Валерій Капустник

НОВІ ТА ЕМЕРДЖЕНТНІ ПРОФЕСІЙНІ ЗАХВОРЮВАННЯ В УМОВАХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І КЛІМАТИЧНИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ:

виробничі експозиції, механізми патології та профілактика

Монографія

Видавничий дім «Інтернаука»
Київ 2026

Капустник Валерій

НОВІ ТА ЕМЕРДЖЕНТНІ ПРОФЕСІЙНІ ЗАХВОРЮВАННЯ В УМОВАХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І КЛІМАТИЧНИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ: виробничі експозиції, механізми патології та профілактика

Монографія

Видавничий дім «Інтернаука»
Київ 2026

DOI: 10.25313/2026-10-154

Капустник В.
Нові та емерджентні професійні захворювання в умовах технологічних і кліматичних трансформацій: виробничі експозиції, механізми патології та профілактика: монографія — Київ: Видавничий дім «Інтернаука», 2026. — 124 с.

У монографії розглянуто нові та емерджентні професійні ризики, сучасні виробничі агенти, можливі механізми їхнього впливу на організм, роль комбінованих експозицій і мультиморбідності, а також підходи до раннього виявлення патології та профілактики. Окрему увагу приділено межам наявних наукових доказів і необхідності розмежовувати потенційну небезпеку, фактичну експозицію та доведений причинний зв'язок із захворюванням.

Видання адресоване лікарям-профпатологам, фахівцям із гігієни праці, лікарям інших спеціальностей, науковцям, викладачам і здобувачам медичної освіти, а також фахівцям, які займаються оцінюванням і попередженням професійних ризиків.

© Капустник В., 2026
© Видавничий дім «Інтернаука», 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА **7**
ВСТУП **8**

Розділ 1. ЕВОЛЮЦІЯ ПРОФЕСІЙНОЇ ПАТОЛОГІЇ ТА КОНЦЕПЦІЯ ЕМЕРДЖЕНТНИХ ПРОФЕСІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ **11**
1.1. Історична трансформація структури професійної патології ... 11
1.2. Поняття нових та емерджентних професійних захворювань: термінологія, критерії й межі застосування 13
1.3. Вплив технологічних змін на формування нових професійних небезпек 17
1.4. Зміна структури зайнятості, старіння робочої сили та трансформація професійних ризиків 22
1.4.1. Старіння робочої сили та накопичення професійного навантаження 22
1.4.2. Нестандартна зайнятість і нерівномірний розподіл професійних ризиків 24
1.4.3. Взаємодія демографічних змін і нових форм зайнятості ... 25
1.5. Методологічні підходи до виявлення нових професійних ризиків і оцінювання доказів 27

РОЗДІЛ 2. НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ВИРОБНИЧІ АГЕНТИ: ФОРМУВАННЯ НОВИХ ПРОФІЛІВ ПРОФЕСІЙНОГО РИЗИКУ **35**
2.1. Наноматеріали та передові матеріали: особливості професійної експозиції й оцінювання ризику 35
2.1.1. Характеристики наноматеріалів, що мають значення для професійного здоров'я 36
2.1.2. Виробничі процеси та шляхи експозиції 37
2.1.3. Проблеми вимірювання та інтерпретації експозиції 38
2.1.4. Профілактика експозиції наноматеріалів 39

2.2. Мікроелектроніка, адитивне виробництво та нові технологічні процеси 41
2.2.1. Мікроелектроніка та виробництво напівпровідників 42
2.2.2. Адитивне виробництво: від полімерного друку до металевих порошків 44
2.2.3. Постоброблення, технічне обслуговування та комбіновані експозиції 45
2.2.4. Профілактичні підходи та значення для професійної медицини 48
2.3. Акумулятори, критична сировина та електронні відходи 49
2.3.1. Видобуток і первинне перероблення критичної сировини 50
2.3.2. Виробництво літій-іонних акумуляторів: метали, електроліти та комбінований вплив 51
2.3.3. Рециклінг акумуляторів і нові виробничі експозиції 53
2.3.4. Електронні відходи: металеві забруднювачі, продукти термічного розкладання та неформальна зайнятість 54
2.3.5. Порівняння експозицій у ланцюгу критичної сировини 56
2.3.6. Профілактика та завдання професійної медицини 57
2.4. Відновлювана енергетика, циркулярна економіка та ризики зеленого переходу 59
2.4.1. Вітроенергетика: виробництво, монтаж та обслуговування установок 61
2.4.2. Сонячна енергетика: монтаж, експлуатація та завершення життєвого циклу панелей 62
2.4.3. Біоенергетика та інші технології циркулярної економіки 64
2.4.4. Психосоціальні та організаційні ризики «зелених» професій 66
2.4.5. Профілактика ризиків упродовж життєвого циклу технології 67
2.5. Біотехнології та нові біологічні агенти 70
2.5.1. Біофармацевтичне виробництво та нові терапевтичні продукти 72
2.5.2. Генетично модифіковані організми, вірусні вектори та клітинні технології 73

2.5.3. Лабораторні дослідження та біологічні небезпеки поза біотехнологічними підприємствами 74
2.5.4. Біоаерозолі, ендотоксини та сенсибілізувальні біологічні компоненти 76
2.5.5. Оцінювання біологічного ризику: від властивостей агента до реальної експозиції 77
2.5.6. Профілактика та організація професійно-медичного нагляду 78

РОЗДІЛ 3. КЛІМАТИЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЯК ЧИННИКИ ПРОФЕСІЙНОЇ ПАТОЛОГІЇ 83
3.1. Тепловий стрес і професійне здоров'я в умовах потепління клімату 84
3.2. Ультрафіолетове випромінювання та зміна умов роботи на відкритому повітрі 86
3.3. Забруднення повітря, дим від ландшафтних пожеж і професійні респіраторні ризики 87
3.4. Екстремальні погодні явища, травматизм і психосоціальні наслідки 88
3.5. Біологічні ризики, векторні захворювання та зміна екологічних умов 90
3.6. Комбіновані кліматично зумовлені експозиції та профілактика 91

РОЗДІЛ 4. КОМБІНОВАНІ ЕКСПОЗИЦІЇ, МЕХАНІЗМИ ПАТОЛОГІЇ ТА МУЛЬТИМОРБІДНІСТЬ 95
4.1. Від ізольованого чинника до сукупного профілю професійного ризику 95
4.2. Основні механізми взаємодії експозицій 96
4.3. Професійний експозом і накопичення впливів упродовж життя 97
4.4. Мультиморбідність і зниження фізіологічного резерву 99
4.5. Від оцінки окремих небезпек до інтегрованої профілактики 100

РОЗДІЛ 5. ПРОФІЛАКТИКА ЕМЕРДЖЕНТНИХ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ І ТРАНСФОРМАЦІЯ СИСТЕМ ПРОФЕСІЙНОЇ МЕДИЦИНИ 104

5.1. Випереджувальна профілактика в умовах технологічних і кліматичних змін 104

5.2. Ієрархія контролю небезпек і контроль на джерелі 105

5.3. Раннє виявлення, професійний анамнез і медичне спостереження 107

5.4. Цифрові інструменти, штучний інтелект і межі автоматизованого нагляду 108

5.5. Професійна медицина як міждисциплінарна система 109

5.6. Оцінювання результативності та навчання системи на даних 110

ВИСНОВКИ 114

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 118

ПЕРЕДМОВА

Технологічні та кліматичні зміни впливають на умови праці, характер виробничих експозицій і підходи до збереження здоров'я працівників. Поява нових матеріалів і виробничих процесів, поширення цифрових систем, розвиток біотехнологій та відновлюваної енергетики змінюють структуру професійних небезпек. Водночас кліматичні трансформації посилюють значення окремих відомих чинників і створюють нові умови їхнього впливу.

Виявлення таких змін потребує систематичного оцінювання виробничих експозицій, аналізу можливих наслідків для здоров'я та вдосконалення профілактичних заходів. Особливої уваги потребують комбіновані впливи, тривалі латентні періоди, неповнота відомостей про попередні умови праці та труднощі встановлення професійного походження захворювань.

У монографії розглянуто нові та емерджентні професійні ризики, сучасні виробничі агенти, можливі механізми їхнього впливу на організм, роль комбінованих експозицій і мультиморбідності, а також підходи до раннього виявлення патології та профілактики. Окрему увагу приділено межам наявних наукових доказів і необхідності розмежовувати потенційну небезпеку, фактичну експозицію та доведений причинний зв'язок із захворюванням.

Видання адресоване лікарям-профпатологам, фахівцям із гігієни праці, лікарям інших спеціальностей, науковцям, викладачам і здобувачам медичної освіти, а також фахівцям, які займаються оцінюванням і попередженням професійних ризиків.

ВСТУП

Професійна патологія формується під впливом виробничих чинників, характер і значення яких змінюються разом із технологіями, організацією праці та станом довкілля. Поряд із традиційними професійними небезпеками зростає увага до експозицій, пов'язаних із наноматеріалами, адитивним виробництвом, акумуляторними технологіями, біотехнологіями, цифровізацією та кліматичними змінами. У частині цих напрямів уже накопичено дані про несприятливий вплив на здоров'я; в інших випадках доказова база залишається обмеженою й потребує подальшого дослідження.

Однією з основних проблем професійної медицини є своєчасне розпізнавання професійного походження захворювань. Клінічні прояви часто неспецифічні, контакт із небезпечними агентами може бути комбінованим, а інформація про попередні робочі місця, технологічні процеси та тривалість експозиції — неповною. Через це діагностичне обстеження не завжди охоплює систематичний аналіз професійного анамнезу й умов праці. Відсутність документованої експозиції не завжди означає, що відповідного впливу не було: дані могли не збиратися або не зберегтися.

Технологічні та кліматичні трансформації ускладнюють оцінювання професійного ризику. Зміна складу матеріалу, способу його оброблення, вентиляції, автоматизації чи організації робочого процесу може змінювати інтенсивність і шляхи надходження небезпечного агента. Окремого аналізу потребують очищення обладнання, технічне обслуговування, ремонт, поводження з відходами та аварійні операції. Саме в цих ситуаціях працівники можуть контактувати з речовинами або продуктами процесів, які не були належно враховані під час оцінювання штатного виробництва.

Кліматичні зміни також впливають на професійне здоров'я. Тепловий стрес, ультрафіолетове випромінювання, дим від

ландшафтних пожеж, екстремальні погодні явища та зміна умов поширення біологічних агентів створюють додаткові ризики для працівників на відкритому повітрі, аварійних бригад, сільськогосподарських працівників та інших професійних груп. Наслідки залежать від характеру роботи, тривалості контакту, організації робочого часу, доступності засобів захисту й можливості змінювати умови праці відповідно до рівня небезпеки.

Важливою особливістю сучасного виробничого середовища є поєднання різних експозицій. Хімічні, фізичні, біологічні, біомеханічні та психосоціальні чинники можуть діяти одночасно або послідовно. Їхні наслідки залежать від рівнів і тривалості впливу, часової послідовності, індивідуальних особливостей працівника та умов відновлення. Проте одночасна наявність кількох небезпек не є достатньою підставою для висновку про синергетичну взаємодію: характер такої взаємодії має підтверджуватися відповідними даними.

Мета монографії — узагальнити сучасні наукові дані про нові та емерджентні професійні ризики в умовах технологічних і кліматичних трансформацій, розглянути можливі механізми їхнього впливу на здоров'я та систематизувати обґрунтовані напрями профілактики.

Для досягнення цієї мети розглянуто еволюцію професійної патології та критерії визначення емерджентних ризиків; характеристики нових виробничих агентів і технологічних процесів; вплив кліматичних та екологічних змін; особливості комбінованих експозицій і мультиморбідності; підходи до раннього виявлення професійно зумовлених порушень здоров'я, контролю небезпек і вдосконалення систем професійної медицини.

Монографія побудована за логікою переходу від загальних принципів визначення й оцінювання професійних ризиків до аналізу конкретних експозицій, можливих патологічних наслідків і практичних заходів профілактики. У викладі розмежовано встановлені наукові факти, результати досліджень, що свідчать про асоціації, та питання, для яких доказів поки недостатньо. Такий підхід дає змогу не ототожнювати виявлення небезпечного чинника з доведеним професійним захворюванням

і водночас враховувати ризики, які потребують превентивних заходів до остаточного з'ясування всіх причинно-наслідкових зв'язків.

Практичне значення монографії полягає в систематизації підходів до оцінювання професійних експозицій, реконструкції професійного анамнезу, раннього виявлення патологічних змін і вибору профілактичних заходів з урахуванням конкретних умов праці. Для України ці питання мають особливе значення в контексті технологічної модернізації, відновлення інфраструктури, розвитку відновлюваної енергетики та адаптації до кліматичних змін.

