

**ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ ПЕР- ТА  
ПОЛІФТОРАЛКІЛЬНИМИ РЕЧОВИНАМИ**

**ENVIRONMENTAL RISKS OF SOIL CONTAMINATION BY PER- AND  
POLYFLUOROALKYL SUBSTANCES**

**Смолій Назар Ярославович**, аспірант, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Smoliy146@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-7028-677X>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.05>

**Анотація.** Проаналізовано та узагальнено сучасні наукові дані щодо джерел надходження, поведінки та комплексних екологічних ризиків забруднення ґрунтового покриву пер- та поліфторалкільними речовинами (PFAS). Визначено, що основними джерелами антропогенного забруднення ґрунтів є викиди фторполімерних підприємств, утилізація відходів на муніципальних полігонах, атмосферне перенесення, повторне застосування осадів стічних вод й фторованих агрохімікатів у сільському господарстві. Особливу увагу приділено екологічним наслідкам застосування вогнегасних пін типу AFFF для ліквідації масштабних пожеж, що набуло критичної актуальності в Україні внаслідок збройної агресії російської федерації та систематичних обстрілів промислових об'єктів і нафтобаз. Розкрито механізми міграції та акумуляції PFAS у поверхневому шарі ґрунту, що контролюються процесами гідрофобної взаємодії з органічною речовиною, електростатичної адсорбції на мінеральних компонентах та утримання на межі розділу фаз «повітря-вода» у зоні аерації. Комплексно охарактеризовано екологічні ризики для живих компонентів екосистем. Показано негативний вплив PFAS на структуру ґрунтового мікробіоценозу та ферментативну активність. Проаналізовано вплив ксенобіотиків для вищих рослин і їх фітотоксичність. Визначено загрози для ґрунтової фауни (зокрема дощових черв'яків). Показано шляхи включення «вічних хімікатів» у наземні трофічні ланцюги та їх вимивання у підземні води. Матеріали має практичне значення для екологічного моніторингу та прийняття рішень під час рекультивації забруднених територій.

**Ключові слова:** вогнегасні піни AFFF, сорбція, підземні води, мікробіоценоз ґрунту, ферментативна активність ґрунту, фітотоксичність, трофічні ланцюги.

**Abstract.** The current scientific data on the sources of input data, behavior and complex environmental risks of soil contamination by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are analyzed and summarized. It is determined that the primary sources of anthropogenic soil contamination include emissions from the production of fluoropolymers, waste disposal in municipal landfills, atmospheric sediments and the use of biosolids from wastewater and fluorinated agrochemicals in agriculture. Special attention is paid to the environmental consequences of the use of aqueous film-forming foams (FFF) for extinguishing large-scale fires, which has become critically relevant in Ukraine due to the armed aggression of the Russian Federation and systematic shelling of industrial facilities and oil storage facilities. The mechanisms of migration and accumulation of PFAR in the upper soil layer, controlled by hydrophobic interactions with organic matter, electrostatic adsorption on mineral components, and retention at the air-water interface in the vadose zone, are revealed. The ecological risks for components of the biotic ecosystem are comprehensively characterized. The negative impact of PFAR on the structure of soil

microbiocenosis and enzymatic activity is shown. The impact of these xenobiotics on higher plants and their phytotoxicity is analyzed. Threats to soil fauna (in particular, earthworms) are determined. The ways of integration of "perpetually active chemicals" into terrestrial food chains and their leaching into groundwater are demonstrated. The materials are of practical importance for environmental monitoring and decision-making during the remediation of contaminated sites.

**Keywords:** aqueous film-forming foams (AFF), sorption, groundwater, soil microbiocenosis, soil enzymatic activity, phytotoxicity, food chains.

## **1. ВСТУП**

Ґрунти зазнають впливу різних антропогенних факторів, включаючи хімічні забруднювачі. Особливу групу сучасних ксенобіотиків становлять пер- та поліфторалкільні сполуки (PFAS), які характеризуються високою хімічною, термічною та біологічною стабільністю.

Останніми роками увага міжнародної спільноти до проблеми забруднення PFAS суттєво зросла. Це пов'язано з виявленням масштабного забруднення ґрунтів і водних ресурсів у різних країнах світу, а також із підтвердженням негативного впливу цих сполук на здоров'я населення. Європейський Союз, Агентство з охорони довкілля (EPA) США та інші міжнародні організації активно розробляють нормативні обмеження щодо використання PFAS, а окремі сполуки вже включено до переліку небезпечних речовин Стокгольмської конвенції.

Через широке використання та стійкість ці хімічні речовини наявні в ґрунтах та осадових породах по всьому світу<sup>1</sup>. Забруднення ґрунтів PFAS є екологічною проблемою, оскільки ґрунт виступає не лише депонуючим середовищем для цих сполук, але й джерелом їх подальшої міграції у підземні води, рослини та харчові ланцюги<sup>2</sup>. Екологічні ризики, пов'язані із забрудненням ґрунтів PFAS, залишаються недостатньо вивченими, а їх розуміння необхідне для вирішення екологічних проблем<sup>3</sup>. Зважаючи на воєнні дії в Україні забруднення ґрунтів PFAS є особливо актуальним.

