



*Н. Я. Смолій, Н. М. Гринчишин*

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7028-677X> – Н. Я. Смолій

<https://orcid.org/0000-0002-7631-6023> – Н. М. Гринчишин



nata\_gryn123@ukr.net

## ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ТА НАСЛІДКИ ВИКОРИСТАННЯ ВОГНЕГАСНИХ ПІН АFFF В УМОВАХ РОСІЙСЬКОЇ ЗБРОЙНОЇ АГРЕСІЇ ПРОТИ УКРАЇНИ

**Проблема.** Для ліквідації пожеж класу В використовують водні плівкоутворюючі піни (АFFF), які містять пер- та поліфлуоровані алкільні сполуки (PFAS). Ці речовини є стійкими до хімічного та біологічно розкладання («вічні хімікати») й десятиліттями зберігаються в природних середовищах. В умовах війни через руйнування інфраструктури та відсутність систем збору стічних вод від пожеж використання АFFF призводить до забруднення територій PFAS.

**Мета.** Оцінка ризиків екологічної небезпеки використання АFFF в умовах війни в Україні, що включає дослідження особливостей міграції PFAS у природних середовищах та обґрунтування необхідності впровадження моніторингу PFAS й ремедіації забруднених територій.

**Методи дослідження.** Системний аналіз наукових публікацій, методи порівняння та узагальнення.

**Основні результати.** Встановлено, що в умовах російської збройної агресії ракетні обстріли об'єктів енергетичної та паливної інфраструктури України призводять до масштабних пожеж класу В для ліквідації яких використовують значні обсяги АFFF. Виявлено, що руйнування ґрунту внаслідок воєнних дій призводить до формування «гідралічних вікон», через які відбувається швидка міграція PFAS у підземні води. Досліджено, що коротколанцюгові сполуки та легкі прекурсори PFAS, присутні в АFFF, можуть мігрувати водними та атмосферними шляхами на значні відстані. Встановлено високу здатність PFAS до біомагніфікації, біоаккумуляції та їх токсичний вплив на біоту й здоров'я людини.

**Висновки та пропозиції.** АFFF визначено як одне з найбільш небезпечних джерел «прихованого» забруднення PFAS під час війни. Пропонується створити державний реєстр місць значного застосування АFFF під час масштабних пожеж класу В внаслідок збройної агресії, впровадити національні нормативи ГДК для PFAS у ґрунтах і питній воді відповідно до стандартів ЄС та США, а також включити заходи з ремедіації забруднених територій PFAS до плану повоєнного екологічного відновлення України.

**Ключові слова:** пер- та поліфлуоровані алкільні речовини, стійкі органічні забруднювачі, ґрунт, підземні води, біомагніфікація, біоаккумуляція, біота, токсичність, канцерогенність, здоров'я людини.

*N. Y. Smolii, N. M. Hrynchyshyn*

*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

## ENVIRONMENTAL RISKS AND IMPACTS OF AFFF FIREFIGHTING FOAM USE IN THE CONTEXT OF RUSSIAN ARMED AGGRESSION AGAINST UKRAINE

**Problem.** To extinguish Class B fires, aqueous film-forming foams (AFFF) containing per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are used. These substances are resistant to chemical and biological degradation (“forever chemicals”) and persist in natural environments for decades. Under wartime conditions, due to the destruction of infrastructure and the absence of systems for collecting wastewater from firefighting operations, the use of AFFF leads to PFAS contamination of territories.

**Objective.** Assessment of the environmental hazard risks associated with the use of AFFF under wartime conditions in Ukraine, including the study of the characteristics of PFAS migration in natural environments and the substantiation of the need for the implementation of PFAS monitoring and remediation of contaminated territories.

**Research methods.** Systematic analysis of scientific publications, methods of comparison and generalization.

**Results.** It has been established that under conditions of Russian armed aggression, missile attacks on Ukraine’s energy and fuel infrastructure facilities lead to large-scale Class B fires, for the extinguishment of which significant

volumes of AFFF are used. It has been found that soil destruction caused by military actions leads to the formation of “hydraulic windows” through which rapid migration of PFAS into groundwater occurs. It has been investigated that short-chain compounds and volatile PFAS precursors present in AFFF can migrate over considerable distances through waterborne and atmospheric pathways. A high capacity of PFAS for biomagnification, bioaccumulation, and their toxic effects on biota and human health has been established.

**Conclusions and recommendations.** AFFF has been identified as one of the most hazardous sources of “hidden” PFAS contamination during wartime. It is proposed to establish a state register of sites of significant AFFF use during large-scale Class B fires caused by armed aggression, to implement national maximum permissible concentration (MPC) standards for PFAS in soils and drinking water in accordance with EU and U.S. standards, and to include measures for the remediation of PFAS-contaminated territories in Ukraine’s post-war environmental recovery plan.

**Keywords:** per- and polyfluoroalkyl substances, persistent organic pollutants, soil, groundwater, biomagnification, bioaccumulation, biota, toxicity, carcinogenicity, human health.