Розділ 1.
ЕВОЛЮЦІЯ ПРОФЕСІЙНОЇ ПАТОЛОГІЇ ТА КОНЦЕПЦІЯ ЕМЕРДЖЕНТНИХ ПРОФЕСІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

1.1. Історична трансформація структури професійної патології

Професійна патологія сформувалася як галузь медицини, що досліджує зв'язок між умовами праці, виробничими експозиціями та порушеннями здоров'я. На ранніх етапах її розвитку основну увагу приділяли захворюванням, пов'язаним із вираженими й відносно специфічними виробничими впливами, зокрема гострим і хронічним отруєнням, пневмоконіозам, професійній приглухуватості та ураженням опорно-рухового апарату. Подальший розвиток промисловості, хімічних технологій, епідеміології та методів оцінювання експозиції розширив уявлення про професійно зумовлену патологію. До кола проблем професійної медицини увійшли захворювання з тривалим латентним періодом, багатофакторним походженням і менш очевидним зв'язком із конкретним виробничим чинником.

Сучасні зміни професійного середовища характеризуються не лише появою нових матеріалів і технологій, а й трансформацією вже відомих експозицій. Зміна фізико-хімічних властивостей матеріалу, способу його оброблення, масштабів виробництва, режиму вентиляції або організації робочого процесу може впливати на інтенсивність контакту, шлях надходження агента та тривалість впливу. Додаткове значення мають автоматизація, дистанційне управління, нові форми зайнятості й зміни кліматичних умов.

Огляд Lindholm, Reiman і Tappura, опублікований у 2024 році, виокремлює серед чинників формування нових та емерджентних професійних ризиків технологічні й матеріальні зміни,

кліматичні трансформації, зміни структури зайнятості та організації праці. Автори також наголошують, що частина проблем, які нині розглядають як емерджентні, має історичні аналоги. Новизна в таких випадках може полягати не в самому агенті, а в масштабі його використання, способі експозиції, поєднанні з іншими чинниками або контексті, в якому виникає ризик [1].

Для розвитку професійної медицини це має принципове значення. Поява нової технології сама по собі не доводить виникнення нового захворювання. Необхідно розрізняти щонайменше три ситуації: появу раніше невідомого небезпечного агента; зміну характеру або рівня експозиції до відомого агента; формування нового поєднання чинників, сумарний вплив яких не можна належно оцінити за результатами дослідження кожного компонента окремо. Кожна із цих ситуацій потребує відповідного дослідницького підходу.

Огляд Shekaftik та співавторів, опублікований у Science of the Total Environment у 2025 році, присвячений професійним небезпекам, пов'язаним із ключовими технологіями, зокрема мікро- й наноелектронікою, фотонікою, передовими матеріалами та біотехнологіями. Автори описують хімічні, фізичні, ергономічні й психосоціальні небезпеки, водночас відзначаючи неоднакову повноту наукових доказів для різних технологічних напрямів [2]. Це свідчить про необхідність диференційованого підходу: наявність переконливих даних щодо одного агента не дозволяє автоматично переносити висновки на інші матеріали, технологічні операції або професійні групи.

У сучасній профпатології важливо поєднувати клінічне оцінювання з аналізом виробничого середовища. Встановлення діагнозу не завжди завершує діагностичний процес: за підозри на професійне походження необхідно з'ясувати, які саме завдання виконував працівник, з якими матеріалами контактував, якими були тривалість і шляхи експозиції, чи змінювалися технологічні процеси та чи існували інші можливі джерела впливу. Якщо історичні дані відсутні, їхню реконструкцію слід здійснювати з використанням доступної документації, відомостей про технологію та інших джерел, чітко зазначаючи межі достовірності.

Отже, еволюція професійної патології полягає не лише в розширенні переліку відомих захворювань. Вона передбачає перехід до систематичного аналізу змін виробничих експозицій, раннього виявлення несприятливих сигналів і оцінювання доказів із урахуванням їхньої якості та невизначеності. Ця логіка визначає подальший розгляд термінології емерджентних професійних ризиків, критеріїв їх розпізнавання та меж застосування поняття «емерджентне професійне захворювання».

1.2. Поняття нових та емерджентних професійних захворювань: термінологія, критерії й межі застосування

У науковій літературі поняття new and emerging occupational risks охоплює нові та зростаючі професійні ризики, пов'язані зі змінами технологій, матеріалів, умов праці, структури зайнятості й наукових уявлень про небезпечні чинники. Lindholm та співавтори розглядають емерджентність як характеристику ризику, що може виникати внаслідок появи раніше невідомої небезпеки або зміни значущості вже відомої проблеми через збільшення експозиції, ймовірності несприятливого впливу чи тяжкості наслідків [1].

Для цілей цього дослідження важливо розмежувати професійну небезпеку, професійний ризик і професійне захворювання. Небезпека означає властивість агента, процесу або умови праці потенційно завдавати шкоди. Ризик характеризує ймовірність і тяжкість несприятливих наслідків за певних умов експозиції. Професійне захворювання є патологічним станом, причинний зв'язок якого з професійною діяльністю встановлюється на підставі відповідних клінічних, епідеміологічних, токсикологічних та інших доказів.

Змішування цих понять призводить до методологічної помилки: потенційна небезпека нового матеріалу може подаватися як уже доведена причина конкретного захворювання.

Натомість науково обґрунтований підхід передбачає послідовне оцінювання властивостей агента, фактичної експозиції, біологічної відповіді та доказів причинного зв'язку.

Огляд Shekaftik та співавторів, опублікований у Science of the Total Environment у 2025 році, демонструє неоднорідність доказової бази щодо технологічно зумовлених ризиків. У межах огляду 36 досліджень автори виявили різні групи небезпек, пов'язаних із мікро- та наноелектронікою, передовими матеріалами, фотонікою й біотехнологіями. Для наноматеріалів накопичено більше даних, ніж для деяких інших нових технологічних напрямів, проте це не означає однакового рівня визначеності щодо всіх матеріалів і сценаріїв експозиції [2].

Для опису таких явищ доцільно використовувати термін «емерджентні професійні ризики» — тобто ризики, які виникають або змінюють свій характер під впливом технологічних, кліматичних та організаційних змін. Термін «емерджентні професійні захворювання» варто застосовувати обережніше — лише тоді, коли з'являються нові дані про певні патологічні стани, їхній зв'язок із професійними впливами або особливості їх розвитку. Адже виявлення потенційного ризику ще не означає, що виникла нова форма захворювання.

З метою систематизації різних проявів емерджентності доцільно розмежувати нові виробничі агенти, зміну характеристик відомих експозицій, комбінований вплив чинників і технологічно зумовлені зміни робочого середовища. Такий підхід дає змогу визначити основні дослідницькі питання для кожної категорії небезпек (табл. 1).

Наведена систематизація відображає різні підстави для визнання професійної небезпеки емерджентною. В одних випадках ідеться про появу нового агента, властивості якого ще недостатньо вивчені; в інших — про зміну умов впливу відомих чинників або формування комбінованих експозицій. Відповідно, сам факт появи нової технології не свідчить про виникнення нового професійного захворювання. Для такого висновку необхідно встановити характер експозиції, оцінити біологічну

Таблиця 1

Типи емерджентних професійних небезпек і завдання їхнього дослідження

Тип небезпеки	Приклад трансформації	Основне дослідницьке питання
Новий виробничий агент	Новий матеріал або хімічна сполука	Які токсикологічні властивості та наслідки для здоров'я встановлено?
Нова форма відомого агента	Зміна дисперсності, розміру частинок або способу утворення аерозолю	Чи змінюються біодоступність, шлях надходження та характер біологічної відповіді?
Нова конфігурація експозицій	Одночасний вплив кількох фізичних або хімічних чинників	Чи підтверджено адитивний, синергічний або антагоністичний ефект?
Кліматично зумовлена небезпека	Збільшення тривалості та інтенсивності теплового навантаження	Які наслідки доведено та які групи працівників є вразливішими?
Технологічно змінене робоче середовище	Роботизація, нові матеріали, цифрове управління працею	Які нові ризики виникають і наскільки переконливі докази їхнього впливу на здоров'я?

Джерело: авторська концептуальна систематизація; приклади та критерії підлягають уточненню за результатами аналізу літератури.

правдоподібність несприятливого ефекту та проаналізувати докази причинного зв'язку з конкретним порушенням здоров'я.

Тому наступним етапом аналізу є розмежування категорій, які описують потенційну небезпеку, і категорій, що передбачають наявність доказів несприятливого впливу на здоров'я. Це розмежування має методологічне значення для оцінювання нових виробничих агентів, інтерпретації результатів досліджень і вибору профілактичних заходів (табл. 2).

Таблиця 2

Розмежування нових професійних небезпек, емерджентних ризиків і професійних захворювань

Категорія	Визначальна ознака	Необхідна доказова база	Приклад дослідницького питання
Нова професійна небезпека	Раніше недостатньо вивчений агент або процес	Дані про властивості агента, шляхи впливу та потенційну шкоду	Які властивості матеріалу можуть становити небезпеку для працівників?
Емерджентний професійний ризик	Зміна експозиції, масштабу впливу або наукового розуміння відомої небезпеки	Дані про експозицію, умови праці, ймовірність і тяжкість наслідків	Як зміна технології впливає на ризик за однакової номінальної концентрації агента?
Новий експозиційний контекст	Відомий агент діє за інших умов, шляхів надходження або комбінацій чинників	Порівняльні токсикологічні, фізіологічні чи епідеміологічні дані	Чи змінюється характер впливу за комбінованої експозиції?
Професійне захворювання з новим причинним зв'язком	Накопичено докази зв'язку патології з конкретною професійною експозицією	Клінічні, епідеміологічні та механістичні докази з урахуванням альтернативних пояснень	Наскільки переконливими є докази причинного зв'язку?
Потенційне емерджентне захворювання	Існує обґрунтована гіпотеза про несприятливий ефект, але причинний зв'язок не встановлений	Попередні експериментальні, токсикологічні або обмежені епідеміологічні дані	Яких досліджень бракує для перевірки гіпотези?

Джерело: авторська систематизація на основі [1, 2]. Категорії запропоновано для аналітичних цілей монографії; вони не замінюють офіційних класифікацій професійних захворювань.

1.3. Вплив технологічних змін на формування нових професійних небезпек

Технологічні трансформації змінюють професійні небезпеки через кілька взаємопов'язаних процесів: упровадження нових матеріалів, зміну фізико-хімічних властивостей виробничих агентів, автоматизацію технологічних операцій і формування нових сценаріїв контакту працівників із небезпечними чинниками. Тому оцінювання професійного ризику має враховувати не лише назву технології або речовини, а й конкретний виробничий процес, властивості матеріалу, шляхи надходження до організму та умови експозиції.

Огляд Shekaftik та співавторів, опублікований у 2025 році, охоплює професійні небезпеки, пов'язані з мікро- й наноелектронікою, нанотехнологіями, біотехнологіями, фотонікою, передовими матеріалами та сучасними виробничими технологіями. Автори проаналізували 36 досліджень і встановили, що технологічні зміни можуть супроводжуватися хімічними, фізичними, ергономічними та психосоціальними небезпеками. Водночас кількість і якість доказів істотно відрізняються залежно від технологічного напряму та конкретного агента [2].

Це означає, що поняття емерджентності не можна застосовувати до всіх технологічно зумовлених небезпек однаково. Для одних агентів уже відомі токсикологічні властивості та основні шляхи впливу, проте недостатньо вивчені наслідки тривалої експозиції в конкретному виробничому середовищі. Для інших залишаються невизначеними навіть характеристики фактичної експозиції. Отже, технологічна новизна, новизна експозиційного сценарію та невизначеність щодо наслідків для здоров'я є різними аналітичними характеристиками.

Показовим прикладом є адитивне виробництво, або тривимірний друк. Розширення застосування цієї технології у промисловості, медицині та виробництві компонентів супроводжується використанням полімерних філаментів, фотополімерних смол і металевих порошків. Залежно від технологічного процесу потенційними небезпечними чинниками можуть бути аерозольні

частинки, продукти термічного розкладання, хімічні компоненти смол і порошкові матеріали. Національний інститут охорони праці США (NIOSH) розглядає контроль таких впливів як окремий напрям досліджень професійної безпеки та рекомендує оцінювати небезпеки з урахуванням конкретного обладнання й матеріалу [3].

Принципово важливо, що ризики різних технологій тривимірного друку не можна об'єднувати в одну категорію з однаковим профілем небезпеки. Експозиції під час роботи з металевими порошками відрізняються від впливів, характерних для нагрівання термопластичних матеріалів або використання фотополімерних смол. Тому оцінювання має бути процесноорієнтованим: спочатку визначають матеріал і технологічну операцію, потім характеризують потенційні шляхи впливу, а після цього обирають відповідні методи контролю.

Ще один приклад — виробництво та перероблення літій-іонних акумуляторів. Розширення електрифікації транспорту збільшує потребу в літії, нікелі, кобальті, марганці та інших матеріалах, залучених до виробництва акумуляторних систем. У дослідженні Brown та співавторів 2024 року розглянуто професійні, екологічні й токсикологічні ризики, пов'язані з видобуванням металів для літій-іонних акумуляторів [4].

У цьому контексті необхідно розрізняти ризики видобування сировини, виробництва акумуляторних компонентів, складання батарей і перероблення використаних виробів. На кожному етапі змінюються склад матеріалів, фізична форма агентів, інтенсивність і тривалість контакту, а також можливі шляхи надходження до організму. Крім того, автоматизація окремих операцій не усуває всіх небезпек: ручне обслуговування обладнання, очищення, технічний ремонт і ліквідація аварійних ситуацій можуть створювати окремі сценарії експозиції.

