ukraine, 03049; +38 (050) 382-33-61; borohvostov@icloud.com; ORCID: 0000-0002-5410-7140

Melnik O. D. — PhD in Engineering, Central Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, 28, Povitroflotskiy Ave, Kyiv, Ukraine, 03049; +38 (050) 743-14-39; melniksss@ukr.net; ORCID: 0000-0002-8723-5712