**Постановка проблеми.** В умовах повномасштабної збройної агресії рф в Україні відбуваються постійні атаки на об’єкти енергетичної інфраструктури, військові аеродроми, склади паливно-мастильних матеріалів і промислові підприємства, які супроводжуються пожежами надзвичайної складності. Для ліквідації таких пожеж широко застосовуються водні плівкоутворюючі піни (Aqueous Film Forming Foams, AFFF), що є ефективними при гасінні горючих рідин [1]. Використання AFFF, особливо на військових базах під час навчання пожежників та у цивільних аеропортах, призвело до забруднення пер- та поліфлуоруваними алкільними сполуками (PFAS) ґрунту, ґрунтових та поверхневих вод у всьому світі, що може існувати десятиліттями [2]. В умовах війни масштаби використання таких піл значно зростають, що призводить до формування інтенсивних осередків забруднення ґрунтів і водних ресурсів PFAS. Додатковими загрозами PFAS є здатність до тривалого перебування у природних середовищах і глобальна міграція, що посилює їх вплив на екосистеми та здоров’я населення [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Протягом останніх років проблема PFAS активно досліджується у контексті їх поширення, токсичності та шляхів міграції у довкіллі. Встановлено, що AFFF є домінуючим джерелом забруднення PFAS у навколишньому середовищі. Дослідження показують, що навіть після припинення використання AFFF сполуки PFAS можуть трансформуватися і тривалий час залишатися у ґрунтах та водних об’єктах [4].

За даними сучасних оглядів наукових джерел, PFAS широко поширені у поверхневих і підземних водах, причому їх глобальне навантаження значно недооцінене [3]. Вони здатні мігрувати у водоносних горизонтах на значні відстані, що створює ризики для систем питного водопостачання [5]. Крім того, встановлено їх негативний вплив на біоту та здоров’я людини, включаючи токсичні, канцерогенні та ендокринні ефекти [6].

Окремі дослідження підкреслюють складність видалення PFAS із водних систем та необхідність розробки нових технологій

очищення, оскільки традиційні методи є малоефективними [7]. У деяких роботах увага акцентується на соціально-економічні та екологічні виклики, пов’язані із використанням AFFF та їх заміників [6].

**Виділення невирішених частин загальної проблеми.** Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, питання забруднення PFAS внаслідок використання AFFF в умовах збройного конфлікту залишається недостатньо вивченим. Більшість наявних робіт зосереджені на використанні AFFF в цивільних умовах, таких як навчання пожежників на військових базах або експлуатація аеропортів.

Водночас у воєнних умовах виникають специфічні фактори, які суттєво змінюють масштаби та характер забруднення, такі як значні обсяги використання AFFF, руйнування інфраструктури та відсутність систем збору й очищення стічних вод, формування множинних локальних джерел забруднення та відсутність екологічного моніторингу.

Додатковою проблемою є складність видалення PFAS із природних середовищ та низька ефективність традиційних методів очищення води і ґрунтів, що значно ускладнює процеси ремедіації [7].

Актуальність дослідження зумовлена тим, що забруднення PFAS часто залишається «невидимим» поряд з іншими негативними факторами війни, проте його наслідки для питного водопостачання та харчових ланцюгів можуть бути відчутними протягом століть [2], [8].

Метою цієї роботи є оцінка ризиків екологічної небезпеки використання водних плівкоутворюючих піл AFFF в умовах війни в Україні, що передбачає дослідження процесів міграції і накопичення PFAS у компонентах природного середовища, їх вплив на екосистеми, біоту й здоров’я людини для обґрунтування необхідності проведення екологічного моніторингу та ремедіації забруднених територій у післявоєнний період.

**Матеріали та методи дослідження.** Дослідження виконано з використанням наукових публікацій у міжнародних базах даних Scopus,

Web of Science та PubMed. До аналізу включено публікації за 2021–2025 рр., що містять інформацію про хімічну будову, міграцію, трансформацію та токсичність PFAS у складі в AFFF. Аналіз поєднував методи систематичного огляду літератури, порівняльного підходу до оцінки відмінностей умов використання AFFF у мирний та воєнний періоди, а також узагальнення даних щодо екологічних ризиків та загроз PFAS. Обмеження дослідження пов'язані з недостатністю емпіричних даних з територій воєнних дій.

### Результати досліджень та їх обговорення

#### 1. Загальна характеристика PFAS у складі AFFF

PFAS визначають як флюорвмісні сполуки, що мають принаймні один повністю флюорований метильний або метиленовий атом Карбону без будь-якого приєднаного до нього атома H/Cl/Br/I [9]. Кількість різних PFAS, виявлених у навколишньому середовищі, постійно зростає. Приблизно 4700 речовин, описаних Організацією економічного співробітництва та розвитку в 2017 році, зростає до понад 12 000, задокументованих Агентством з

охорони навколишнього середовища США (EPA) у 2023 році [10].

PFAS у складі AFFF діють як поверхнево - активні речовини, що знижують поверхневий натяг води, сприяють швидкому розтіканню пін і утворюють тонку плівку на поверхні горючого палива, яка обмежує доступ повітря й запобігає випаровуванню рідин [11].

Висока електронегативність Флюору призводить до сильної поляризації зв'язку C–F ( $\approx 485$  кДж/моль), що обумовлює інертність молекули PFAS до термічного, хімічного та біологічного розкладання. Саме ця властивість характеризує PFAS як «вічні хімікати» [12, 13].

Перфлюоралкільні кислоти (PFAA) є підгрупою PFAS, які зазвичай використовують у рецептурах AFFF. Вони побудовані з перфлюорованого алкільного ланцюга ( $C_nF_{2n+1}$ ), в якому всі або більшість атомів Гідрогену заміщені Флюором. Такий «флюорований хвіст» поєднується з полярною функціональною групою –COOH (перфлюоралкілкарбонові кислоти (PFCA), або –SO<sub>3</sub>H (перфлюоралкілсульфонові кислоти (PFSA) (рис.1), що забезпечує амфіфільні властивості та високу поверхневу активність [12, 14].