Публікація 2026 року про умови праці у виробництві та переробленні літій-іонних акумуляторів додатково наголошує на недостатності даних щодо комбінованого впливу металів і хімічних речовин, шкірного надходження, внутрішньої дози та довгострокових наслідків для здоров'я працівників [5]. Автори

розглядають ці прогалини як підставу для комплексного дослідження виробничої експозиції, біологічного моніторингу та медичного нагляду.

Цей приклад демонструє одну з ключових особливостей емерджентних професійних ризиків: новизна може полягати не в токсикологічних властивостях кожної окремої речовини, а в поєднанні відомих агентів у новому виробничому середовищі. За таких умов перенесення результатів досліджень з інших галузей потребує обережності, оскільки характеристики експозиції та можливі взаємодії між агентами можуть відрізнятися.

Цифровізація та автоматизація виробництва формують іншу групу професійних небезпек. Роботизовані системи, штучний інтелект, носимі пристрої та алгоритмічне управління можуть підвищувати контрольованість окремих виробничих процесів, але водночас змінювати темп праці, автономію працівника, характер взаємодії з обладнанням і психосоціальні умови. У звіті Європейського агентства з безпеки та гігієни праці, опублікованому у 2024 році та розміщеному на порталі EU Publications у 2025 році, розглянуто практики застосування цифрових систем для поліпшення професійної безпеки, зокрема носимих пристроїв, штучного інтелекту та робототехніки [6].

Використання цифрових технологій не слід апріорі трактувати як джерело додаткової шкоди. Їхній вплив залежить від способу впровадження, організації праці, характеристик системи та того, чи зберігає працівник можливість контролювати власні робочі дії. Наприклад, автоматизований моніторинг може допомагати виявляти небезпечні умови, але надмірний контроль продуктивності або непрозорі алгоритми розподілу завдань можуть створювати психосоціальні ризики. Для обґрунтованих висновків необхідно розрізняти технічну можливість такого впливу та фактично встановлені наслідки для здоров'я.

Отже, технологічні трансформації змінюють профіль професійного ризику через різні механізми: появу нових агентів, зміну фізичної форми відомих матеріалів, комбінування експозицій і перебудову організації праці. Для систематизації основних технологічних напрямів, пов'язаних із ними потенційних

професійних небезпек і пріоритетів профілактики сформовано узагальнювальну матрицю (табл. 3).

Таблиця 3

Технологічні трансформації та пов'язані з ними професійні небезпеки

Технологічний напрям	Потенційні небезпечні чинники	Основні питання оцінювання	Пріоритет профілактики
Адитивне виробництво	Металеві порошки, аерозолі, продукти термічного розкладання, компоненти фотополімерів	Характеристики викидів, інгаляційна та шкірна експозиція, відмінності між технологічними процесами	Локальна вентиляція, контроль матеріалів і викидів, безпечне очищення обладнання
Нанотехнології та передові матеріали	Наночастинки, аерозолі, матеріали з недостатньо вивченими токсикологічними властивостями	Фізико-хімічні характеристики, біодоступність, тривалість впливу, рівень токсикологічних доказів	Мінімізація утворення аерозолів, інженерний контроль, оцінювання конкретного матеріалу
Виробництво та перероблення акумуляторів	Метали, електроліти та інші хімічні компоненти залежно від технології	Комбіновані експозиції, шкірне надходження, внутрішня доза, довгострокові ефекти	Контроль на всіх етапах виробничого циклу, безпечне поводження з матеріалами та відходами
Мікро- й наноелектроніка	Хімічні реагенти, технологічні гази, фізичні та ергономічні чинники	Особливості конкретних виробничих операцій, можливість контакту з небезпечними речовинами	Контроль технологічних процесів, герметизація, вентиляція, відповідний виробничий моніторинг

Продовження табл. 1

Роботизація та цифрове управління	Механічні небезпеки, зміна темпу праці, психосоціальні чинники	Реальний вплив на навантаження, автономію, безпеку взаємодії та стан здоров'я	Безпечне проєктування систем, участь працівників, оцінювання психосоціальних ризиків

Джерело: авторське узагальнення на основі [2–6]. Наведені чинники є потенційними; конкретний профіль небезпеки залежить від матеріалу, технологічного процесу та умов експозиції.

Наведена матриця показує, що профілактичні рішення мають відповідати конкретному механізму виникнення ризику. Для хімічних агентів першочергове значення мають усунення або заміна небезпечної речовини, герметизація процесів і контроль експозиції. Для цифрових систем необхідно додатково враховувати ергономічні та психосоціальні характеристики роботи. Універсальні рекомендації без урахування цих відмінностей можуть бути недостатніми.

Водночас наведені приклади не дозволяють зробити висновок, що всі розглянуті технології вже спричиняють нові професійні захворювання. У багатьох випадках наукові дані підтверджують наявність небезпечних чинників, але не дають змоги остаточно встановити частоту конкретних захворювань або кількісно оцінити довгостроковий ризик. Саме тому необхідно розмежовувати небезпеку, експозицію, біологічний ефект і клінічно встановлену патологію.

Таким чином, технологічні трансформації слід розглядати як чинник зміни структури професійних небезпек, а не як автоматичне свідчення появи нових нозологічних форм. Це положення визначає логіку наступного розділу, у якому буде розглянуто конкретні виробничі агенти, матеріали та технологічні процеси.

1.4. Зміна структури зайнятості, старіння робочої сили та трансформація професійних ризиків

Трансформація професійної патології залежить не лише від появи нових виробничих агентів і технологій, а й від змін у складі робочої сили, організації зайнятості та характері трудового навантаження. Старіння населення працездатного віку, подовження трудової діяльності, поширення нестандартних форм зайнятості й цифрове управління працею змінюють умови, за яких працівники контактують із професійними небезпеками. Унаслідок цього однакова експозиція може мати різне значення для працівників залежно від віку, функціонального стану, супутніх захворювань, попереднього професійного стажу та можливостей адаптації робочого місця.

У цьому контексті важливо розмежовувати біологічне старіння, тривалість професійного стажу та накопичене експозиційне навантаження. Ці характеристики пов'язані між собою, але не є взаємозамінними. Вік сам по собі не визначає рівня професійного ризику: значення мають конкретні умови праці, характер і тривалість впливу небезпечних чинників, функціональні можливості людини та доступність профілактичних заходів. Тому старіння робочої сили потребує не спрощеного поділу працівників на вікові групи ризику, а оцінювання відповідності між вимогами робочого місця та індивідуальними можливостями працівника.

1.4.1. Старіння робочої сили та накопичення професійного навантаження

Старіння робочої сили має значення для професійної медицини передусім через необхідність ураховувати тривалість експозиції, функціональні зміни та відповідність умов праці можливостям працівника. Європейське агентство з безпеки та гігієни праці (EU-OSHA) наголошує, що вікові зміни можуть

по-різному впливати на безпеку залежно від професійних завдань. Наприклад, зміни рівноваги та фізичної витривалості мають особливе значення для працівників, які працюють на висоті, переміщують вантажі або виконують завдання в екстремальних умовах, але не обов'язково створюють аналогічні обмеження в інших видах діяльності [7].

У профпатології цей аспект необхідно розглядати разом із кумулятивним впливом виробничих чинників. Тривалий професійний стаж може означати більшу сумарну експозицію, проте фактичне навантаження залежить від концентрації або інтенсивності агента, тривалості контакту, застосованих засобів контролю та змін умов праці протягом кар'єри. Тому календарний вік і тривалість стажу не можуть бути самостійними замінниками індивідуальної оцінки професійного ризику.

Водночас вік може модифікувати наслідки певних експозицій через зміни фізіологічного резерву, наявність хронічних захворювань або зниження здатності переносити окремі види навантаження. Такі взаємозв'язки потребують оцінювання окремо для конкретних професійних чинників і клінічних наслідків. Необґрунтовано припускати, що старші працівники є однаково вразливими до всіх небезпек або що вік завжди збільшує ризик виробничої травми.

Практичний висновок полягає в тому, що профілактика має передбачати адаптацію робочого середовища, ергономічне проєктування, контроль фізичного навантаження, управління змінною роботою та доступність заходів збереження працездатності протягом трудового життя. Віковочутливе оцінювання ризику не повинно перетворюватися на дискримінаційний відбір працівників за віком. Його мета — виявляти невідповідності між вимогами роботи та функціональними можливостями й усувати їх передусім шляхом удосконалення умов праці.

1.4.2. Нестандартна зайнятість і нерівномірний розподіл професійних ризиків

Іншою важливою трансформацією є поширення різноманітних форм зайнятості, які відрізняються від традиційної безстрокової роботи в межах одного підприємства. Міжнародна організація праці відносить до нестандартних форм зайнятості тимчасову й неповну зайнятість, роботу за викликом, агентську працю, окремі форми залежної самозайнятості та зайнятість через цифрові платформи [8].

Такі форми зайнятості самі по собі не означають неминучого погіршення здоров'я. Їхнє значення для професійної медицини визначається конкретними умовами: стабільністю графіка, доступом до навчання та засобів захисту, розподілом відповідальності між замовником і виконавцем, можливістю повідомляти про небезпеки й отримувати медичну допомогу. За фрагментованої зайнятості працівник може послідовно контактувати з різними небезпечними агентами на кількох робочих місцях, тоді як інформація про сумарну експозицію не завжди систематизується.

Проблема особливо помітна в платформній економіці, де цифрові інструменти координують замовлення, оцінювання продуктивності й розподіл роботи. Звіт EU-OSHA 2024 року про безпеку та здоров'я працівників цифрових платформ аналізує ризики, пов'язані з організацією праці, алгоритмічним управлінням, фізичним навантаженням і психосоціальними умовами [9].

Наприклад, кур'єри та водії платформ можуть зазнавати впливу транспортних небезпек, несприятливих погодних умов, забруднення повітря й фізичного навантаження. Для працівників, які надають послуги дистанційно, більш значущими можуть бути тривале сидіння, недостатня ергономічна організація робочого місця, ізоляція та інтенсивність цифрової взаємодії. Ці групи не можна об'єднувати в єдину категорію професійного ризику, оскільки характер експозицій істотно відрізняється.

Особливість нестандартної зайнятості полягає також у можливій невідповідності між фактичним виконанням роботи та доступом до механізмів профілактики. Якщо працівник не має стабільного роботодавця або працює одночасно з кількома замовниками, може ускладнюватися організація навчання, медичного нагляду, обліку експозицій і компенсації шкоди. Це не означає, що такі проблеми властиві кожному платформному працівникові, але вони мають враховуватися під час формування політики професійного здоров'я.

1.4.3. Взаємодія демографічних змін і нових форм зайнятості

Демографічні зміни та трансформація зайнятості можуть посилювати одне одного. Працівник старшого віку, який переходить на тимчасову роботу, може мати значний попередній професійний стаж, але обмежений доступ до інформації про небезпеки на новому робочому місці. Молодий працівник платформної економіки, навпаки, може мати короткий стаж, проте працювати в умовах інтенсивного темпу, нестабільного графіка та недостатнього контролю над робочим навантаженням. Це приклади потенційних сценаріїв, а не універсальні характеристики відповідних груп.

Для професійної медицини важливо оцінювати не лише індивідуальні чинники, а й організаційні умови, що визначають доступ до профілактики. До них належать передавання інформації про небезпеки під час зміни роботодавця, безперервність медичного нагляду, доступність навчання, можливість повідомляти про несприятливі умови та розподіл відповідальності за охорону праці. Такий підхід дозволяє уникнути надмірної концентрації на особистих характеристиках працівника й урахувати роль організації праці у формуванні ризику. Для узагальнення основних змін структури зайнятості, пов'язаних із ними потенційних наслідків для професійного здоров'я та пріоритетних профілактичних заходів систематизовано відповідні чинники й організаційні умови (табл. 4).

Таблиця 4

Зміни структури зайнятості та їхнє значення для професійного здоров'я

Чинник трансформації	Потенційні наслідки для професійного здоров'я	Обмеження оцінювання	Пріоритетні заходи
Старіння робочої сили	Зміна функціонального резерву та переносимості окремих видів навантаження	Вік не є універсальним предиктором професійного ризику	Віковочутливе оцінювання, ергономічна адаптація, профілактика надмірного навантаження
Тривалий професійний стаж	Можливе накопичення експозиційного навантаження	Стаж не відображає фактичної інтенсивності й тривалості впливу	Реконструкція професійної історії та оцінювання сумарної експозиції
Тимчасова та агентська зайнятість	Можливі перерви в навчанні, профілактичному нагляді та передаванні інформації	Наслідки залежать від умов контракту й організації праці	Узгодження відповідальності, навчання та безперервності профілактики
Платформна зайнятість	Ризики, пов'язані з алгоритмічним управлінням, графіком, транспортом або ергономікою	Різні види платформної роботи мають неоднакові профілі ризику	Галузеві оцінювання, контроль робочого навантаження, доступ до засобів захисту
Поєднання кількох місць роботи	Можливе сумарне навантаження від різних професійних агентів	Інформація про експозиції може бути розпорошеною	Урахування сукупного навантаження та координація профілактичних заходів

Джерело: авторське узагальнення на основі [7–9]. Наведені наслідки описують можливі механізми формування ризику, а не встановлені закономірності для всіх працівників відповідних груп.