Мета цього дослідження полягала в проведенні аналізу та узагальненні сучасних наукових даних щодо екологічних ризиків забруднення ґрунтів PFAS, необхідних для проведення екологічного моніторингу та прийняття ефективних рішень з рекультиватії забруднених ґрунтів.

Для досягнення поставленої мети сформовані такі завдання:

1) описати основні фізико-хімічні характеристики PFAS, які впливають на їхню поведінку в ґрунті;

2) визначити основні джерела забруднення ґрунтів PFAS;

3) проаналізувати та узагальнити результати досліджень щодо поведінки PFAS у ґрунтах;

4) визначити екологічні ризики забруднення ґрунтів PFAS.

## **2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ**

В дослідженні використано комплексний методологічний підхід, що базується на поєднанні системно-екологічного й аналітико-узагальнювального аналізу сучасного масиву фундаментальних і прикладних наукових досліджень. Збір первинної наукової інформації здійснювався шляхом цілеспрямованого пошуку у провідних міжнародних реферативних базах даних ScienceDirect

---

<sup>1</sup> M. L. Brusseau, R. H. Anderson and B. Guo, 'PFAS Concentrations in Soils: Background Levels versus Contaminated Sites', *Science of the Total Environment*, vol. 740, 2020, 140017, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140017, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140017

<sup>2</sup> P. Narasimhappa, S. Singh, R. Varshney, V. Chauhan, R. Kour, P. C. Ramamurthy and N. Shehata, 'Environmental Behavior and Human Health Risks of PFAS: Occurrence, Toxicity, and State-of-the-Art Removal Approaches', *RSC Advances*, vol. 15, 2025, pp. 44555–44583, doi:10.1039/D5RA07672B

<sup>3</sup> M. Wei, Z. Chen, K. Yang, L. Cao, C. Qiu *et al.*, 'Global Ecological and Health Risks of PFAS in Surface Soil', *Environment International*, 2025, doi:10.1016/j.envint.2025.109925

(Elsevier) та Google Scholar. Основний акцент під час формування інформаційної бази було зроблено на нещодавніх публікаціях з журналів з високим імпаکت-фактором.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1 Загальна характеристика PFAS

PFAS визначають як речовини, що містять принаймні одну повністю фторовану метильну групу (-CF<sub>3</sub>) або метиленову групу (-CF<sub>2</sub>-) без будь-якого атома водню, хлору, бромю або йоду, приєднаного до неї<sup>4</sup>. Ці сполуки мають надзвичайно міцний зв'язок (C–F), який є одним із найсильніших в органічній хімії. Висока електронегативність Фтору призводить до сильної поляризації зв'язку C–F (≈485 кДж/моль) й обумовлює інертність молекули PFAS до термічного, хімічного та біологічного розкладання. Саме тому PFAS часто називають «вічними хімікатами» (*forever chemicals*), оскільки вони здатні тривалий час зберігатися у компонентах навколишнього середовища. Якщо атоми Карбону, за винятком тих, що входять до складу функціональної групи, повністю фторовані то ці сполуки належать до перфторалкільних речовин. Якщо ж лише частина атомів вуглецю зв'язана з фтором, такі сполуки класифікують як поліфторалкільні. У групі перфторалкільнів виділяють перфторалкільні кислоти (PFAA) серед яких важливими є перфторалкілсульфонові кислоти (PFSA) та перфторалкілкарбонові кислоти (PFCA), структурні формули яких показано на рис.1<sup>5</sup>.

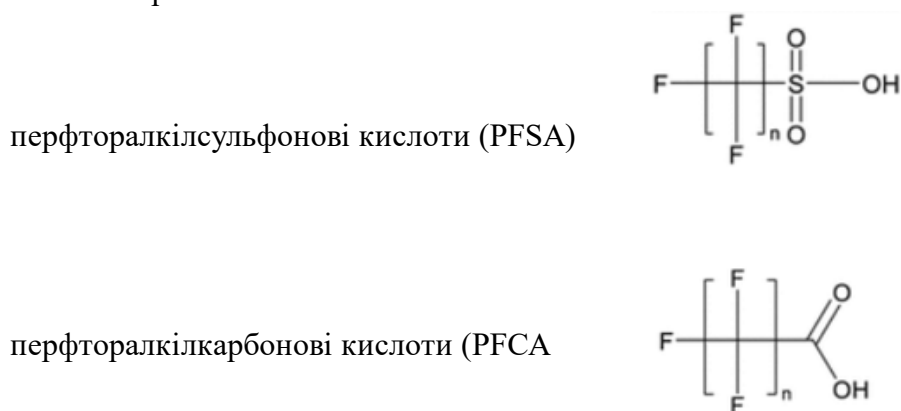


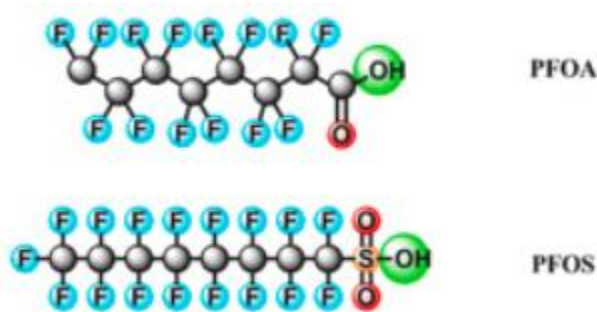
Рисунок 1. Структурні формули перфторалкільних кислот