Рисунок 1 – Хімічна структура основних представників перфлюорованих алкільних кислот

За довжиною карбонового ланцюга PFAA поділяють на довголанцюгові ( $C \geq 8$ ) та коротколанцюгові сполуки ( $C < 6$ ). Серед довголанцюгових найбільш відомими в складі AFFF є перфлюорооктансульфонова кислота ( $C_8F_{15}S_3$ -, PFOS) та перфлюорооктанова кислота ( $C_7F_{15}COOH$ , PFOA) [15], які є домінуючими на забруднених територіях AFFF [4, 13].

Коротколанцюгові PFAA все частіше використовують як альтернативу довголанцюгових в сучасних складах AFFF, через обмеження, встановлені Стокгольмською конвенцією про стійкі органічні забруднювачі щодо використання довголанцюгових PFAA [16].

Хімічний склад сучасних AFFF не обмежується лише PFAA. Однією з найбільших проблем є наявність у їх складі прекурсорів – поліфлюорованих молекул (наприклад, флюортеломерів), які мають складнішу структуру з включенням неповністю флюорованих ланок. Під впливом мікробіологічних процесів прекурсори розкладаються до стабільних PFAA [14]. Використання запатентованих формул

виробниками AFFF обмежує можливість оцінки реального обсягу забруднення PFAS, оскільки прекурсори часто не враховуються у стандартних аналітичних методах [17].

Протягом останнього десятиліття дослідники докладають значних зусиль для ідентифікації та кількісної оцінки PFAS, присутніх у AFFF, що використовують в усьому світі [14]. Нещодавні дослідження методом нецільового скринінгу виявили понад 124 різні види PFAS на польових ділянках, які постраждали від розливів AFFF, що підтверджує складність хімічного складу сучасних піноутворювачів [18]. Досліджено, що у питній воді поблизу понад 300 військових баз США, які використовували AFFF для навчання з пожежної підготовки та пожежогасіння, значна частина PFAS складається з прекурсорів [8].

Отже, унікальні вогнегасні властивості піноутворювачів AFFF зумовлені наявністю PFAS, хімічна будова і різноманітність яких визначає як надзвичайну ефективність пін для гасіння пожеж класу B, так і їхню небезпеку для довкілля.

## 2. Масштаби емісії PFAS від AFFF в умовах війни

AFFF є одним із основних точкових джерел надходження PFAS у довкілля, особливо на військових об'єктах під час навчань із пожежогасіння та ліквідації аварійних ситуацій. За узагальненими даними, під час одного випадку застосування AFFF обсяг емісії PFAS може коливатися від 1,4 до 43,7 кг, тоді як сумарні річні викиди можуть досягати сотень кілограмів залежно від інтенсивності використання [17].

В умовах війни ці показники мають тенденцію до суттєвого зростання, що зумовлено масштабними пожежами на нафтобазах, складах паливно-мастильних матеріалів та промислових об'єктах. З початку повномасштабного вторгнення РФ на територію України зафіксовано численні випадки ураження об'єктів паливної інфраструктури, що супроводжувалися тривалими пожежами та масовим застосуванням піноутворювачів. Зокрема, під час гасіння пожежі на Калинівській нафтобазі у березні 2022 року, спричиненої ракетним обстрілом, що призвів до загоряння понад 6000 тонн бензину та дизельного пального, було використано флуорвмісні піни в обсязі приблизно 12–15 тис. літрів на площі близько 1,4 га [19]. Такі обсяги застосування свідчать про значний потенціал локального забруднення PFAS.

Особливістю використання AFFF у воєнних умовах є практично повна відсутність контролю за їх застосуванням, а також за механізмами збору, локалізації та очищення забруднених стічних вод. У результаті PFAS безпосередньо потрапляють у ґрунти, підземні та поверхневі води, формуючи осередки інтенсивного хімічного забруднення.

Додатковим ускладнювальним фактором є варіабельність складу AFFF різних виробників, які можуть містити різні типи PFAS та їх прекурсорів, що істотно ускладнює кількісну оцінку сумарного екологічного навантаження та прогнозування поведінки забруднювачів у довкіллі [1].

Отже, використання AFFF в умовах війни призводить до значного зростання масштабів емісії PFAS у довкіллі. Масовий і неконтрольований характер застосування піноутворювачів, відсутність та руйнування систем очищення стічних вод, а також складний і варіабельний хімічний склад AFFF сприяють формуванню значних осередків забруднення.

## 3. Поведінка та шляхи міграції FAS у навколишньому середовищі

Поведінка PFAS, що потрапляють у навколишнє середовище внаслідок використання AFFF, є складною через унікальні фізико-хімічні властивості цих сполук [20]. Міграція PFAS у

довкіллі відбувається різними шляхами, які в умовах війни значно інтенсифікуються (рис. 2).



Рисунок 2 – Схема міграції PFAS у довкіллі в умовах війни

Використання AFFF на військових майданчиках з навчання пожежогасінню призвело до масштабного поширення PFAS у різних абіотичних компонентах навколишнього середовища, включаючи ґрунти, поверхневі та підземні води, донні відклади та атмосферу [14, 21]. Зони застосування AFFF демонструють максимальні концентрації PFAS серед усіх відомих антропогенних джерел забруднення [22]. Аналіз показує, що ґрунти характеризуються значно вищими концентраціями PFAS порівняно з підземними водами, що дозволяє розглядати їх як первинний резервуар акумуляції цих стійких сполук [20].