Як видно з табл. 4, демографічні характеристики та форма зайнятості не можуть розглядатися ізольовано від конкретних умов праці. Для оцінювання ризику необхідно враховувати характер експозиції, тривалість роботи, доступність профілактики та можливість накопичення впливів упродовж трудового життя. Такий підхід має особливе значення для працівників, які змінюють професії, поєднують декілька видів діяльності або працюють у нестабільних організаційних умовах.

Отже, трансформація структури зайнятості змінює не лише розподіл професійних небезпек, а й можливості їх своєчасного виявлення та контролю. Старіння робочої сили актуалізує питання адаптації умов праці до функціональних можливостей працівників, тоді як нестандартна зайнятість потребує механізмів забезпечення профілактики незалежно від конкретної договірної форми. Обидва напрями мають бути інтегровані в систему управління професійними ризиками.

1.5. Методологічні підходи до виявлення нових професійних ризиків і оцінювання доказів

Виявлення емерджентних професійних ризиків потребує методологічного підходу, який дає змогу працювати з неповними, неоднорідними та іноді суперечливими даними. На відміну від добре вивчених виробничих чинників, для яких установлені типові шляхи впливу, дозозалежні закономірності й характерні несприятливі наслідки, нові агенти та технологічні процеси нерідко впроваджуються раніше, ніж накопичуються достатні відомості про їхній вплив на здоров'я працівників. Тому початкове оцінювання має охоплювати не лише вже зареєстровані захворювання, а й ранні сигнали потенційної небезпеки.

Водночас раннє виявлення ризику не повинно ототожнюватися з доведенням причинного зв'язку. Наявність нового матеріалу, технології чи організаційної практики сама по собі не свідчить про те, що вони спричиняють професійну патологію.

Необхідно встановити, чи контактують працівники з відповідним чинником, за яких умов і з якою інтенсивністю відбувається вплив, які біологічні механізми можуть пояснювати несприятливий ефект і наскільки узгоджуються між собою результати доступних досліджень. Такий підхід відповідає загальній логіці оцінювання професійних небезпек, але потребує особливої уваги до невизначеності та обмеженості даних [10–12].

Виявлення ранніх сигналів професійної небезпеки. Першим етапом є систематичне виявлення сигналів, які можуть свідчити про формування нового або недостатньо вивченого професійного ризику. Джерелами таких сигналів можуть бути результати виробничого контролю, токсикологічних та експериментальних досліджень, епідеміологічні спостереження, повідомлення про професійні захворювання, дані медичного нагляду за працівниками, а також зміни в технологічних процесах і структурі зайнятості.

Для цієї мети застосовують, зокрема, систематичний моніторинг наукових публікацій і нормативних документів, аналіз тенденцій у виробництві, експертне оцінювання та методи horizon scanning — систематичного пошуку ранніх сигналів майбутніх або недостатньо вивчених ризиків. Їхнє завдання полягає не в остаточному встановленні небезпеки, а у визначенні напрямів, які потребують поглибленого дослідження та превентивної уваги. Такий підхід особливо важливий у сферах, де технологічні зміни відбуваються швидше, ніж формуються повні масиви даних про професійні наслідки [10, 11].

Окремого значення набуває аналіз змін у структурі експозиції. Ризик може виникати не лише через появу принципово нового агента, а й унаслідок зміни його фізико-хімічних характеристик, способу використання, концентрації, тривалості контакту або поєднання з іншими чинниками. Наприклад, запровадження нового виробничого матеріалу може змінювати склад аерозолю, характер утворення пилу або можливість проникнення частинок у дихальні шляхи. У такому випадку дослідницьке завдання полягає не тільки у визначенні властивостей матеріалу, а й у характеристиці фактичної експозиції за конкретних умов виробництва.

Виявлений сигнал необхідно перевірити на предмет його достовірності, повторюваності та професійної релевантності. Поодиноке повідомлення про несприятливий ефект може бути підставою для подальшого дослідження, але не достатнім доказом причинності. Водночас відсутність зареєстрованих випадків захворювання не завжди свідчить про відсутність ризику: вона може бути пов'язана з малою кількістю працівників, коротким періодом спостереження, тривалим латентним періодом або недостатнім виявленням професійного походження захворювання.

Розмежування небезпеки, експозиції та ризику. Методології дослідження професійного здоров'я важливо розмежовувати три взаємопов'язані поняття: небезпека, експозиція та ризик. Небезпека характеризує потенційну здатність агента або виробничого процесу спричиняти несприятливий ефект. Експозиція означає фактичний контакт працівника з цим агентом за певних умов, інтенсивності та тривалості. Ризик характеризує ймовірність і тяжкість несприятливих наслідків за конкретного сценарію впливу.

Ці поняття не є взаємозамінними. Виявлення токсичних властивостей речовини не дає змоги автоматично визначити рівень ризику на конкретному робочому місці. Для цього необхідно з'ясувати, чи відбувається контакт, яким є шлях надходження агента до організму, чи застосовуються ефективні засоби контролю та які групи працівників зазнають впливу. Аналогічно, підтверджена експозиція ще не доводить, що внаслідок неї виникає певне захворювання, хоча може бути достатньою підставою для проведення оцінювання та впровадження заходів зниження впливу.

Особливу проблему становлять ситуації, коли традиційні методи вимірювання не дають повної характеристики експозиції. Це може стосуватися наноматеріалів, складних виробничих аерозолів, нових хімічних сумішей, біологічних агентів або поєднання фізичних і хімічних чинників. У таких випадках доцільно поєднувати інструментальні вимірювання з аналізом технологічного процесу, характеристик матеріалів, умов вентиляції, засобів індивідуального захисту та організації праці. Огляд методів оцінювання професійних ризиків також засвідчує необхідність

адаптації традиційних підходів до технологій, для яких усталені процедури оцінювання можуть бути недостатніми [10].

Оцінювання доказів причинного зв'язку. П ісля виявлення потенційної небезпеки та характеристики експозиції наступним завданням є оцінювання доказів можливого несприятливого впливу на здоров'я. У цьому процесі необхідно враховувати різні типи даних: результати досліджень на клітинному й тваринному рівнях, токсикологічні характеристики агента, дослідження експозиції, клінічні спостереження, епідеміологічні дослідження та результати систематичних оглядів.

Кожен тип доказів відповідає на окреме питання. Експериментальні дослідження можуть допомогти встановити біологічну правдоподібність ефекту та з'ясувати можливі механізми його розвитку. Дослідження експозиції визначають характер і поширеність контакту працівників із чинником. Клінічні спостереження дають змогу виявляти характерні порушення здоров'я та формувати гіпотези щодо їхнього походження. Епідеміологічні дослідження оцінюють зв'язок між експозицією та наслідками для здоров'я в професійних групах. Систематичні огляди забезпечують прозоре узагальнення сукупності доступних результатів і допомагають визначити обмеження доказової бази [11, 12].

Оцінювання доказів не повинно зводитися до механічного підрахунку публікацій із позитивними або негативними результатами. Значення мають дизайн дослідження, якість вимірювання експозиції, достатність періоду спостереження, розмір вибірки, можливість систематичних помилок, контроль змішувальних чинників і узгодженість результатів. Важливо також оцінювати, наскільки досліджені умови відповідають реальним виробничим процесам. Наприклад, виявлення несприятливого ефекту за експериментальної концентрації, яка істотно перевищує рівні, характерні для робочого середовища, не дає безпосередньої відповіді щодо величини професійного ризику, хоча може обґрунтовувати подальше вивчення механізму дії.

Для професійної патології особливе значення має часовий зв'язок між експозицією та виникненням захворювання.

Необхідно враховувати тривалість контакту, латентний період, можливі перерви в експозиції та сукупний вплив чинників протягом трудового життя. Для захворювань із тривалим латентним періодом короткострокові дослідження можуть недооцінювати віддалені наслідки. Водночас часовий збіг між роботою з певним матеріалом і появою симптомів не є достатнім доказом причинного зв'язку без аналізу альтернативних пояснень.

Додатковою складністю є комбіновані експозиції. Працівник може одночасно зазнавати впливу хімічних речовин, пилу, шуму, теплового навантаження та психосоціальних чинників. За таких умов несприятливий результат не завжди можна пояснити дією одного агента. Потрібно оцінювати можливість адитивної, синергічної або антагоністичної взаємодії, не припускаючи заздалегідь наявності певного типу ефекту. Якщо даних недостатньо для розмежування внеску окремих чинників, це обмеження слід прямо зазначати у висновках.

Для систематизації основних етапів оцінювання емерджентних професійних ризиків і визначення відповідних дослідницьких завдань пропонується узагальнювальна матриця (табл. 5).

Таблиця 5

Етапи виявлення та оцінювання емерджентних професійних ризиків

Етап оцінювання	Основне дослідницьке питання	Необхідні дані	Можливий результат
Виявлення раннього сигналу	Чи з'явився новий агент, процес або незвична конфігурація експозицій?	Дані про технологічні зміни, наукові публікації, повідомлення про несприятливі ефекти	Формування гіпотези про потенційну небезпеку
Характеристика небезпеки	Які властивості агента можуть спричиняти несприятливий ефект?	Фізико-хімічні характеристики, токсикологічні й експериментальні дані	Попередня характеристика потенційних ефектів

Продовження табл. 5

Оцінювання експозиції	Хто, за яких умов, яким шляхом і протягом якого часу зазнає впливу?	Вимірювання, аналіз технологічного процесу, дані про умови праці та засоби контролю	Опис фактичної або ймовірної експозиції
Оцінювання впливу на здоров'я	Чи пов'язана експозиція з певними клінічними або субклінічними змінами?	Клінічні, токсикологічні та епідеміологічні дослідження	Попередня оцінка характеру ймовірних наслідків
Аналіз причинності	Наскільки переконливо сукупність доказів підтверджує причинний зв'язок?	Якість і узгодженість досліджень, часовий зв'язок, альтернативні пояснення	Визначення сили доказів і невизначеності
Вибір профілактичних заходів	Які дії виправдані за наявного рівня знань?	Характер небезпеки, масштаб експозиції, тяжкість можливих наслідків, ефективність контролю	Пріоритети подальших досліджень і профілактики

Джерело: авторське узагальнення на основі [10–12]. Матриця є методологічною схемою для організації оцінювання, а не валідованим інструментом кількісного прогнозування ризику.

Матриця відображає послідовність переходу від первинного сигналу до обґрунтованого рішення, але не передбачає, що кожен етап завжди можна завершити до початку наступного. На практиці оцінювання має ітеративний характер: результати вимірювання експозиції можуть потребувати перегляду початкової гіпотези, а нові клінічні дані — уточнення переліку досліджуваних агентів. Такий процес особливо важливий за швидкого впровадження нових технологій, коли повна доказова база формується поступово.

Невизначеність доказів і профілактичні рішення. Одним із центральних методологічних питань є визначення дій за умов,

коли потенційна небезпека вже виявлена, але причинний зв'язок із захворюванням ще не встановлений остаточно. У професійній медицині очікування повної визначеності може призвести до тривалого збереження неконтрольованої експозиції. Водночас передчасне визнання непідтвердженої гіпотези доведеним фактом створює ризик хибних висновків, неефективного розподілу ресурсів і неправильного визначення пріоритетів.

Тому необхідно розмежовувати рівень упевненості в науковому висновку та обґрунтованість превентивних заходів. Вони пов'язані між собою, але не є тотожними. Для встановлення конкретного професійного захворювання необхідна доказова база, достатня для обґрунтування відповідного причинного зв'язку. Натомість для зменшення експозиції потенційно небезпечного агента можуть бути підстави й до завершення такого доказування, особливо якщо можливі наслідки є тяжкими, контакт підтверджений, а доступні заходи контролю є здійсненними.

Рішення в умовах невизначеності доцільно будувати з урахуванням щонайменше чотирьох параметрів: тяжкості потенційних наслідків, масштабу й тривалості експозиції, надійності наявних доказів і можливості зменшити вплив. За високої потенційної тяжкості та значної експозиції обґрунтованими можуть бути оперативні заходи контролю, паралельно з подальшим дослідженням. Якщо ж сигнал слабкий, експозиція не підтверджена, а результати досліджень суперечливі, пріоритетом може стати цілеспрямоване отримання додаткових даних і повторна оцінка ситуації.

Вибір заходів не повинен обмежуватися медичним наглядом за працівниками. Профілактика може включати усунення небезпечного агента, заміну матеріалу, зміну технологічного процесу, локалізацію джерела, вентиляцію, автоматизацію небезпечних операцій, організаційні заходи та використання засобів індивідуального захисту. Конкретна комбінація залежить від характеру небезпеки й умов виробництва. Медичне спостереження є важливим джерелом інформації для виявлення ранніх змін, але не повинно підміняти контроль небезпечної експозиції.