За довжиною карбонового ланцюга PFAA поділяють на довголанцюгові (C<sub>8</sub>) та коротколанцюгові сполуки (C<sub>6</sub>). Серед довголанцюгових найбільш поширені перфтороктансульфорова кислота (C<sub>8</sub>F<sub>15</sub>SO<sub>3</sub>-, PFOS) та перфтороктанова кислота (C<sub>7</sub>F<sub>15</sub>COOH, PFOA) (рис. 2). Зараз довголанцюгові PFAS активно замінюють коротколанцюговими аналогами, проте сучасні дослідження показують, що такі сполуки також становлять суттєву екологічну загрозу через їх підвищену мобільність у ґрунтах та водному середовищі<sup>6</sup>.

<sup>4</sup> 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), doi:10.1787/e458e796-en

<sup>5</sup> 3. B. Güzel, 'Recent Advancements on Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in the Environment for Human Health: A Comprehensive Review', *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 236, no. 526, 2025, doi:10.1007/s11270-025-08174-w

<sup>6</sup> R. Napoli, F. Fazzino, F. G. A. Vagliasindi and P. P. Falciglia, 'Sustainable Remediation Strategies and Technologies of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)-Contaminated Soils: A Critical Review', *Sustainability*, vol. 17, no. 14, 2025, 6635, doi:10.3390/su17146635



**Рисунок 2.** Структурні формули перфтороктанової (PFOA) та перфтороктансульфонової (PFOS) кислот

Поєднання коротких або довгих фторованих карбонових ланцюгів із полярними функціональними групами зумовлює амфіфільну природу PFAA. Гідрофобність цих сполук визначається аліфатичним ланцюгом і значною мірою залежить від його довжини: зі скороченням довжини розчинність сполук у воді зростає. Головні функціональні групи мають гідрофільні властивості<sup>7</sup>.

Особливу групу PFAS становлять прекурсори, які здатні трансформуватися в навколишньому середовищі або в організмах у стійкі PFAA, зокрема PFOA та PFOS. До таких речовин належать фтортеломерні спирти, поліфторалкільні фосфатні естери та інші фторовані поверхнево-активні сполуки, які широко використовуються у виробництві текстилю, пакувальних матеріалів, пожежних пін та промислових покриттів<sup>8</sup>.

### 3.2. Основні джерела забруднення ґрунтів PFAS

Забруднення ґрунтів PFAS формується під впливом як прямих (точкових і дифузних), так і опосередкованих джерел антропогенного походження.

Промислові викиди PFAS при виробництві фторполімерів належать до основних джерел локального забруднення ґрунтів. Фторполімери широко використовуються в різних секторах економіки. Дослідження свідчать, що поблизу промислових зон таких виробництв концентрації PFAS у ґрунтах значно перевищують фонові значення<sup>9</sup>.

Іншим потужним точковим джерелом забруднення PFAS є вогнегасні піни типу AFFF (*aqueous film-forming foam*), які використовуються для гасіння пожеж класу В, спричинених рідинами на основі вуглеводнів. PFAS у складі AFFF забезпечують стабільність піни та утворення водяної плівки між палаючим матеріалом та піною, запобігаючи повторному займанню. AFFF випускають різні виробники, а їх рецептури відрізняються складом. Використання AFFF як у звичайних тренуваннях з пожежогасіння, так і під час аварійного пожежогасіння може спричинити забруднення ґрунтів PFAS. Аномально високі рівні накопичення PFAS фіксуються в ґрунтах навколо військових баз, аеродромів та інших місць зберігання і випробування протипожежних засобів. Навіть одноразові

<sup>7</sup> E. Gagliano, M. Sgroi, P. P. Falciglia, F. G. Vagliasindi and P. Roccaro, 'Removal of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFAS) from Water by Adsorption: Role of PFAS Chain Length, Effect of Organic Matter and Challenges in Adsorbent Regeneration', *Water Research*, vol. 171, 2020, 115381, doi:10.1016/j.watres.2019.115381

<sup>8</sup> R. C. Buck, J. Franklin, U. Berger, J. M. Conder, I. T. Cousins, P. de Voogt, A. A. Jensen, K. Kannan, S. A. Mabury and S. P. J. van Leeuwen, 'Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins', *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 17, no. 1, 2021, pp. 9–21, doi:10.1002/ieam.4459.

<sup>9</sup> A. J. Miller, K. Kleemann, J. Glüge, R. Lohmann, I. T. Cousins, D. Herzke, M. F. Miller, A. Rensmo, X. Trier, Z. Wang and M. Scheringer, 'Global Inventory of Fluoropolymer Production Plants and Their Associated PFAS Environmental Contamination', *Environmental Science & Technology*, vol. 60, no. 15, 2026, pp. 11688–11701, doi:10.1021/acs.est.5c18001.