З ґрунту PFAS можуть вертикально мігрувати в підземні води [23]. Вертикальна міграція у ґрунтах є складним процесом на який впливає багато факторів, серед яких вагомим є довжина флуорованого карбонового ланцюга. Довголанцюгові PFAA (наприклад, PFOS та PFOA) мають виражену гідрофобність, що зумовлює їх високу спорідненість до органічного Карбону ґрунту та мінеральних сполук. Їх вертикальна міграція в підземні води є сповільненою через сильні адсорбційні взаємодії, що призводить до тривалого утримання цих речовин у верхніх горизонтах ґрунту [20]. Коротколанцюгові PFAA, мають значно вищу розчинність у воді та низьку сорбційну здатність. Це дозволяє їм швидко мігрувати ґрунтовим профілем та формувати шлейфи забруднення в підземних водах [24].

Прекурсорам PFAS належить важлива роль у формуванні «прихованого» забруднення, оскільки навіть за низьких початкових концентрацій PFAA їхня кількість у ґрунтових водах може зростати з часом через мікробну трансформацію у ґрунті [14].

Особливого значення в умовах воєнних дій набуває механічне руйнування ґрунтового покриву. Утворення вирв від вибухів та інтенсивне переміщення ґрунту технікою порушують природну структуру горизонтів. Такі деформації створюють «гідравлічні вікна», через які PFAS отримують прямий доступ до нижніх піщаних горизонтів з мінімальною сорбційною здатністю. Це прискорює транспорт PFAS до водних об'єктів.

PFAS легко переміщуються в підземних водах. Дослідження демонструють значне забруднення водних об'єктів поблизу місць застосування AFFF [20]. У поверхневій воді PFAS можуть також потрапляти через поверхневий стік й атмосферне осадження [25].

Атмосферне перенесення має важливе значення у поширенні PFAS на далекі відстані від джерела забруднення. Леткі прекурсори PFAS, зокрема флуортеломерні спирти (FTOHs), можуть випаровуватись під час високотемпературних пожеж. В атмосфері вони піддаються фотохімічному окисненню з утворенням стабільних кислот, які можуть випадати з опадами на значних відстанях від джерела забруднення [26].

Поглинання PFAS рослинами є ще одним шляхом міграції забруднювачів і є небезпечним процесом через його потенційний вплив на біоту й здоров'я людини [27, 28].

Таким чином, в умовах воєнних дій використання AFFF формує первинні джерела забруднення PFAS, тоді як коротколанцюгові PFAA і леткі прекурсори забезпечують їх швидке поширення водними та атмосферними шляхами. Руйнування ґрунтового покриву внаслідок бойових дій значно прискорює транспорт PFAS до підземних вод, перетворюючи локальні джерела забруднення на масштабну екологічну загрозу.

#### **4. Екологічні ризики PFAS для екосистем, біоти та для здоров'я людини**

PFAS становлять суттєві ризики для екосистем, біоти та здоров'я людини через значне поширення в навколишньому середовищі, стабільність й біоаккумуляцію [29].

Зростаюча кількість досліджень демонструє несприятливий вплив PFAS, особливо PFOA та PFOS, на екологічні системи, біоту та здоров'я людей [30].

PFAS, присутні в різних середовищах (вода, ґрунт, повітря), можуть поглинатися та концентруватися місцевою флорою та фауною [31]. Більші концентрації PFAS спостерігаються у видів вищого трофічного рівня, що свідчить про те, що ці сполуки зазнають біомагніфікації в харчовому ланцюзі [32].

У ґрунті PFAS зумовлюють зміни в мікробіоценозі й знижують ферментативну активність [33].

**PFAS мають підтверджений токсичний вплив на різні групи тварин, особливо у водних екосистемах.** Навіть у низьких концентраціях такі сполуки, як PFOA та PFOS, здатні викликати фізіологічні та біохімічні зміни у водоростей, безхребетних, риб, амфібій та інших організмів [34]. Занепокоєння щодо токсичності зростає зі збільшенням довжини флуорованого ланцюга, оскільки довголанцюгові PFAS зазвичай довше виводяться з організму через їхню нижчу розчинність у воді, вищу спорідненість з білками сироватки крові та ентерогепатичну рециркуляцію, що збільшує час їх виведення з плазми та тканин [35].

Епідеміологічні дослідження пов'язують вплив PFAS з широким спектром шкідливих наслідків для здоров'я, включаючи ендокринні та метаболічні порушення, імунну дисфункцію, репродуктивну та розвивальну токсичність, порушення функції печінки та нирок, серцево-судинні та метаболічні захворювання та підвищений ризик окремих видів раку [36, 37].

Екологічний ризик PFAS в умовах війни в Україні посилюється відсутністю належного моніторингу й стандартів. Однією з найбільш критичних проблем у контексті забруднення PFAS є відсутність національних нормативів щодо гранично допустимих концентрацій (ГДК) цих сполук у питній воді, ґрунтах. На відміну від країн ЄС, де Директива (EU) 2020/2184 [38] встановлює ліміт на рівні 0,1 мкг/л для суми 20 основних PFAS у питній воді, або США, де EPA нещодавно впровадила ще суворіші обмеження до 4 нг/л для шести PFAS, включаючи PFOA та PFOS, із запропонованим максимальним рівнем забруднення 4 нг/л [39], українське законодавство наразі не визначає ці речовини як обов'язкові для моніторингу.

Отже, використання AFFF в умовах війни створює довгострокові ризики для екосистем, біоти та цивільного населення через здатність PFAS до біоаккумуляції та специфічну токсикологічну дію. Оскільки ці сполуки важко розкладаються в природних умовах, вони включаються у харчові ланцюги. Відсутність моніторингу PFAS в Україні в умовах війни посилює загрозу громадському здоров'ю.