Для емерджентних ризиків важливо також забезпечувати повторне оцінювання після зміни технології, появи нових результатів досліджень або отримання даних про несприятливі ефекти. Первинний висновок має розглядатися як обґрунтований на певний момент часу, а не як незмінна характеристика агента. Це передбачає документування джерел даних, використаних методів, невизначеності та підстав для прийнятих рішень. Така прозорість полегшує порівняння результатів між підприємствами й галузями, а також подальше уточнення профілактичних рекомендацій.

Методологічне виявлення емерджентних професійних ризиків передбачає послідовне, але не суто лінійне оцінювання ранніх сигналів, властивостей небезпечного агента, фактичної експозиції, можливих наслідків для здоров'я та сили доказів причинного зв'язку. Жоден із цих компонентів не може самостійно забезпечити повноцінну характеристику професійного ризику.

Відсутність достатніх доказів причинності не слід автоматично трактувати як доказ відсутності небезпеки. Водночас потенційний ризик не можна подавати як установлене професійне захворювання без відповідного обґрунтування. Розмежування цих рівнів є необхідною умовою наукової коректності та практичної придатності оцінювання.

Таким чином, для дослідження нових і емерджентних професійних захворювань потрібна модель, яка поєднує оцінювання небезпеки й експозиції, аналіз сукупності доказів, явне визначення невизначеності та вибір пропорційних профілактичних заходів. Цей підхід створює основу для подальшого аналізу нових виробничих агентів і технологій, кліматично зумовлених небезпек та комбінованих експозицій, що розглядаються в наступних розділах монографії.

Розділ 2.
НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ВИРОБНИЧІ АГЕНТИ: ФОРМУВАННЯ НОВИХ ПРОФІЛІВ ПРОФЕСІЙНОГО РИЗИКУ

2.1. Наноматеріали та передові матеріали: особливості професійної експозиції й оцінювання ризику

Розвиток нанотехнологій і виробництва передових матеріалів змінює характеристики виробничих агентів, із якими контактують працівники в промисловості, електроніці, енергетиці, медицині та дослідницьких лабораторіях. Наноматеріали використовують для надання продукції специфічних механічних, електричних, оптичних, каталітичних і термічних властивостей. Їх застосовують у покриттях, композитах, електронних компонентах, акумуляторах, фільтрувальних системах і біомедичних технологіях. Розширення сфер застосування супроводжується необхідністю оцінювати потенційний вплив таких матеріалів на працівників під час синтезу, оброблення, транспортування, використання та утилізації.

У професійній гігієні наноматеріали становлять особливий інтерес через залежність їхніх властивостей від розміру частинок, форми, структури, хімічного складу, стану поверхні та здатності утворювати агрегати й агломерати. Водночас поняття «наноматеріал» охоплює неоднорідну групу речовин, тому не можна робити висновок про однакову токсичність усіх матеріалів лише на підставі їхнього нанорозмірного діапазону. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) у рекомендаціях щодо захисту працівників від потенційних ризиків штучно створених наноматеріалів наголошує на необхідності оцінювати конкретні групи матеріалів, шляхи експозиції та доступні заходи контролю [13].

2.1.1. Характеристики наноматеріалів, що мають значення для професійного здоров'я

До наноматеріалів, які становлять інтерес для професійної медицини та гігієни праці, належать вуглецеві нанотрубки й нанофібри, наночастинки металів та їхніх оксидів, нанорозмірний діоксид титану, синтетичний аморфний кремнезем та інші матеріали, властивості яких залежать від розміру й характеристик поверхні. Окрему групу становлять багатокомпонентні композити, у яких нанорозмірні складники поєднуються з полімерними, металевими або керамічними матрицями.

Потенційний несприятливий вплив визначається не тільки хімічним складом матеріалу. Значення можуть мати геометрія частинок, співвідношення площі поверхні до маси, розчинність, біостійкість, поверхнева реактивність, здатність до агрегації та наявність домішок. Для волокнистих наноматеріалів важливими є довжина, діаметр і біоперсистентність, тоді як для частинок неправильної форми — характеристики поверхні та особливості взаємодії з біологічними середовищами.

Ці властивості можуть впливати на осадження частинок у дихальних шляхах, їхнє видалення з респіраторного тракту, клітинну взаємодію та розвиток запальної відповіді. Проте наявність певної фізико-хімічної характеристики не означає, що відповідний несприятливий ефект обов'язково виникне в працівника. Для оцінювання ризику необхідно враховувати дозу, шлях надходження, тривалість впливу, біодоступність матеріалу та результати досліджень конкретної речовини.

Систематичний огляд досліджень за участю працівників, опублікований у Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, засвідчив обмеженість доказів щодо клінічних наслідків професійного впливу багатьох штучно створених наноматеріалів. У частині досліджень виявляли зміни біологічних показників, потенційно пов'язані з респіраторними та серцево-судинними ефектами, однак обмеження характеристики експозиції, переважання поперечних дизайнів і недостатня тривалість спостереження не дозволяли робити універсальні висновки про причинність [14].

Отже, сучасна доказова база обґрунтовує необхідність контролю експозиції та подальших досліджень, але не дає підстав розглядати всі наноматеріали як єдину категорію з однаковим профілем професійного ризику.

2.1.2. Виробничі процеси та шляхи експозиції

Потенційний контакт із наноматеріалами можливий на різних етапах виробничого циклу. До них належать синтез і очищення матеріалів, фасування порошків, змішування компонентів, нанесення покриттів, механічне оброблення композитів, очищення обладнання, обслуговування виробничих ліній і поводження з відходами. Умови експозиції суттєво відрізняються залежно від того, чи перебуває матеріал у вигляді вільного порошку, дисперсії, суспензії, закріпленого покриття або компонента твердої матриці.

Особливої уваги потребують операції, під час яких матеріал може переходити в повітря робочої зони. Це можливо під час пересипання сухих порошків, відкритого змішування, очищення забруднених поверхонь, механічного шліфування та оброблення композитів. При цьому фактична експозиція може охоплювати не тільки первинні наночастинки, а й агрегати, агломерати, частинки матричного матеріалу та інші супутні компоненти аерозолю.

Для оцінювання професійного впливу необхідно розрізняти первинний розмір частинок і розмір аерозольних частинок, які фактично перебувають у повітрі робочої зони. Виробничі процеси можуть змінювати стан агрегації матеріалу, а механічні та термічні операції — створювати частинки з характеристиками, відмінними від вихідної сировини. Тому паспорт безпеки матеріалу або дані про його початковий склад не завжди достатні для визначення реальної експозиції.

Основним шляхом професійного надходження багатьох повітряних наноматеріалів є інгаляційний. Водночас за певних виробничих умов необхідно оцінювати можливість контакту зі шкірою, забруднення поверхонь і перенесення матеріалу

на одяг або інші ділянки виробничого середовища. Наявні дослідження методів оцінювання експозиції засвідчують, що вимірювання наноматеріалів потребує поєднання різних методів і ретельної інтерпретації результатів; жоден окремий показник не характеризує всі аспекти потенційного впливу [13, 15].

2.1.3. Проблеми вимірювання та інтерпретації експозиції

Традиційне оцінювання пилового навантаження часто спирається на масову концентрацію частинок у повітрі. Для наноматеріалів цей показник може бути недостатнім, оскільки однакова масова концентрація різних матеріалів не обов'язково відповідає однаковій кількості частинок, площі поверхні або біологічній активності. Тому вибір показників має залежати від властивостей конкретного матеріалу та мети дослідження.

Для характеристики експозиції можуть використовуватися масова концентрація, чисельна концентрація частинок, розподіл за розміром, показники площі поверхні та хімічний аналіз. Інструментальні вимірювання доцільно поєднувати з персональним відбором проб у зоні дихання працівника, стаціонарними вимірюваннями в робочій зоні, аналізом технологічних операцій і визначенням ефективності інженерних засобів контролю.

Водночас збільшення чисельної концентрації частинок не завжди означає, що в повітрі з'явився саме досліджуваний наноматеріал. На результат можуть впливати фонові ультрадисперсні частинки, транспортні викиди, нагрівальні прилади та інші джерела аерозолю. Для атрибуції виміряного сигналу конкретному виробничому процесу потрібні відповідні контрольні вимірювання та, за можливості, аналіз хімічного складу частинок.

Окремою проблемою є зіставлення результатів різних досліджень. Відмінності у вимірювальних приладах, протоколах відбору проб, одиницях представлення результатів і характеристиках матеріалів можуть обмежувати можливість прямого порівняння. Тому в дослідженнях емерджентних професійних

ризиків необхідно документувати не лише отримане значення концентрації, а й метод його визначення, межі виявлення, характеристики матеріалу, виробничу операцію та умови проведення вимірювань.

Наукові й регуляторні рекомендації щодо наноматеріалів поступово розвиваються. NIOSH продовжує дослідження токсикологічних властивостей, оцінювання експозиції та методів її контролю, зокрема для окремих типів наноматеріалів. Це підкреслює необхідність не переносити результати оцінювання одного матеріалу на інші без належного обґрунтування [15].

2.1.4. Профілактика експозиції наноматеріалів

Профілактичні заходи мають ґрунтуватися на конкретних характеристиках матеріалу й виробничого процесу. За можливості першочергово розглядають заміну небезпечнішого матеріалу, зміну технології або використання форми матеріалу, яка зменшує утворення повітряного пилу. Якщо усунути джерело небезпеки неможливо, пріоритетними стають інженерні засоби контролю: герметизація обладнання, закриті системи дозування, локальна витяжна вентиляція та автоматизація операцій із високою ймовірністю вивільнення частинок.

Важливе значення має організація робочих процесів. До відповідних заходів належать обмеження доступу до зон із потенційною експозицією, безпечне очищення обладнання, контроль забруднення поверхонь, належне збирання відходів і навчання працівників. Методи сухого підмітання або очищення стисненим повітрям можуть сприяти повторному підняттю частинок і тому потребують заміни відповідними контрольованими процедурами.

Засоби індивідуального захисту органів дихання та шкіри слід добирати відповідно до оціненої небезпеки, характеристик матеріалу й умов виконання робіт. Вони не повинні замінювати технічно можливі заходи усунення або зниження експозиції. Ефективність усієї системи профілактики необхідно перевіряти за допомогою повторних вимірювань і спостереження за змінами виробничого процесу.

Таблиця 6

Наноматеріали: потенційні професійні експозиції та пріоритети профілактики

Група матеріалів або процесів	Потенційні ситуації експозиції	Основні питання оцінювання	Пріоритети профілактики
Вуглецеві нанотрубки та нанофібри	Виробництво, фасування, змішування, очищення обладнання	Форма й розміри частинок, біостійкість, рівень інгаляційної експозиції	Герметизація, локальна витяжна вентиляція, контроль пиловиділення
Наночастинки металів та їхніх оксидів	Синтез, нанесення покриттів, оброблення матеріалів	Хімічний склад, розмір, стан агрегації, супутні компоненти аерозолю	Закриті процеси, локалізація джерела, контроль повітря робочої зони
Нанорозмірний діоксид титану та синтетичний аморфний кремнезем	Дозування порошків, змішування, очищення обладнання	Форма матеріалу, концентрація пилу, характеристики поверхні	Зменшення пиловиділення, контрольоване очищення, належне поводження з відходами
Наноматеріали у складі композитів	Шліфування, різання, механічна обробка, ремонт	Склад утвореного аерозолю, можливість вивільнення нанокомпонентів	Локальна витяжна вентиляція, контроль процесу оброблення, оцінювання аерозолю
Матеріали після використання та відходи	Демонтаж, сортування, очищення, перероблення	Зміна властивостей матеріалу, забруднення поверхонь, вторинне пиловиділення	Безпечне збирання, ізоляція відходів, контрольоване транспортування й очищення

Джерело: авторське узагальнення на основі [13–15]. Наведені ситуації описують потенційні шляхи експозиції; фактичний ризик залежить від властивостей матеріалу, технологічного процесу та ефективності засобів контролю.

Для систематизації основних типів наноматеріалів, ситуацій можливої експозиції та відповідних профілактичних пріоритетів доцільно використати узагальнювальну матрицю (табл. 6).

Матриця демонструє, що профілактика має бути прив'язана до конкретної операції та форми матеріалу. Наприклад, ризик під час роботи із сухим порошком не можна автоматично прирівнювати до ризику під час використання того самого матеріалу у складі стабільної твердої матриці. Водночас механічне оброблення композиту може створювати новий аерозоль, характеристики якого відрізняються від вихідної сировини. Отже, оцінювання слід проводити не лише на етапі закупівлі матеріалу, а й під час зміни технології, технічного обслуговування та поводження з відходами.

Наноматеріали та передові матеріали є важливою групою виробничих агентів, для яких оцінювання професійного ризику потребує врахування фізико-хімічних характеристик, форми матеріалу, конкретних виробничих операцій і фактичної експозиції. Нанорозмір сам по собі не визначає ступеня небезпеки, а результати досліджень одного матеріалу не можна безпосередньо поширювати на всю групу.