масштабні інциденти, такі як ліквідація великих пожеж, призводять до довгострокового забруднення прилеглих територій широким спектром сполук PFAS<sup>10</sup>. В умовах воєнних дій ризики забруднення ґрунтів PFAS від використання AFFF суттєво зростають<sup>11</sup>. У перші місяці збройної агресії РФ проти України через ракетні обстріли виникли масштабні пожежі на нафтобазах, складах паливно-мастильних матеріалів та промислових об'єктах, для ліквідації яких застосовували значні обсяги вогнегасних пін типу AFFF<sup>12</sup>.

Одним із найважливіших дифузних джерел забруднення ґрунтів PFAS в агроєкосистемах є повторне використання очищених стічних вод і внесення мулових осадів у якості органічних добрив. Сучасні технології очищення стічних вод не забезпечують повного видалення PFAS. Під час технологічних процесів очищення спостерігається фазовий розподіл PFAS: коротколанцюгові сполуки переважно залишаються у водній фазі, тоді як довголанцюгові активно акумулюються в мулових осадах<sup>13</sup>. Використання очищених стічних вод для інтенсивного зрошення в аграрному секторі призводить до постійного штучного внесення PFAS у ґрунтові профілі. Паралельно з цим, активний мул від очищення стічних вод масово переробляється на біотверді органічні добрива завдяки високому вмісту поживних елементів. У багатьох країнах світу саме внесення осадів стічних вод розглядається як один із головних шляхів поширення PFAS у сільськогосподарських угіддях<sup>14</sup>. Додатковим джерелом забруднення сільськогосподарських ґрунтів є безпосереднє застосування фторвмісних продуктів у технологіях рослинництва. У сільському господарстві фторовані агрохімікати, демонструють посилену гербіцидну, фунгіцидну та інсектицидну активність, сприяючи покращенню захисту врожаю та врожайності. Окремі класи пестицидів та засобів захисту рослин містять компоненти PFAS, які потрапляють у ґрунт під час обробок. Наразі засоби захисту рослин ідентифіковані як значуще джерело надходження прекурсорів PFAS у підземні води країн Європи, США та Китаю<sup>15</sup>.

Важливим шляхом глобального поширення PFAS у ґрунтах є атмосферне перенесення. Леткі прекурсори PFAS можуть транспортуватися повітряними масами на великі відстані, після чого осаджуються разом із дощем, снігом або пилом. Завдяки цьому PFAS виявляються навіть у віддалених природних регіонах, де відсутні локальні джерела забруднення. Атмосферне осадження сприяє формуванню фонових концентрацій PFAS у ґрунтах і є важливим чинником їх глобального розповсюдження<sup>16</sup>.

Звалища та полігони побутових відходів є також активними вторинними джерелами поширення PFAS у довкілля. Утилізація побутових відходів, які містять PFAS (текстильні

---

<sup>10</sup> M. Schüßler, C. Capitain, B. Bugsel, J. Zweigle and C. Zwiener, 'Non-Target Screening Reveals 124 PFAS at an AFFF-Impacted Field Site in Germany Specified by Novel Systematic Terminology', *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 417, no. 27, 2025, pp. 6049–6064, doi:10.1007/s00216-024-05611-3.

<sup>11</sup> Н. Я. Смолій, Н. М. Гринчишин, Екологічні ризики та наслідки використання вогнегасних пін AFFF в умовах російської збройної агресії проти України, *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, vol. 33, 2026, pp. 83–92, <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20784643.33.2026.07>.

<sup>12</sup> Н. М. Гринчишин, 'Екологічні збитки внаслідок збройної агресії Російської Федерації та їх оцінювання державною екологічною інспекцією України', *Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 36, no. 2, 2026, pp. 94–101, <https://doi.org/10.36930/40360210>.

<sup>13</sup> E. Tavasoli, J. L. Luck, J. P. Malley Jr. and P. J. Mouser, 'Distribution and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Wastewater Treatment Facilities', *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 23, no. 6, 2021, pp. 903–913, doi:10.1039/D1EM00032B.

<sup>14</sup> M. I. Usman and C. Tizaoui, 'A Critical Review of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Wastewater Biosolids and Sludge', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 13, no. 6, 2025, 120422, doi:10.1016/j.jece.2025.120422.

<sup>15</sup> H. Joerss, F. Freeling, S. van Leeuwen, J. Hollender, X. Liu, K. Nödler, Z. Wang, B. Yu, D. Zahn and G. Sigmund, 'Pesticides Can Be a Substantial Source of Trifluoroacetate (TFA) to Water Resources', *Environment International*, vol. 193, 2024, 109061, doi:10.1016/j.envint.2024.109061.

<sup>16</sup> I. T. Cousins, J. H. Johansson, M. E. Salter, B. Sha and M. Scheringer, 'Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)', *Environmental Science & Technology*, vol. 56, no. 16, 2022, pp. 11172–11179, doi:10.1021/acs.est.2c02765.