**Висновки.** Використання AFFF при гасінні пожеж класу В є головним чинником надходження PFAS у довкілля України в умовах війни. Руйнування ґрунтового покриву та утворення вирв від вибухів створюють «гідравлічні вікна», що значно прискорюють транспорт цих полук у підземні водні горизонти. Висока стійкість PFAS в природних умовах та їх здатність до біомагніфікації та біоаккумуляції створюють тривалу загрозу здоров'ю населення через забруднення питної води

та харчових ланцюгів. Відсутність в Україні нормативів ГДК для PFAS унеможливило проведення моніторингу та ефективну ліквідацію наслідків забруднення.

Пропонується створити державний реєстр місць масштабного використання AFFF в умовах збройної агресії для першочергового моніторингу за PFAS, впровадити національні нормативи ГДК для PFAS у воді та ґрунтах, включити заходи з ремедіації забруднених територій до плану повоєнного екологічного відновлення України.

#### Список літератури:

1. Malik P., Nandini D., Tripathi B. P. Firefighting aqueous film forming foam composition, properties and toxicity: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2024. Vol. 22. P. 2013–2033. URL: <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01739-x>
2. Høisæter Å., Breedveld G. D. Leaching potential of per- and polyfluoroalkyl substances from source zones with historic contamination of aqueous film forming foam – a surfactant mixture problem. *Environmental Advances*. 2022. Vol. 8. Art 100222. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100222>
3. Ackerman Grunfeld D., Gilbert D., Hou J., Jones A. M., Lee M. J., Kibbey T. C. G., O'Carroll D. M. Underestimated burden of PFAS in global surface waters and groundwaters. *Nature Geoscience*. 2024. Vol. 17. P. 340–346. URL: <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01402-8>
4. Ehsan M. N., Riza M., Pervez M. N., Li C.-W., Zorpas A. A., Naddeo V. PFAS contamination in soil and sediment: contribution of sources and environmental impacts on soil biota. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024. Vol. 9. Art 100643. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100643>
5. Benaafi M., Bafaqeer A. PFAS in groundwater systems: occurrence, fate and remediation. *Water*. 2024. Vol. 16, № 11. Art 1583. URL: <https://doi.org/10.3390/w16111583>
6. Baldwin W. S., Bloom M. S., Chung K. W., Dasgupta S., DeLorenzo M. E., Hunt K. J., Key P. B., Pearce J. L., Rock K. D., Tanabe P., Jacobellis M. A., Garcia M. M., Bain L. J. Toxicological, chemical, social, and economic challenges associated with PFAS and replacement aqueous film-forming foams (AFFF). *Toxics*. 2025. Vol. 13, No. 9. Art 732. URL: <https://doi.org/10.3390/toxics13090732>
7. Amen R., Al-Shaibani M. M., Al-Gheethi A. A., Ghadouani A. PFAS removal from water: mechanisms and challenges. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 23. Art 16173. URL: <https://doi.org/10.3390/su152316173>
8. Ruyle B. J., Thackray C. P., Butt C. M., LeBlanc D. R., Tokranov A. K., Vecitis C. D., Sunderland E. M. Centennial persistence of forever chemicals at military fire training sites. *Environmental Science & Technology*. 2023. 57 (21). P. 8096–8106. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00675>
9. Reconciling terminology of the universe of per- and polyfluoroalkyl substances: recommendations and practical guidance. *Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)*. Paris: OECD Publishing. 2021. URL: <https://doi.org/10.1787/e458e796-en>
10. Schymanski E. L., Zhang J., Thiessen P. A., Chirsir P., Kondic T., Bolton E. E. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in PubChem: 7 million and growing. *Environmental Science & Technology*. 2023. Vol. 57, No. 44. P. 16918–16928. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c0485>
11. Jahura F. T., Mazumder N. U. S., Hossain M. T., Kasebi A., Girase A., Ormond R. B. Exploring the prospects and challenges of fluorine-free firefighting foams (F3) as alternatives to aqueous film-forming foams (AFFF): A review. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9, No. 36. P. 37430–37444. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03673>
12. Ateia M., Van Buren J., Barrett W., Martin T., Back G. G. Sunrise of PFAS replacements: A perspective on fluorine-free foams. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 21. P. 7986–7996. URL: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c01124>
13. Sunderland E. M., Hu X. C., Dassuncao C., Tokranov A. K., Wagner C. C., Allen J. G. A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. *Nature Reviews Materials*. 2023. Vol. 8, No. 2. P. 111–132. DOI: 10.1038/s41578-022-00496-5. URL: <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00496-5>
14. Yan P.-F., Chen L., Li X., Wang Z., Zhang Y. A review of the occurrence and microbial transformation of PFAS in AFFF-impacted environments. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 927. Art. 171883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171883>
15. Ateia M., Van Buren J., Barrett W., Martin T., Back G. G. Sunrise of PFAS replacements: A perspective on fluorine-free foams. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 21. P. 7986–7996. URL: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c01124>
16. Heidari H., Abbas T., Ok Y. S., Tsang D. C. W., Bhatnagar A., Khan E. GenX is not always a better fluorinated organic compound than PFOA: A critical review on aqueous phase treatability by adsorption and its associated cost. *Water Research*. 2021. Vol. 205. Art. 117683. URL: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117683>
17. Mussabek D., Sun M., Wu J., Li Y., Wang Z., Chen J. Impacts of PFAS on aquatic biota: From