Наявні дані підтверджують потребу в удосконаленні методів оцінювання експозиції, проведенні довготривалих досліджень і впровадженні превентивного контролю там, де можливий контакт із потенційно небезпечними матеріалами. Для професійної медицини особливо важливими залишаються належна характеристика робочих умов, документування експозиції та взаємодія між фахівцями з гігієни праці, токсикології й клінічної медицини.

2.2. Мікроелектроніка, адитивне виробництво та нові технологічні процеси

Розвиток мікроелектроніки й адитивного виробництва змінює не лише спосіб виготовлення продукції, а й структуру професійних експозицій. У виробництві напівпровідників

працівники можуть контактувати з технологічними хімічними речовинами, газами, аерозолями та побічними продуктами процесів очищення й оброблення матеріалів. В адитивному виробництві характер ризику залежить від технології друку, типу сировини, температурного режиму, способу видалення надлишкового матеріалу та операцій після завершення друку. Тому ці напрями доцільно розглядати не як єдину групу небезпек, а як різні виробничі системи, у яких поєднуються хімічні, аерозольні, фізичні та організаційні чинники.

Огляд професійних небезпек ключових технологій, опублікований Shekaftik та співавторами, включає мікроелектроніку, фотоніку, передові матеріали та інші технологічні напрями, для яких характерні неоднакові профілі експозиції й різний рівень доказової визначеності [2]. Це має значення для профпатології: назва галузі або професії сама по собі не є достатнім показником ризику. Необхідно визначити конкретну операцію, використані матеріали, можливі шляхи надходження небезпечних агентів і групи працівників, які фактично контактують із ними.

2.2.1. Мікроелектроніка та виробництво напівпровідників

Виробництво напівпровідників включає низку технологічних операцій, зокрема фотолітографію, травлення, осадження тонких плівок, очищення поверхонь, легування, промивання та обслуговування виробничого обладнання. Ці операції передбачають використання різних хімічних продуктів, а склад потенційної експозиції залежить від конкретної технологічної лінії. Працівники можуть контактувати з кислотами, розчинниками, лугами, реакційноздатними газами та речовинами, що використовуються для очищення або формування структур на поверхні матеріалів.

Дослідження хімічного використання на підприємствах напівпровідникової промисловості Південної Кореї виявило значну кількість хімічних продуктів і складників, серед яких

були речовини з канцерогенними, мутагенними або репродуктивно токсичними властивостями. Автори також звернули увагу на наявність компонентів, склад яких не був повністю розкритий у документації постачальників, і на обмежену доступність даних про професійні граничні рівні для частини хімічних складників [16]. Ці результати не означають, що кожен працівник напівпровідникового виробництва має однакову експозицію; вони демонструють складність ідентифікації небезпек, коли виробничі процеси використовують численні суміші, а інформація про їхній склад є неповною.

Окремого аналізу потребують роботи з технічного обслуговування. Вони можуть виконуватися поза звичайним циклом виробництва, коли обладнання відкривають, очищують або ремонтують після використання технологічних речовин. У таких ситуаціях працівники можуть контактувати з залишковими забрудненнями, частинками, відкладеннями та сумішами, що утворилися внаслідок попередніх операцій. Огляд ризиків технічного обслуговування на підприємствах із виробництва напівпровідників визначає одночасну дію хімічних і пилових чинників як важливий елемент оцінювання, а серед релевантних умов називає дотримання процедур безпечного відключення, продування й охолодження камер, ефективність місцевої витяжної вентиляції та належне використання респіраторного захисту [17].

Потенційні наслідки для здоров'я залежать від конкретної речовини, дози, шляху надходження та тривалості впливу. Для коректного висновку не можна переходити від самого факту застосування небезпечної речовини на підприємстві до твердження про наявність професійного захворювання в певної групи працівників. Необхідно встановити, чи могла речовина потрапити до зони дихання або на шкіру працівника, чи були перевищені відповідні граничні рівні, як змінювалася експозиція в часі та чи узгоджується клінічна картина з відомими ефектами конкретного агента.

Епідеміологічні дані щодо віддалених наслідків роботи в напівпровідниковій промисловості потребують особливо обережного тлумачення. Систематичний огляд і метааналіз досліджень щодо

раку та лейкемії не виявив статистично значущого підвищення загального ризику раку або лейкемії в об'єднаних оцінках, однак автори наголосили на обмеженнях доступних досліджень, зокрема на зміні виробничих умов у різні періоди, проблемах вибору груп порівняння та можливому ефекті здорового працівника [18]. Отже, ці результати не підтверджують узагальненого твердження про підвищений онкологічний ризик для всіх працівників галузі, але й не усувають потреби в належному контролі експозиції та якісних довготривалих дослідженнях.

2.2.2. Адитивне виробництво: від полімерного друку до металевих порошків

Адитивне виробництво охоплює різні технології створення виробу шляхом послідовного додавання матеріалу. До них належать екструзійний друк термопластичних ниток, фотополімеризація рідких смол, а також процеси, у яких металеві порошки сплавляються лазерним або електронно-променевим джерелом енергії. Відмінності між цими технологіями визначають склад потенційних експозицій: у полімерному друці важливими можуть бути ультрадрібні частинки й леткі органічні сполуки, у фотополімеризації — контакт із рідкими смолами та засобами очищення, а в металевому друці — інгаляційний і дермальний контакт із порошками, а також із продуктами термічного процесу.

NIOSH вказує, що потенційні небезпеки адитивного виробництва можуть виникати на різних етапах: під час підготовки сировини, друку, видалення виробу, постоброблення, очищення та технічного обслуговування. До них належать інгаляційний вплив порошків, викиди летких органічних сполук, контакт шкіри з порошкоподібними або рідкими матеріалами, термічні й механічні небезпеки, а також ризики займання або вибуху за наявності горючих матеріалів [3, 19]. Відповідно, оцінювання лише під час роботи принтера може не охопити операції, на яких працівник безпосередньо контактує із сировиною чи залишками процесу.

Огляд безпеки адитивного виробництва високоентропійних сплавів описує специфічні проблеми поводження з багатокомпонентними металевими порошками, потенційне утворення аерозолів і випарів під час плавлення, а також ризики, пов'язані з повторним використанням порошків і постобробленням виробів [18]. Водночас для багатьох нових сплавів доступні дані про професійний вплив і довгострокові наслідки залишаються обмеженими. Наявність токсичних елементів у складі сплаву є підставою для оцінювання небезпеки, але не замінює вимірювання експозиції й аналізу фактичної біодоступності відповідного компонента.

У полімерному друці характеристики викидів залежать від типу полімеру, добавок і барвників, температури екструдера, конструкції принтера та вентиляції приміщення. Тому не можна вважати всі настільні 3D-принтери еквівалентними з погляду професійного ризику. Так само результати, отримані для одного матеріалу або режиму друку, не слід автоматично переносити на інші технологічні системи. Для робочих місць, де одночасно функціонує багато принтерів, значення можуть мати сукупні викиди, тривалість роботи обладнання, об'єм приміщення та реальна ефективність вентиляції.

2.2.3. Постоброблення, технічне обслуговування та комбіновані експозиції

Після завершення адитивного виробництва вироби можуть потребувати видалення підтримувальних структур, шліфування, полірування, очищення розчинниками, термічної обробки або механічного доопрацювання. Саме ці операції можуть створювати експозиції, які не були очевидними на етапі друку. Механічна обробка здатна утворювати пил і частинки матеріалу виробу, очищення — спричиняти контакт із розчинниками, а ручне видалення порошку — підвищувати ймовірність інгаляційного та дермального впливу.

Для оцінювання таких робіт важливо розглядати не лише кожен агент окремо, а й послідовність операцій протягом робочої

зміни. Працівник може спочатку завантажувати порошок, потім обслуговувати обладнання, очищувати робочу зону й обробляти готовий виріб. За такого сценарію сумарний профіль експозиції формується кількома різними агентами та шляхами надходження. Однак сам факт одночасної або послідовної дії кількох чинників ще не доводить синергічного ефекту: для цього потрібні спеціальні токсикологічні або епідеміологічні дані. Доцільно говорити про комбіновану експозицію, а характер взаємодії чинників визначати лише за наявності відповідних доказів.

Оцінювання має охоплювати штатні операції, очищення, аварійні ситуації й технічне обслуговування. У документації варто фіксувати назву та склад матеріалу, технологічний режим, операцію, тривалість і частоту робіт, спосіб вентиляції, результати вимірювань та використані засоби контролю. Такий опис дає змогу відтворити експозиційний сценарій і порівнювати результати між робочими місцями.

Для систематизації ключових відмінностей між розглянутими технологіями пропонується матриця, наведена в таблиці 7.

Таблиця 7

Професійні експозиції в мікроелектроніці та адитивному виробництві

Технологія або операція	Потенційні експозиції	Критичні етапи роботи	Основні напрями оцінювання й контролю
Фотолітографія та хімічне оброблення напівпровідників	Розчинники, кислоти, луги, технологічні гази та суміші	Підготовка реагентів, очищення, заміна компонентів, усунення несправностей	Ідентифікація речовин, перевірка паспортів безпеки, контроль герметизації та вентиляції
Технічне обслуговування виробничих камер	Залишкові хімічні забруднення, пил і частинки	Відкривання камер, очищення, ремонт, заміна фільтрів	Безпечне відключення, продування й охолодження, оцінювання змішаних експозицій

Продовження табл. 1

Екструзійний друк полімерів	Ультрадрібні частинки, леткі та напівлеткі органічні сполуки	Тривалий друк у закритому приміщенні, обслуговування, очищення	Оцінювання викидів з урахуванням матеріалу й температури, локалізація джерела, вентиляція
Фотополімеризація	Рідкі фотополімери, засоби промивання та очищення, оптичне випромінювання в межах процесу	Заливання смоли, зняття виробу, промивання, затвердіння	Контроль контакту зі шкірою, закриті ємності, відповідні рукавички та захист очей
Адитивне виробництво металевих виробів	Металеві порошки, аерозолі й продукти термічного процесу	Завантаження та видалення порошку, очищення камери, постоброблення	Закриті системи роботи з порошками, локальна витяжка, контроль аерозолю й безпечне поводження з відходами
Постоброблення виробів	Пил, частинки матеріалу, розчинники, шум і механічні небезпеки	Шліфування, різання, полірування, очищення	Оцінювання фактичного аерозолю, локальне видалення забруднень, розмежування чистих і забруднених зон

Джерело: авторське узагальнення на основі [3, 16, 18–20]. Наведені експозиції є потенційними; їх фактична наявність і рівень мають визначатися для конкретного технологічного процесу.

Матриця показує, що автоматизація основного виробничого циклу не обов'язково усуває контакт працівників із небезпечними агентами. Експозиція може зберігатися або виникати на підготовчих і завершальних етапах, під час очищення, ремонту та поводження з відходами. Тому профілактичні заходи мають охоплювати повний цикл використання технології, а не лише її автоматизовану частину.

2.2.4. Профілактичні підходи та значення для професійної медицини

Профілактика в мікроелектроніці та адитивному виробництві повинна починатися з ідентифікації конкретних небезпечних агентів і операцій, під час яких можливе їх вивільнення. Пріоритетними є заміна менш безпечних матеріалів, коли це технологічно можливо, герметизація обладнання, автоматизоване дозування, локальна витяжна вентиляція, контрольоване видалення порошків і безпечні процедури очищення. Засоби індивідуального захисту підбирають відповідно до оцінки ризику й використовують як частину багаторівневої системи контролю, а не як заміну інженерним рішенням.

Для підприємств, що використовують нові технології, доцільно проводити оцінювання до введення обладнання в експлуатацію, після зміни сировини або режиму роботи, а також під час планового перегляду системи контролю. Моніторинг має охоплювати не тільки типові виробничі цикли, а й операції з найбільшою ймовірністю контакту: завантаження й вивантаження матеріалів, технічне обслуговування, усунення несправностей і очищення. За потреби результати вимірювань слід поєднувати з аналізом технологічної документації та опитуванням працівників щодо фактичного виконання робіт.

У клінічній практиці інформація про роботу в мікроелектроніці або адитивному виробництві має бути відправною точкою для уточнення конкретних експозицій, а не самостійною підставою для встановлення професійного діагнозу. Під час збору професійного анамнезу необхідно з'ясовувати назви матеріалів, виконувані операції, тривалість роботи, використання вентиляції й засобів захисту, випадки аварійного контакту та зміни симптомів у робочі й неробочі дні. Такий підхід дає змогу пов'язати клінічну оцінку з реальним експозиційним сценарієм і визначити, чи потрібні додаткові гігієнічні вимірювання або спеціалізовані обстеження.

Отже, мікроелектроніка й адитивне виробництво ілюструють загальну закономірність емерджентних професійних ризиків:

зміни технології створюють нові комбінації агентів і сценаріїв експозиції, але не дозволяють автоматично робити висновки про виникнення нової нозологічної форми. Для науково обґрунтованого оцінювання необхідні точний опис процесу, вимірювання експозиції, урахування операцій технічного обслуговування та критичне тлумачення епідеміологічних даних. Ці положення створюють основу для подальшого аналізу виробництва акумуляторів, критичної сировини й електронних відходів.