матеріали, килимові покриття, водо- і жиростійка харчова упаковка, паперові вироби зі спеціальними просоченнями, електроніка, засоби особистої гігієни та інші товари широкого вжитку) супроводжується поступовим вивільнення цих сполук. Водорозчинні форми PFAS, які накопичуються у фільтраті, у випадку пошкодження протифільтраційних екранів створюють пряму загрозу для прилеглих ґрунтів. Водночас леткі сполуки-прекурсори, як фтортеломерні спирти, дифундують у звалищний газ та за відсутності систем дегазації потрапляють в атмосферу. В атмосферному повітрі ці речовини трансформуються і повертаються в ґрунт шляхом сухого та вологого осадження. Окрім того, анаеробні умови всередині полігонів стимулюють як абіотичні (термічні), так і біотичні (мікробні) процеси перетворення складних прекурсорів у стабільні форми PFAS<sup>17</sup>. Такі різні шляхи міграції зумовлюють високі концентрації PFAS у ґрунтах навколо звалищ. Зважаючи на те, що полігони часто межують із землями сільськогосподарського призначення, виникають суттєві ризики для трофічних ланцюгів. Зокрема, доведено факти значного накопичення PFAS у плодоовочевій продукції (на прикладі капусти), вирощеній у радіусі до 5 км від звалища, із піковими концентраціями в межах 1,5 км<sup>18</sup>.

### **3.3. Поведінка PFAS у ґрунті**

Сорбція є основним процесом, що контролює міграцію та просторовий розподіл PFAS у ґрунтовому профілі. Завдяки наявності як гідрофобних, так і гідрофільних фрагментів в одній молекулярній структурі, PFAS можуть взаємодіяти з різними компонентами ґрунту та можуть бути іммобілізовані шляхом гідрофобної або електростатичної взаємодії<sup>19</sup>.

Гідрофобна взаємодія PFAS пов'язана з органічною речовиною ґрунту. Під час цього процесу неполярні фторовані хвости молекул PFAS відштовхуються від водної фази ґрунтового розчину і взаємодіють з гідрофобними ділянками органічної речовини ґрунту (гуміновими та фульвокислотами, нерозчинним органічним вуглецем ґрунту). Ефективність цього процесу прямо пропорційна довжині фторованого карбонового ланцюга сполуки: довголанцюгові сполуки демонструють вищу спорідненість до органічної речовини ґрунту, натомість коротколанцюгові PFAS характеризуються слабшою сорбцією<sup>20</sup>. Зростання вмісту органічного вуглецю корелює зі зменшенням вертикальної міграції PFAS і підвищенням їх акумуляції у верхніх горизонтах ґрунту<sup>21</sup>.

Електростатичні (іонні) взаємодії відбуваються між основними функціональними групами PFAS та мінеральними компонентами ґрунту. В багатих на мінерали ґрунтах, аніонні та катіонні PFAS адсорбуються на протилежно заряджених мінеральних поверхнях. Ця адсорбція регулюється рН ґрунту. За типових для більшості ґрунтів значень рН, PFCA та PFSA перебувають у повністю дисоційованій (аніонній) формі. В таких умовах головні групи молекул PFAS здатні електростатично притягуватися до позитивно заряджених поверхонь ґрунтових мінералів – оксидів

---

<sup>17</sup> T. Tolaymat, N. Robey, M. Krause, J. Larson, K. Weitz, S. Parvathikar, L. Phelps, W. Linak, S. Burden, T. Speth and J. Krug, 'A Critical Review of PFAS Landfill Disposal in the United States', *Science of the Total Environment*, vol. 905, 2023, 167185, doi:10.1016/j.scitotenv.2023.167185.

<sup>18</sup> Huang, X., Wei, X., Liu, H., Li, W., Shi, D., Qian, S. *et al.*, 'Occurrence of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Municipal Solid Waste Landfill Leachates from Western China', *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 46, 2022, pp. 69588–69598, doi:10.1007/s11356-022-20754-5.

<sup>19</sup> B. Xu, S. Liu, J. L. Zhou, C. Zheng, W. Jin, B. Chen, T. Zhang and W. Qiu, 'PFAS and Their Substitutes in Groundwater: Occurrence, Transformation and Remediation', *Journal of Hazardous Materials*, vol. 412, 2021, 125159, doi:10.1016/j.jhazmat.2021.125159.

<sup>20</sup> S. Hazrati, J. Kumpiene, T. Leiviskä, T., and Carabante, J., 'Reciprocal Influence of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) and Soil Organic Matter on Their Fate in Soils', *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 32, 2025, pp. 23265–23277, doi: 10.1007/s11356-025-37024-9.

<sup>21</sup> A. Dhulia, C. Abou-Khalil, J. Kewalramani, D. Sarkar and M. C. Boufadel, 'Mobilization of Per- and Poly-Fluoroalkyl Substances (PFAS) in Soils with Different Organic Matter Contents', *Chemosphere*, vol. 361, 2024, 142503, doi:10.1016/j.chemosphere.2024.

та гідроксидів заліза, алюмінію та марганцю. Електростатична адсорбція може виступати важливим механізмом утримання коротколанцюгових PFAS у ґрунтах<sup>22</sup>.