- molecular mechanisms to ecosystem services. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Vol. 442. Art. 130012. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130012>
18. Schübler M., Capitain C., Bugsel B. та ін. Determination and characterization of PFAS in environmental samples: Recent analytical advances. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2025. Vol. 417. P. 6049–6064. URL: <https://doi.org/10.1007/s00216-024-05611-3>
19. Бойченко С., Карамушка В., Хлобистов І. Оцінка викидів забруднюючих речовин в атмосферу внаслідок пожежі на Калинівській нафтобазі, спричиненої ракетним ударом у березні 2022 року. *Геофізичний журнал*. 2025. Т. 47, № 2. URL: <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322465>
20. Brusseau M. L., Guo B. PFAS concentrations in soil versus soil porewater: mass distributions and the impact of adsorption at air–water interfaces. *Chemosphere*. 2022. Vol. 302. Art 134938. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134938>
21. Narasimhappa P., Singh S., Varshney R., Chauhan V., Kour R., Ramamurthy P. C., Shehata N. Environmental behavior and human health risks of PFAS: Occurrence, toxicity, and the state-of-the-art removal approaches. *RSC Advance*. 2025. 15(52), P. 44555–44583. URL: <https://doi.org/10.1039/d5ra07672b>
22. Zhang Y., Wang J., Li X., Chen L., Liu H. Removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from water: recent advances and future perspectives. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03673>
23. Liu J., Cao T., Zhang T., Hofmann T., Chen W. Per- and polyfluoroalkyl substances-driven enhancement of colloid-facilitated contaminant transport in groundwater. *Water Research*. 2026. Vol. 292. P. 125335. URL: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125335>
24. McGarr J. T., Mbonimpa E. G., McAvoy D. C., Soltanian M. R. Fate and transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) at aqueous film-forming foam (AFFF) discharge sites: a review. *Soil Systems*. 2023. Vol. 7, No. 2. URL: <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020053>
25. Raschke A., Nejadhashemi A. P., Rafiei V., Fernandez N., Shabani A., Li S.-G. Opportunities and challenges of integrated large-scale PFAS modeling: a case study for PFAS modeling at a watershed scale. *Journal of Environmental Engineering*. 2022. Vol. 148, No. 9. Art 05022005. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0002034](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0002034)
26. Li W.-L., Hung H., Kasperkiewicz A., Shunthirasingham C., Chisamore J., Rabu M., Park R., Huo C.-Y., Lee P., Dryfhout-Clark H. Assessing the shifts in atmospheric per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) levels in the Great Lakes and implications for the environmental transport and fate. *ACS ES&T Air*. 2025. Vol. 2, No. 9. P. 1927–1938. URL: <https://doi.org/10.1021/acsestair.5c00121>
27. McGarr J. T., Mbonimpa E. G., McAvoy D. C., Soltanian M. R. Fate and transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) at aqueous film-forming foam (AFFF) discharge sites: a review. *Soil Systems*. 2023. Vol. 7, No. 2. P. 53. URL: <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020053>
28. Alam Md S., Abbasi A., Chen G. Fate, distribution, and transport dynamics of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the environment. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 371. P. 123163. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123163>
29. Ma T., Ye C., Wang T., Li X., Luo Y. Toxicity of Per- and Polyfluoroalkyl Substances to Aquatic Invertebrates, Planktons, and Microorganisms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol.19, No.24. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph192416729>
30. Alsadik A., Akintunde O. O., Habibi H. R., et al. PFAS in water environments: recent progress and challenges in monitoring, toxicity, treatment technologies, and post-treatment toxicity. *Environmental Systems Research*. 2025. Vol. 14. P. 18. URL: <https://doi.org/10.1186/s40068-025-00411-9>
31. Lindstrom A. B., Strynar M. J., Libelo E. L. Polyfluorinated compounds: past, present, and future. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22, No. 3. Art 995. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms22030995>
32. Yang H., Liang Y., Tian S., Li X., Liu Y. Perfluorinated and polyfluoroalkyl compounds in the atmosphere: a review. *Atmosphere*. 2025. Vol. 16, No. 9. Art 1070. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos16091070>
33. Ханік Ю.О., Звір Г.І., Гринчишин Н.М. Вплив фторсинтетичної плівкоутворюючої піни для пожежогасіння на мікробоценоз ґрунту. *Екологія та ноосферологія*. 2023. 34 (2), 61-69 с. URL: <https://doi.org/10.15421/032310>
34. Brunn H., Arnold G., Körner W., Rippen G., Steinhäuser K. G., Valentin I. PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. *Environmental Sciences Europe*. 2023. Vol. 35. Art 20. URL: <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>
35. Fenton S. E., et al. Per- and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: current state of knowledge and strategies for informing future research. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2021. Vol. 40, No. 3. P. 606–630. URL: <https://doi.org/10.1002/etc.4946>

36. Alsadik A., Akintunde O. O., Habibi H. R., Achari G. *PFAS in water environments: recent progress and challenges in monitoring, toxicity, treatment technologies, and post-treatment toxicity. Environmental Systems Research*. 2025. Vol. 14, No. 1, Art 18. URL: <https://doi.org/10.1186/s40068-025-00411-9>

37. Li, Z. (Jerry), Xia, J., Liu, Y., Zhang, W., Ke, C., Tang, G., & Shi, J. Per- and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment and Human Tissue: A Critical Review of Distribution, Exposure Pathways, and Health Risks. *Environmental Pollution*. 2026 Art 127988. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2026.127988>

38. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council on the quality of water intended for human consumption (recast). *European Parliament and Council. Official Journal of the European Union*. 16.12.2020. L 435. P. 1–62. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>