2.3. Акумулятори, критична сировина та електронні відходи

Енергетичний перехід і цифровізація збільшують потребу в літії, нікелі, кобальті, марганці, міді, графіті та інших матеріалах, необхідних для виготовлення акумуляторів, електронних компонентів і систем накопичення енергії. Зростання попиту стимулює видобуток сировини, перероблення концентратів, виробництво активних матеріалів, складання акумуляторних елементів і розвиток технологій повторного використання та рециклінгу. Унаслідок цього формуються виробничі ланцюги, в яких працівники можуть контактувати з різними металами, їхніми сполуками, пилом, аерозолями, електролітами та продуктами термічного розкладання. Професійний ризик у цьому секторі не можна оцінювати лише за назвою матеріалу: він залежить від хімічної форми, технологічної операції, способу поводження з речовиною, рівня контролю експозиції та можливого поєднання агентів [4, 5].

Для професійної медицини важливо розглядати повний життєвий цикл матеріалу — від видобутку й первинного збагачення до виготовлення виробу, ремонту, повторного використання та перероблення відходів. Небезпеки на цих етапах не є однаковими. У гірничодобувній промисловості значення мають мінеральний пил, аерозолі металів, фізичні навантаження, шум, вібрація та травматизм. У виробництві акумуляторних

матеріалів додаються ризики контакту з металевими сполуками й технологічними хімікатами. Під час демонтажу та рециклінгу до них можуть приєднуватися забруднення продуктами руйнування компонентів, залишковим зарядом, електролітами й продуктами нагрівання пошкоджених елементів. Отже, одна й та сама сировина в різних виробничих контекстах створює відмінні профілі експозиції.

2.3.1. Видобуток і первинне перероблення критичної сировини

Видобуток і первинне перероблення металів, які використовують в акумуляторних технологіях, супроводжуються комплексом небезпек. Для працівників можуть бути значущими вдихання пилу, що містить нікель або кобальт, контакт зі сполуками металів під час дроблення, подрібнення й збагачення руди, а також експозиція до реагентів, які застосовують у гідрометалургійних процесах. Додатково слід враховувати шум, вібрацію, фізичне навантаження, несприятливий мікроклімат і ризик виробничих травм. Склад експозиції визначається геологічними умовами, способом видобутку, мінералогічним складом сировини та конкретною технологією перероблення.

Наративний огляд досліджень щодо видобутку металів для літій-іонних акумуляторів виявив повідомлення про токсикологічні небезпеки в дослідженнях впливу кобальту, нікелю, марганцю та літію, хоча кількість і якість даних істотно відрізнялися між металами. У розглянутій авторами літературі експозиція під час видобутку кобальту й нікелю частіше асоціювалася з респіраторними ефектами, а марганцю — з неврологічною токсичністю. Водночас автори не виявили досліджень, які безпосередньо оцінювали б токсичність літію саме в умовах його видобутку, що підкреслює нерівномірність доказової бази [4]. Ці результати не дають підстав переносити однакові висновки на всі шахти або виробничі процеси, але обґрунтовують необхідність оцінювання експозиції за конкретними операціями.

У клінічному контексті важливо не зводити професійний ризик до одного металу. Працівник може одночасно контактувати з пилом породи, сполуками кількох металів, реагентами й продуктами технологічних процесів. За таких умов симптоми з боку дихальної системи, шкіри або нервової системи потребують зіставлення з професійним анамнезом, даними гігієнічних вимірювань і, коли це обґрунтовано, результатами біологічного моніторингу. Сам факт роботи на підприємстві з видобутку критичної сировини не встановлює професійного походження захворювання, так само як відсутність одного специфічного маркера не виключає комбінованої експозиції.

2.3.2. Виробництво літій-іонних акумуляторів: метали, електроліти та комбінований вплив

Виробництво літій-іонних акумуляторів охоплює підготовку активних матеріалів електродів, нанесення покриттів, сушіння, каландрування, складання елементів, заповнення електролітом, герметизацію та випробування. На окремих етапах можливий контакт із порошковими матеріалами, що містять нікель, кобальт або марганець, із графітом та іншими компонентами електродів, а також із розчинниками, солями електроліту й допоміжними хімічними речовинами. Автоматизація може зменшувати контакт у стандартному виробничому циклі, але не усуває його під час завантаження сировини, очищення обладнання, ремонту, усунення несправностей і роботи з відходами.

Перспективна стаття GreenWorkLiB наголошує, що знання про професійні експозиції в сучасному виробництві та рециклінгу літій-іонних акумуляторів залишаються обмеженими й значною мірою спираються на дані з інших виробничих середовищ. Водночас для цієї галузі характерні нові поєднання металів і хімічних речовин, а ручні операції зберігаються навіть на спеціалізованих автоматизованих підприємствах. Автори окремо виділяють прогалини в оцінюванні інгаляційного та шкірного надходження речовин, внутрішньої дози, комбінованої експозиції

та можливих наслідків для здоров'я [5]. Це означає, що оцінка безпеки не повинна обмежуватися перевіркою повітря робочої зони в одній точці або аналізом лише одного хімічного агента.

Дані про працівників акумуляторної галузі поступово доповнюють загальну картину. У поперечному дослідженні 1298 працівників із 22 підприємств у Південній Кореї підвищені концентрації нікелю та кобальту в сечі були пов'язані з більшою ймовірністю повідомлень про респіраторні та шкірні симптоми. Найвищі концентрації нікелю спостерігалися у працівників виробництва літієвих матеріалів і рециклінгу, а кобальту — у виробництві активного катодного матеріалу та рециклінгу [21]. Оскільки дослідження мало поперечний дизайн, а симптоми оцінювали за опитувальними даними, його результати слід трактувати як свідчення асоціації, а не як остаточне встановлення причинного зв'язку або доказ конкретної професійної нозології.

Професійний ризик також залежить від типу акумуляторної хімії. Не всі літій-іонні батареї мають однаковий склад катодного матеріалу; відповідно, потенційні експозиції до нікелю, кобальту, марганцю та інших компонентів можуть відрізнятися. Крім того, небезпеку становлять електроліти, реакційноздатні компоненти та продукти їхнього розкладання. Тому під час оцінювання робочого місця необхідно використовувати фактичні паспорти безпеки матеріалів і технологічну документацію, а не робити висновки лише за загальним позначенням «виробництво літій-іонних акумуляторів».

Окрему категорію становлять аварійні сценарії: пошкодження елемента, коротке замикання, перегрівання, займання або тепловий розгін. У таких випадках поряд із ризиком опіків, пожежі та вибуху можливе вивільнення токсичних продуктів горіння й розкладання. Управління ризиком має передбачати розмежування штатних технологічних операцій і аварійного реагування, процедури ізоляції пошкоджених елементів, вентиляцію, навчання персоналу та засоби захисту, визначені відповідно до характеру аварії [22]. Такі події не слід описувати як звичайну хімічну експозицію: їхні гострі наслідки та вимоги до реагування потребують окремого планування.

2.3.3. Рециклінг акумуляторів і нові виробничі експозиції

Рециклінг акумуляторів має зменшувати потребу у первинному видобутку сировини та сприяти повторному використанню матеріалів. Проте екологічна доцільність повернення металів у виробничий цикл не означає автоматичної безпечності всіх операцій перероблення. Ризик залежить від конструкції батареї, її хімічного складу, ступеня пошкодження, способу розрядження, розбирання та подальшого відновлення матеріалів. Механічне подрібнення, сортування, термічне оброблення й гідрометалургійне вилуговування створюють різні комбінації небезпек.

Під час приймання, сортування та ручного демонтажу працівники можуть контактувати з пошкодженими елементами, металевими частинками, пилом, залишками електроліту й забрудненими поверхнями. Механічна обробка може утворювати аерозолі та дрібнодисперсні частинки, тоді як термічні процеси здатні спричиняти утворення газів і парів. У гідрометалургії значення мають кислоти, луги, екстрагенти та інші реагенти, що використовуються для вилучення металів. Усі ці операції вимагають окремого аналізу небезпек; узагальнена оцінка підприємства як «переробного» не відображає реальної структури експозиції.

У перспективі GreenWorkLiB підкреслено, що для виробництва й рециклінгу літій-іонних акумуляторів залишаються невирішеними питання вимірювання експозицій через повітря та шкіру, оцінювання внутрішньої дози й контролю сумішей [5]. Отже, для належного управління ризиком доцільно поєднувати вимірювання забруднення повітря, оцінювання можливого контакту зі шкірою та аналіз робочих завдань. Біологічний моніторинг може бути корисним за наявності валідованого показника, відповідного часу відбору проб і зрозумілої інтерпретації результату; він не замінює вимірювання експозиції та клінічної оцінки.

З погляду профілактики пріоритет мають безпечне знеструмлення й розрядження батарей перед демонтажем, механізоване поводження з елементами, локальне видалення

забруднень, герметизація процесів, розділення зон приймання та оброблення, контроль займання й теплового розгону, а також процедури поводження з пошкодженими акумуляторами. Під час термічного та хімічного перероблення необхідні інженерні засоби контролю, що відповідають конкретному процесу. Засоби індивідуального захисту підбирають за результатами оцінювання ризику, з урахуванням одночасної можливості інгаляційного, шкірного та аварійного впливу.

2.3.4. Електронні відходи: металеві забруднювачі, продукти термічного розкладання та неформальна зайнятість

Електронні відходи охоплюють широкий спектр обладнання — від комп'ютерів і мобільних телефонів до побутової техніки, медичних пристроїв і промислових електронних систем. Їхній склад неоднорідний і може включати свинець, ртуть, кадмій, нікель, мідь, хром, антипірени та інші речовини, а також компоненти, які утворюють небезпечні продукти під час нагрівання або спалювання. Тому характер впливу визначається не лише складом відходів, а й методом їхнього розбирання, сортування та відновлення цінних матеріалів.

За даними ВООЗ, у 2022 році у світі утворилося приблизно 62 млн. тонн електронних відходів, а документально підтверджена частка їхнього формального збирання й перероблення становила 22,3%. Небезпечні практики поводження з електронними відходами — зокрема відкрите спалювання, нагрівання, кислотне вилуговування, подрібнення та ручне розбирання без належного контролю — можуть вивільняти забруднювачі в повітря, пил, ґрунт і воду [23]. Наведені глобальні показники характеризують масштаб проблеми управління відходами, але самі по собі не визначають рівень професійної експозиції на конкретному підприємстві.

Для працівників формальних переробних підприємств ризики пов'язані з демонтажем, сортуванням, подрібненням,

відділенням компонентів, очищенням обладнання та обслуговуванням систем вентиляції. Можливі інгаляційний контакт із пилом і аерозолями, потрапляння забруднень до рота через руки та їжу, а також шкірний контакт із забрудненими поверхнями. Під час нагрівання або спалювання ізоляційних матеріалів можуть утворюватися складні суміші газів, парів і частинок. У разі кислотного вилуговування додаткового значення набувають корозійні та реакційноздатні реагенти. Окремо слід ураховувати механічні травми, порізи, шум, ручне переміщення вантажів і ризики пожежі.

Особливо складними для профілактики є неформальні та неконтрольовані форми перероблення, де відсутні стабільні технологічні процеси, вентиляція, навчання, медичний нагляд і належні засоби захисту. ВООЗ звертає увагу на небезпеку відкритого спалювання, нагрівання та інших неналежних методів відновлення матеріалів, які спричиняють забруднення довкілля й можуть створювати ризики як для працівників, так і для населення прилеглих територій [23]. Для професійної медицини це означає, що оцінювання впливу не завжди може обмежуватися формальною назвою професії: важливо встановити фактичні завдання, матеріали, умови праці та можливість перенесення забруднень у житлове середовище.

Дані про наслідки впливу окремих компонентів електронних відходів не слід механічно переносити на всі переробні майданчики. Рівень ризику залежить від концентрації й тривалості впливу, хімічної форми речовин, способу їх надходження, ефективності вентиляції та гігієнічних практик. У наукових і клінічних висновках необхідно розрізняти підтверджені професійні захворювання, асоціації, виявлені в епідеміологічних дослідженнях, і потенційні наслідки, для яких доказів поки недостатньо. Особливу увагу слід приділяти працівникам, які виконують кілька операцій без чіткого розмежування робочих зон і можуть зазнавати комбінованого впливу.

2.3.5. Порівняння експозицій у ланцюгу критичної сировини

Для практичного оцінювання професійного ризику доцільно зіставляти не лише окремі матеріали, а й виробничі етапи, типові завдання та шляхи контакту. У таблиці 8 узагальнено основні сценарії експозиції, що можуть виникати у видобутку критичної сировини, виробництві акумуляторів, їхньому рециклінгу та переробленні електронних відходів.