Адсорбційна здатність PFAS на межі тверда фаза-вода впливає на їх міграцію та накопичення. Оскільки PFAS є поверхнево-активними речовинами (ПАР), за умов неповної вологоємності ґрунту (у зоні аерації) значна частина молекул концентрується на межі розділу між ґрунтовою вологою та повітряними порами. Це створює додатковий резервуар затримки забруднювачів. Загалом, основні фактори, що впливають на адсорбцію на цій межі, можна згрупувати у дві категорії: властивості молекули PFAS та фізико-хімічні властивості ґрунту.

Адсорбційні властивості PFAS залежать від довжини карбонового ланцюга та типу основної функціональної групи. Довголанцюгові сполуки демонструють вищу спорідненість до органічної речовини ґрунту, що зумовлено гідрофобними взаємодіями. Вони міцно утримуються у верхніх гумусових горизонтах ґрунту і мігрують повільно. Натомість коротколанцюгові PFAS характеризуються слабшою сорбцією і, відповідно, більшою мобільністю у ґрунтовому профілі. Вони швидко вимиваються атмосферними опадами у глибші шари і досягають ґрунтових вод за короткі проміжки часу. За однакової кількості атомів карбону перфторсульфонати (PFSA) сорбуються сильніше, ніж перфторкарбонати (PFCA), що зумовлено більшим розміром та вищою щільністю заряду сульфонатної групи<sup>23</sup>.

Основними фізико-хімічними властивостями ґрунту, що впливають на сорбційну здатність PFAS, є вміст органічної речовини, рН ґрунтового розчину та гранулометричний склад.

Вміст органічного вуглецю є головним чинником, що лімітує рухливість довголанцюгових сполук. У піщаних ґрунтах із низьким вмістом гумусу міграція всіх класів PFAS відбувається майже безперешкодно.

Зниження рН ґрунтового розчину призводить до протонування оксидів заліза та алюмінію, збільшуючи позитивний заряд поверхні мінералів, що сприяє посиленню сорбції аніонних форм PFAS. У нейтральних та лужних ґрунтах, навпаки, сорбція послаблюється й спостерігається зростання рухливості цих сполук, що збільшує ризик їх вимивання у підземні води<sup>24</sup>. Крім того, рН впливає на мікробіологічну активність ґрунту та процеси трансформації окремих попередників PFAS. Хоча більшість PFAS є стійкими до біологічного розкладу, деякі прекурсори можуть трансформуватися у більш стабільні сполуки залежно від кислотно-лужних умов середовища<sup>25</sup>.

Гранулометричний склад ґрунту визначає площу поверхні мінеральних частинок, пористість і водопроникність ґрунтового середовища, що безпосередньо впливає на міграцію PFAS. Ґрунти з високим вмістом глинистих і пилуватих фракцій характеризуються більшою сорбційною здатністю порівняно з піщаними ґрунтами. Глинисті мінерали мають значну питому поверхню та високу катіонно-обмінну здатність, завдяки чому здатні ефективніше утримувати PFAS. Особливе значення гранулометричний склад має для поширення коротколанцюгових PFAS, які є більш

---

<sup>22</sup> P. Kumar, A. Sharma and R. Singh, 'A Critical Review on Occurrence, Speciation, Mobilization, and Toxicity of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in the Soil-Microbe-Plant System and Bioremediation Strategies', *Journal of Hazardous Materials*, vol. 494, 2025, 138743, doi:10.1016/j.jhazmat.2025.138743.

<sup>23</sup> M. Han, C. Qin and Y. Gao, 'Sources and Transport of Per- and Polyfluoroalkyl Substance (PFAS) in Agricultural Soil-Plant Systems', *New Contaminants*, vol. 1, 2025, e005, doi:10.48130/newcontam-0025-0007.

<sup>24</sup> M. L. Brusseau, 'Differential Sorption of Short-Chain versus Long-Chain Anionic Per- and Polyfluoroalkyl Substances by Soils', *Environments*, vol. 10, no. 10, 2023, 175, doi:10.3390/environments10100175.

<sup>25</sup> X. Li, Y. Zhao, H. Wang and J. Chen, 'Occurrence, Fate, and Remediation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Soils: A Review', *Current Opinion in Environmental Science & Health*, vol. 34, 2023, 100487, doi:10.1016/j.coesh.2023.100487.

мобільними та менш схильними до сорбції. У легких піщаних ґрунтах вони можуть швидко мігрувати на значні глибини, створюючи ризики забруднення водоносних горизонтів<sup>26</sup>.

Встановлено вплив PFAS на формування водостійких агрегатів ґрунту, що може впливати на фізичні властивості ґрунтів і зниження їх родючості<sup>27</sup>.

Таким чином, поведінка PFAS у ґрунті є складною та визначається комплексом взаємодій. Розуміння цих процесів є необхідною умовою для оцінки екологічних ризиків.