39. U.S. Environmental Protection Agency. *Final PFAS National Primary Drinking Water Regulation*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2024. URL: <https://www.epa.gov/pfas/epa-final-pfas-national-primary-drinking-water-regulation>

#### References:

1. Malik, P., Nandini, D., & Tripathi, B. P. (2024). Firefighting aqueous film forming foam composition, properties and toxicity: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 22, 2013–2033. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01739-x>

2. Høisæter, Å., & Breedveld, G. D. (2022). Leaching potential of per- and polyfluoroalkyl substances from source zones with historic contamination of aqueous film forming foam: A surfactant mixture problem. *Environmental Advances*, 8, 100222. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100222>

3. Ackerman Grunfeld, D., Gilbert, D., Hou, J., Jones, A. M., Lee, M. J., Kibbey, T. C. G., & O'Carroll, D. M. (2024). Underestimated burden of PFAS in global surface waters and groundwaters. *Nature Geoscience*, 17, 340–346. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01402-8>

4. Ehsan, M. N., Riza, M., Pervez, M. N., Li, C.-W., Zorpas, A. A., & Naddeo, V. (2024). PFAS contamination in soil and sediment: Contribution of sources and environmental impacts on soil biota. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100643. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2024.100643>

5. Benaafi, M., & Bafaqeer, A. (2024). PFAS in groundwater systems: Occurrence, fate and remediation. *Water*, 16(11), 1583. <https://doi.org/10.3390/w16111583>

6. Baldwin, W. S., Bloom, M. S., Chung, K. W., Dasgupta, S., DeLorenzo, M. E., Hunt, K. J., Key, P.

B., Pearce, J. L., Rock, K. D., Tanabe, P., Jacobellis, M. A., Garcia, M. M., & Bain, L. J. (2025). Toxicological, chemical, social, and economic challenges associated with PFAS and replacement aqueous film-forming foams (AFFF). *Toxics*, 13(9), 732. <https://doi.org/10.3390/toxics13090732>

7. Amen, R., Al-Shaibani, M. M., Al-Gheethi, A. A., & Ghadouani, A. (2023). PFAS removal from water: Mechanisms and challenges. *Sustainability*, 15(23), 16173. <https://doi.org/10.3390/su152316173>

8. Ruyle, B. J., Thackray, C. P., Butt, C. M., LeBlanc, D. R., Tokranov, A. K., Vecitis, C. D., & Sunderland, E. M. (2023). Centurial persistence of forever chemicals at military fire training sites. *Environmental Science & Technology*, 57(21), 8096–8106. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00675>

9. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Reconciling terminology of the universe of per- and polyfluoroalkyl substances: recommendations and practical guidance. Paris: OECD Publishing, 2021. <https://doi.org/10.1787/e458e796-en>

10. Schymanski, E. L., Zhang, J., Thiessen, P. A., Chirsir, P., Kondic, T., & Bolton, E. E. (2023). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in PubChem: 7 million and growing. *Environmental Science & Technology*, 57(44), 16918–16928. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c0485>

11. Jahura, F. T., Mazumder, N. U. S., Hossain, M. T., Kasebi, A., Girase, A., & Ormond, R. B. (2024). Exploring the prospects and challenges of fluorine-free firefighting foams (F3) as alternatives to aqueous film-forming foams (AFFF): A review. *ACS Omega*, 9(36), 37430–37444. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03673>

12. Ateia, M., Van Buren, J., Barrett, W., Martin, T., & Back, G. G. (2023). Sunrise of PFAS replacements: A perspective on fluorine-free foams. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(21), 7986–7996. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c01124>

13. Sunderland, E. M., Hu, X. C., Dassuncao, C., Tokranov, A. K., Wagner, C. C., & Allen, J. G. (2023). A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. *Nature Reviews Materials*, 8(2), 111–132. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00496-5>

14. Yan, P.-F., Chen, L., Li, X., Wang, Z., & Zhang, Y. (2024). A review of the occurrence and microbial transformation of PFAS in AFFF-impacted environments. *Science of the Total Environment*, 927, 171883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171883>

15. Ateia, M., Van Buren, J., Barrett, W., Martin, T., & Back, G. G. (2023). Sunrise of PFAS replacements: A perspective on fluorine-free

foams. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(21), 7986–7996.

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c01124>

16. Heidari, H., Abbas, T., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., Bhatnagar, A., & Khan, E. (2021). GenX is not always a better fluorinated organic compound than PFOA: A critical review on aqueous phase treatability by adsorption and its associated cost. *Water Research*, 205, 117683.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117683>

17. Mussabek, D., Sun, M., Wu, J., Li, Y., Wang, Z., & Chen, J. (2023). Impacts of PFAS on aquatic biota: From molecular mechanisms to ecosystem services. *Journal of Hazardous Materials*, 442, 130012.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130012>

18. Schübler, M., Capitain, C., Bugsel, B., et al. (2025). Determination and characterization of PFAS in environmental samples: Recent analytical advances. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 417, 6049–6064. <https://doi.org/10.1007/s00216-024-05611-3>

19. Boychenko S., Karamushka V., & Khlobystov I. (2025). Otsinka vykydiv zapal'nykh rehovyn v atmosferi vnaslidok pozhezhi na Kalynivs'kiy naftobazi, sprychynenoyi raketnym udarom u berezni 2022 roku. [Assessment of emissions of flammable substances into the atmosphere due to a fire at the Kalynivka oil depot caused by a missile strike in March 2022]. *Geophysical Journal*. 47, № 2. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322465> [in Ukrainian]