### **3.4. Екологічні ризики забруднення ґрунтів PFAS**

#### **3.4.1. Ризики для ґрунтової мікробіоти та ферментативної активності**

PFAS впливають на видовий склад і різноманіття мікроорганізмів. За умов тривалого забруднення ґрунтів PFAS спостерігається зменшення мікробного біорізноманіття та зміна домінуючих таксонів у ґрунті. Встановлено, що ступінь негативного впливу залежить від довжини карбонового ланцюга й функціональної групи PFAS та фізико-хімічних властивостей ґрунту. Зокрема, сполуки із довшим ланцюгом та сульфонатною групою характеризуються вищою токсичністю щодо ґрунтових мікроорганізмів<sup>28</sup>. Найбільш чутливими до впливу PFAS є бактеріальні спільноти, тоді як грибні організми часто демонструють вищу стійкість до забруднення<sup>29</sup>.

Ґрунтові ферменти беруть участь у біохімічних реакціях, пов'язаних з кругообігом поживних речовин та розкладанням органічних сполук, включаючи детоксикацію ксенобіотиків. Активність ферментів дуже чутлива до забруднення. Дослідження показують, що PFAS здатні пригнічувати активність ґрунтових ферментів, зокрема уреази, лужної фосфатази та дегідрогенази, які є важливими індикаторами біологічної активності ґрунту. Внаслідок цього сповільнюються процеси розкладання органічних речовин і порушується трансформація поживних елементів<sup>30</sup>.

#### **3.4.2. Ризики для вищих рослин і фітотоксичність**

Особливий екологічний ризик забруднення ґрунтів PFAS пов'язаний із їх здатністю накопичуватися в рослинах. Розчинені у ґрунті PFAS поглинаються корінням рослин. Механізми поглинання ксенобіотиків рослинами регулюється довжиною карбонового ланцюга. Коротколанцюгові PFAS через високу водорозчинність та слабку сорбцію ґрунтом легко поглинаються корінням і разом із водою пасивно транспортуються ксилемою в надземну частину рослин – листя, стебла, плоди та зерно. Довголанцюгові PFAS міцно зв'язуються з ліпідами та білками кореневої системи, тому їх транслокація у вегетативні органи є обмеженою, проте вони викликають локальні ураження корневих тканин. Акумуляція PFAS у сільськогосподарських культурах створює прямі ризики для здоров'я людини через харчові ланцюги<sup>31</sup>.

PFAS рідко призводять до очевидних фенотипових/фізіологічних пошкоджень у рослин, але помітно порушують деякі біологічні процеси на біохімічному та молекулярному рівнях. Вплив ПФАР індукує надмірне утворення активних форм кисню і додатково пошкоджує структуру

---

<sup>26</sup> K. Rankin, S. A. Mabury, T. M. Jenkins and J. W. Washington, 'A North American and Global Survey of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils: Distribution Patterns and Mode of Occurrence', *Chemosphere*, vol. 264, 2021, 128453, doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128453

<sup>27</sup> B. Xu, G. Yang, A. Lehmann, S. Riedel and M. C. Rillig, 'Effects of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) on Soil Structure and Function', *Soil Ecology Letters*, vol. 5, no. 1, 2022, pp. 108–117, doi:10.1007/s42832-022-0143-5.

<sup>28</sup> Y. Cai, H. Chen, R. Yuan, F. Wang, Z. Chen and B. Zhou, 'Toxicity of Perfluorinated Compounds to Soil Microbial Activity: Effect of Carbon Chain Length, Functional Group and Soil Properties', *Science of the Total Environment*, vol. 690, 2019, pp. 1162–1169, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.440.

<sup>29</sup> C. Samarasinghe, M. M. Bahar, F. Qi, K. Yan, Y. Liu and R. Naidu, 'Evaluating PFHxS Toxicity to Invertebrates and Microbial Processes in Soil', *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, vol. 5, 2023, pp. 120–128, doi:10.1016/j.enceco.2023.03.003.

<sup>30</sup> Y. Wang, Y. Li, G. Zhao and L. Chen, 'Effect of Perfluorooctanoic Acid on Microbial Activity in Wheat Soil under Different Fertilization Conditions', *Environmental Pollution*, vol. 264, 2020, 114784, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114784

<sup>31</sup> M. Han, C. Qin and Y. Gao, 'Sources and Transport of Per- and Polyfluoroalkyl Substance (PFAS) in Agricultural Soil-Plant Systems', *New Contaminants*, vol. 1, 2025, article e005, doi:10.48130/newcontam-0025-0007.

рослинних клітин та функції органел. Порушується ряд біохімічних процесів у рослинних клітинах, таких як фотосинтез, експресія генів, синтез білка, вуглецевий та азотний метаболізм<sup>32</sup>.

### **3.4.3. Ризики для ґрунтових безхребетних**

Серед ґрунтових безхребетних особливо чутливими до впливу PFAS є дощові черв'яки, які виконують важливі функції у процесах ґрунтоутворення, розкладу органічної речовини та кругообігу поживних елементів. Дослідження свідчать, що накопичення PFAS у ґрунті може негативно впливати на виживання, ріст, репродуктивну функцію та метаболічну активність цих організмів. Зокрема, вплив PFOS та PFOA асоціюється зі зниженням приросту біомаси дощових черв'яків, порушенням репродуктивних процесів, підвищенням рівня оксидативного стресу та змінами активності антиоксидантних ферментів. Встановлено також, що високі концентрації PFAS можуть спричиняти пошкодження ДНК, порушення енергетичного обміну та метаболічних процесів у тканинах безхребетних. Такі зміни можуть мати суттєві екологічні наслідки, оскільки погіршення стану ґрунтової фауни призводить до зниження біологічної активності ґрунту, порушення трофічних зв'язків та погіршення функціонування ґрунтових екосистем загалом<sup>33</sup>.

### **3.4.4. Ризики включення в наземні харчові ланцюги**

PFAS поглинаються рослинами з ґрунту та біоакумулюються в різних органах. Подальше споживання забруднених рослин травоядними тваринами сприяє перенесенню цих сполук на вищі трофічні рівні, де відбувається їх накопичення в тканинах організмів. Дослідження свідчать, що коротколанцюгові PFAS характеризуються високою рухливістю у системі «ґрунт–рослина», тоді як довголанцюгові сполуки більшою мірою акумулюються в коренях рослин та організмах тварин. Надходження PFAS до харчових продуктів рослинного і тваринного походження створює потенційні ризики для здоров'я людини. У зв'язку з цим міграція PFAS у наземних харчових ланцюгах розглядається як один із ключових шляхів довготривалого впливу цих забруднювачів на екосистеми та здоров'я населення<sup>34</sup>.

### **3.4.5. Ризики вторинного забруднення гідросфери**

ґрунт рідко виступає кінцевим депо PFAS; частіше він виконує роль довготривалого джерела емісії. Через атмосферні опади або штучне зрошення відбувається вимивання PFAS у глибші горизонти. Особливо високий ризик вимивання характерний для легких піщаних ґрунтів із низьким вмістом гумусу, де гідрофобне утримування молекул мінімальне. Потрапляючи у водоносні горизонти PFAS формують шлейфи забруднення підземних вод, які можуть поширюватися на кілометри від первинного джерела, створюючи масштабну загрозу для джерел питного водопостачання і водних екосистем.

## **4. ВИСНОВКИ**

Проведено комплексне теоретичне узагальнення екологічних ризиків, пов'язаних із забрудненням ґрунтів PFAS. За результатами дослідження сформульовано такі висновки:

1. Виняткова стабільність PFAS зумовлена міцністю зв'язку карбон–фтор. Амфифільність молекул визначає подвійну поведінку: гідрофобний ланцюг забезпечує сорбцію ґрунтом, а

---

<sup>32</sup> J. Li, J. Sun and P. Li, 'Exposure Routes, Bioaccumulation and Toxic Effects of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) on Plants: A Critical Review', *Environment International*, vol. 158, 2022, article 106891, doi:10.1016/j.envint.2021.106891.

<sup>33</sup> M. Delor, L. Mamy, C. Bedos, P. Benoit and J. Barrere, 'Exposure of Earthworms to Perfluoroalkyl Substances (PFAS): Effects on Growth, Reproduction and Oxidative Stress', *Environmental Pollution*, vol. 335, 2023, article 122357, doi:10.1016/j.envpol.2023.122357.

<sup>34</sup> G. Jha, V. Kankarla, E. McLennon, S. Pal, D. Sih, B. Dari, D. Diaz and M. Nocco, 'Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Integrated Crop–Livestock Systems: Environmental Exposure and Human Health Risks', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 23, 2021, article 12550, doi:10.3390/ijerph182312550

гідрофільна група – розчинність у воді. Сучасні коротколанцюгові замінники є менш біоаккумулятивними, але значно мобільнішими, що прискорює їх поширення.

2. Основними точковими джерелами забруднення ґрунтів PFAS є викиди фторполімерних підприємств та застосування вогнегасних пін типу AFFF. Дифузне забруднення формується через внесення біоосадів стічних вод, використання фторованих пестицидів, атмосферне перенесення та фільтрати сміттєзвалищ.

3. Вертикальний рух PFAS контролюється сорбційними процесами. Довголанцюгові сполуки міцно зв'язуються з органічною речовиною у верхніх горизонтах. Коротколанцюгові фракції утримуються переважно через електростатичну адсорбцію на мінералах та на межі розділу «повітря-вода» в зоні аерації. Піщані ґрунти з низьким вмістом органіки сприяють швидкому вимиванню PFAS у підземні води.

4. Забруднення ґрунту PFAS чинить багатовекторний деструктивний вплив, зокрема впливає на мікробіоценози, пригнічує ферментативну активність, поглинається вищими рослинами та біоакмулюється в різних органах, негативно впливає на ґрунтову мезофауну. Водночас едафотоп функціонує як довготривале джерело емісії «вічних хімікатів», що призводить до формування стійких шлейфів забруднення підземних вод гідросфери та забезпечує безперешкодне надходження токсикантів у трофічні ланцюги за схемою «ґрунт–рослина/тварина–людина».

Результати дослідження є основою для вдосконалення екологічного моніторингу, розробки заходів рекультивациі забруднених територій в Україні.