20. Brusseau, M. L., & Guo, B. (2022). PFAS concentrations in soil versus soil porewater: Mass distributions and the impact of adsorption at air–water interfaces. *Chemosphere*, 302, 134938. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134938>

21. Zhang, Y., Wang, J., Li, X., Chen, L., & Liu, H. (2024). Removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from water: Recent advances and future perspectives. *ACS Omega*, 9. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03673>

22. Narasimhappa, P., Singh, S., Varshney, R., Chauhan, V., Kour, R., Ramamurthy, P. C., & Shehata, N. (2025). Environmental behavior and human health risks of PFAS: Occurrence, toxicity, and state-of-the-art removal approaches. *RSC Advances*, 15(52), 44555–44583. <https://doi.org/10.1039/d5ra07672b>

23. Liu, J., Cao, T., Zhang, T., Hofmann, T., & Chen, W. (2026). Per- and polyfluoroalkyl substances-driven enhancement of colloid-facilitated contaminant transport in groundwater. *Water Research*, 292, 125335.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125335>

24. McGarr, J. T., Mbonimpa, E. G., McAvoy, D. C., & Soltanian, M. R. (2023). Fate and transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) at aqueous film-forming foam (AFFF) discharge sites: A review. *Soil Systems*, 7(2), 53. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020053>

25. Raschke, A., Nejadhashemi, A. P., Rafiei, V., Fernandez, N., Shabani, A., & Li, S.-G. (2022). Opportunities and challenges of integrated large-scale PFAS modeling: A case study for PFAS modeling at a watershed scale. *Journal of Environmental Engineering*, 148(9), 05022005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0002034](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0002034)

26. Li, W.-L., Hung, H., Kasperkiewicz, A., Shunthirasingham, C., Chisamore, J., Rabu, M., Park, R., Huo, C.-Y., Lee, P., & Dryfhout-Clark, H. (2025). Assessing the shifts in atmospheric per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) levels in the Great Lakes and implications for the environmental transport and fate. *ACS ES&T Air*, 2(9), 1927–1938. <https://doi.org/10.1021/acsestair.5c00121>

27. McGarr, J. T., Mbonimpa, E. G., McAvoy, D. C., & Soltanian, M. R. (2023). Fate and Transport of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) at Aqueous Film Forming Foam (AFFF) Discharge Sites: A Review. *Soil Systems*, 7(2), 53. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020053>

28. Alam, M. S., Abbasi, A., & Chen, G. (2024). Fate, distribution, and transport dynamics of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the environment. *Journal of Environmental Management*, 371, 123163. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123163>

29. Ma, T., Ye, C., Wang, T., Li, X., & Luo, Y. (2022). Toxicity of per- and polyfluoroalkyl substances to aquatic invertebrates, planktons, and microorganisms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), 16729. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416729>

30. Alsadik, A., Akintunde, O.O., Habibi, H.R. et al. (2025). PFAS in water environments: recent progress and challenges in monitoring, toxicity, treatment technologies, and post-treatment toxicity. *Environ Syst Res* 14, 18 <https://doi.org/10.1186/s40068-025-00411-9>

31. Lindstrom, A. B., Strynar, M. J., & Libelo, E. L. (2021). Polyfluorinated compounds: Past, present, and future. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(3), 995. <https://doi.org/10.3390/ijms22030995>

32. Yang, H., Liang, Y., Tian, S., Li, X., & Liu, Y. (2025). Perfluorinated and Polyfluoroalkyl Compounds in the Atmosphere: A Review. *Atmosphere*, 16(9), 1070. <https://doi.org/10.3390/atmos16091070>

33. Khanik Y.O., Zvir G. I., & Grynchysyn N.M. (2023). Vplyv ftorsyntetychnoyi plivky utvoryuye piny dlya pozvezhohasinnya na mikrobotsenoz obhruntovano. [Influence of firefighting fluorosynthetic film forming foam on soil microbocenosis]. *Ekolohiya ta noosferolohiya*. 34 (2), 61-69. <https://doi.org/10.15421/032310> [in Ukrainian]
34. Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rippen, G., Steinhäuser, K. G., & Valentin, I. (2023). PFAS: Forever chemicals—Persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. *Environmental Sciences Europe*, 35, 20. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>
35. Fenton, S. E., Ducatman, A., Boobis, A., DeWitt, J. C., Lau, C., Ng, C., & Lindstrom, A. B. (2021). Per- and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: Current state of knowledge and strategies for informing future research. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(3), 606–630. <https://doi.org/10.1002/etc.4946>
36. Alsadik, A., Akintunde, O. O., Habibi, H. R., & Achari, G. (2025). *PFAS in water environments: Recent progress and challenges in monitoring, toxicity, treatment technologies, and post-treatment toxicity*. *Environmental Systems Research*.14(1). <https://doi.org/10.1186/s40068-025-00411-9>
37. Li Z. (Jerry), Xia J., Liu Y., Zhang W., Ke C., Tang G., & Shi J. (2026). Per- and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment and Human Tissue: A Critical Review of Distribution, Exposure Pathways, and Health Risks. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2026.127988>
38. European Parliament and Council. (2020, December 16). *Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council on the quality of water intended for human consumption (recast)*. *Official Journal of the European Union*, L 435, 1–62. <http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>
39. U.S. Environmental Protection Agency. (2024). *Final PFAS national primary drinking water regulation*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/pfas/epa-final-pfas-national-primary-drinking-water-regulation>

© Н. Я. Смолій, Н. М. Гринчишин, 2026.

**Оглядова стаття.**

Надійшла до редакції 27.03.2026.

Прийнята до друку 29.04.2026.

Опублікована 25.05.2026.