Таблиця 8

Основні виробничі сценарії експозиції в ланцюгу критичної сировини, акумуляторів та електронних відходів

Виробничий етап	Потенційні небезпечні агенти	Операції, що потребують особливої уваги	Пріоритетні напрями профілактики
Видобуток і збагачення руди	Мінеральний пил, сполуки нікелю, кобальту й марганцю, технологічні реагенти	Буріння, дроблення, подрібнення, збагачення, очищення обладнання	Пригнічення пилу, закриті системи, вентиляція, контроль повітря робочої зони
Виробництво активних матеріалів і акумуляторних елементів	Порошки металовмісних матеріалів, графіт, розчинники, електроліти	Дозування сировини, нанесення покриттів, очищення, ремонт	Герметизація, локальна витяжка, безпечне поводження з хімікатами, оцінювання шкірної експозиції
Приймання й демонтаж використаних акумуляторів	Металеві частинки, залишки електроліту, електрична енергія, продукти пошкодження	Сортування, розряджання, розбирання, робота з пошкодженими елементами	Безпечне знеструмлення, механізація, розмежування зон, план реагування на аварії

Продовження табл. 8

Механічний або термічний рециклінг батарей	Пил, аерозолі металів, гази й пари, продукти термічного розкладання	Подрібнення, сепарація, нагрівання, очищення фільтрів	Закритий процес, локальне видалення забруднень, контроль викидів і технічне обслуговування
Перероблення електронних відходів	Свинець, ртуть, кадмій, нікель, антипірени, пил і продукти нагрівання	Ручне розбирання, подрібнення, нагрівання, спалювання, кислотне вилуговування	Відмова від відкритого спалювання, контрольовані процеси, гігієна рук, вентиляція та належне поводження з відходами

Джерело: авторське узагальнення на основі [4, 5, 21–23]. Наведені агенти є потенційними для відповідних процесів; їх фактична наявність і рівень експозиції мають бути підтверджені оцінюванням конкретного робочого місця.

Таблиця демонструє, що в межах одного виробничого ланцюга поєднуються хімічні, фізичні та травматичні небезпеки, а характер експозиції змінюється залежно від операції. Тому профілактична система має охоплювати не лише основне виробництво, а й приймання матеріалів, ремонт, очищення, аварійне реагування та поводження з відходами. Важливо також оцінювати можливість вторинного перенесення забруднень через одяг, інструменти й поверхні, особливо там, де робочі та побутові зони недостатньо розмежовані.

2.3.6. Профілактика та завдання професійної медицини

Першим етапом профілактики має бути технологічна інвентаризація: визначення складу сировини й матеріалів, опис процесів, виявлення операцій, під час яких речовини можуть переходити в повітря або потрапляти на шкіру, та оцінювання

можливих аварійних сценаріїв. Для підприємств, які працюють з акумуляторами й електронними відходами, така інвентаризація повинна регулярно оновлюватися після зміни хімічного складу продукції, технології, обладнання або обсягу перероблення.

Контроль ризику доцільно будувати відповідно до ієрархії профілактичних заходів: усунення небезпечної операції або заміна матеріалу, коли це можливо; використання закритого обладнання та автоматизації; локальна витяжна вентиляція й ефективне технічне обслуговування; організаційні заходи та навчання; засоби індивідуального захисту як додатковий рівень контролю. Для рециклінгу акумуляторів особливо важливі безпечне розрядження й знеструмлення, розмежування зон для справних і пошкоджених елементів, протипожежні процедури та навчання діям у разі теплового розгону. Для електронних відходів принциповим є недопущення відкритого спалювання й неконтрольованого нагрівання, а також організація контрольованого демонтажу й видалення пилу.

Моніторинг професійної експозиції має відповідати конкретним агентам і технологічним операціям. Вимірювання повітря робочої зони доцільно доповнювати оцінюванням забруднення поверхонь і шкірного контакту, якщо такий шлях надходження є правдоподібним. Біологічний моніторинг може застосовуватися для окремих металів за наявності валідованих методик і критеріїв інтерпретації, однак його результати слід розглядати разом із даними про робочі завдання, час відбору проб і можливі позапрофесійні джерела надходження. Одноразове вимірювання або один біологічний показник не завжди відображають коливання експозиції протягом робочого циклу.

Професійний анамнез працівників цього сектору повинен включати не тільки назву підприємства й посаду, а й конкретні матеріали, виконувані операції, тривалість роботи на кожній ділянці, участь у ремонті та очищенні обладнання, випадки аварійного контакту, використання вентиляції й засобів захисту. За наявності симптомів з боку дихальної системи, шкіри або нервової системи клінічну оцінку необхідно співвідносити з експозиційними даними й диференційною діагностикою.

Виявлення підвищеного біологічного показника чи групових симптомів може бути підставою для додаткового обстеження умов праці, але не замінює встановлення діагнозу та оцінювання причинного зв'язку.

Окремим завданням є захист працівників малих підприємств і неформального сектору. Там, де відсутні систематичний контроль експозиції, формалізоване навчання й доступ до медичного нагляду, пріоритетними є усунення найбільш небезпечних практик, запровадження контрольованих технологічних процесів, доступні засоби захисту та залучення служб охорони праці й охорони здоров'я. Водночас необхідно уникати перенесення відповідальності за контроль небезпек виключно на працівника: основні рішення мають стосуватися організації процесу, технічного контролю й безпечного управління матеріалами.

Таким чином, ланцюг критичної сировини, виробництва акумуляторів і перероблення електронних відходів демонструє, що «зелений» або циркулярний характер технології сам по собі не гарантує безпечності робочого середовища. Розширення рециклінгу може зменшувати потребу в первинних ресурсах, однак одночасно створює нові завдання для гігієни праці, токсикології та професійної медицини. Найбільш обґрунтований підхід полягає в оцінюванні кожної технологічної операції, урахуванні комбінованих експозицій і невизначеності доказів, а також у поєднанні інженерного контролю з моніторингом експозиції та клінічним спостереженням. Це створює підґрунтя для наступного підрозділу про ризики, пов'язані з відновлюваною енергетикою та переходом до циркулярної економіки.

2.4. Відновлювана енергетика, циркулярна економіка та ризики зеленого переходу

Розвиток відновлюваної енергетики й циркулярної економіки змінює структуру зайнятості та характер виробничих завдань у будівництві, промисловому виробництві, енергетиці, ремонті

й перероблення відходів. До відповідних секторів належать виробництво та монтаж сонячних панелей, спорудження й обслуговування вітроенергетичних установок, виробництво біоенергії, модернізація будівель, сортування та перероблення матеріалів. Ці види діяльності можуть зменшувати екологічне навантаження або сприяти ефективнішому використанню ресурсів, але не є автоматично безпечними для працівників. Європейське агентство з безпеки та гігієни праці наголошує, що «зелені» технології можуть поєднувати традиційні небезпеки в нових виробничих умовах або створювати нові комбінації хімічних, фізичних, ергономічних та організаційних ризиків [24, 25].

Для профпатології принциповим є розмежування екологічної користі технології та її впливу на здоров'я працівників. Зниження викидів парникових газів або скорочення використання первинної сировини не є прямим показником безпечності виробничого процесу. Наприклад, монтаж фотоелектричних модулів пов'язаний із ризиком падіння з висоти, електротравми, теплового навантаження та ручного переміщення важких конструкцій; виготовлення лопатей вітротурбін може передбачати контакт із полімерними смолами, розчинниками та пилом; перероблення обладнання наприкінці строку служби може створювати експозиції до металів, композитів і продуктів руйнування матеріалів. Відповідно, оцінювання професійного ризику має охоплювати весь життєвий цикл технології, а не лише етап її експлуатації.

Огляд Vitale та співавторів, присвячений емерджентним професійним ризикам у «зелених» робочих місцях, підкреслює, що ризикові профілі формуються під впливом швидкого впровадження нових технологій, матеріалів, процесів і способів організації праці. Автори описують поєднання небезпек для безпеки, фізичного здоров'я та психосоціального благополуччя, водночас відзначаючи обмеженість наукової літератури щодо частини нових виробничих сценаріїв [24]. Це важливе застереження: наявність потенційно небезпечного агента або операції обґрунтовує оцінювання експозиції, але сама по собі не доводить існування нового професійного захворювання.

2.4.1. Вітроенергетика: виробництво, монтаж та обслуговування установок

Професійні ризики у вітроенергетиці змінюються залежно від етапу роботи. Під час виготовлення компонентів працівники можуть виконувати операції з оброблення металу, зварювання, нанесення покриттів, формування композитних матеріалів і використання полімерних смол. У виробництві лопатей можуть застосовуватися епоксидні смоли, затверджувачі, розчинники та інші хімічні компоненти, які за певних умов здатні спричиняти подразнення шкіри й дихальних шляхів або професійну контактну сенсибілізацію. Характер і рівень ризику залежать від конкретного складу матеріалу, способу нанесення, вентиляції, тривалості контакту та застосованих засобів контролю [24, 25].

Під час монтажу вітротурбін значущими є роботи на висоті, підіймання й переміщення великогабаритних деталей, використання кранів, електричні небезпеки, шум, несприятливі погодні умови та фізичне навантаження. Висота споруди й обмежений доступ до окремих робочих зон ускладнюють евакуацію та надання допомоги в разі травми. Для морських вітроенергетичних установок додаткове значення мають переміщення персоналу між судном і платформою, погодні обмеження, віддаленість від медичних закладів і необхідність організовувати аварійне реагування в умовах обмеженої доступності. Ці чинники переважно стосуються виробничої безпеки, але можуть впливати й на здоров'я через фізичне перевантаження, втому та стрес.

Експлуатація й технічне обслуговування турбін створюють інший профіль впливу. Працівники можуть тривалий час перебувати всередині гондоли, виконувати ремонт у незручних позах, підійматися сходами або працювати в обмеженому просторі. Під час обслуговування механічних вузлів використовують мастильні матеріали, очищувачі, фарби та розчинники; за неналежної вентиляції контакт із їхніми парами або аерозолями може зростати. Роботи на канатах, у гондолі або на лопатях потребують спеціального навчання та організаційного контролю, оскільки

небезпеки визначаються не тільки властивостями матеріалів, а й способом виконання роботи.

Дослідження Cunha, Silva та Macedo на прикладі обслуговування наземних вітротурбін у Португалії звернуло увагу на поєднання фізичних і психосоціальних чинників. Учасники повідомляли про роботу за несприятливої погоди, перебування на висоті й у замкнених просторах, тривале виконання завдань у гондолі та відчуття прискореного професійного зношування. Автори наголошували на значенні фактичної організації роботи, тривалості зміни та планування технічних втручань [26]. Це дослідження має характер розвідувального кейс-стаді, тому його результати не можна автоматично поширювати на всіх працівників вітроенергетики. Водночас воно демонструє, чому аналіз ризику має включати реальну трудову діяльність, а не обмежуватися формальним переліком небезпек.

Для професійної медицини важливо враховувати, що симптоми опорно-рухового апарату, дерматологічні прояви, респіраторні скарги та порушення сну можуть мати різні причини й потребують диференційованого оцінювання. Наприклад, контактний дерматит у працівника, який працює зі смолами, потребує аналізу конкретних матеріалів і можливого сенсибілізувального впливу; біль у спині чи плечовому поясі — оцінювання пози, повторюваності операцій, ваги обладнання та тривалості роботи; втома й порушення сну — аналізу графіка, тривалості змін, віддаленості робочого місця та організації чергувань. Не слід об'єднувати ці прояви в одну «хворобу зеленого переходу»: йдеться про різні стани, для яких професійний зв'язок установлюють на підставі відповідних доказів.

2.4.2. Сонячна енергетика: монтаж, експлуатація та завершення життєвого циклу панелей

У секторі сонячної енергетики потрібно розрізняти ризики виробництва фотоелектричних модулів, монтажу систем, їхнього технічного обслуговування та демонтажу. Під час виробництва

фотоелектричних елементів можуть використовуватися напівпровідникові матеріали й хімічні речовини, склад яких залежить від технології панелі. Тому не можна припускати, що всі панелі мають однаковий токсикологічний профіль. Для оцінювання ризику потрібні відомості про тип елемента, хімічний склад матеріалів, технологічні операції та можливість їхнього вивільнення в повітря або на поверхні.

Монтаж сонячних панелей на дахах і наземних конструкціях пов'язаний із падінням з висоти, електротравмами, порізами, ручним переміщенням модулів, роботою в незручних позах і впливом погодних умов. Навіть за відключення системи від мережі необхідно враховувати електричні небезпеки, пов'язані з освітленням фотоелектричних модулів та особливостями конкретної електричної схеми. У спекотні періоди монтажники можуть працювати на відкритих майданчиках або покрівлях із високим тепловим навантаженням. Поєднання тепла, фізичної роботи, захисного одягу та обмеженого доступу до питної води підвищує значення профілактики теплового стресу.

Систематичний огляд Duroha та Macht про професійні ризики монтажу сонячних систем відібрав 31 публікацію для аналізу з 365 первинно визначених робіт. Автори виокремили чотири основні групи небезпек: електричні й пожежні ризики, теплове навантаження, ручне переміщення матеріалів і падіння. Вони також зазначили, що дані про травматизм та ефективність заходів контролю залишаються нерівномірними, особливо щодо ергономіки й теплового стресу [27]. Отже, наявні дані підтверджують необхідність комплексної профілактики, але не дають підстав вважати всі види монтажу однаково небезпечними.

Експлуатація й ремонт сонячних електростанцій потребують роботи з електричними компонентами, кабелями, інверторами, комутаційними пристроями та конструкціями, які можуть бути розташовані на значній площі й у віддалених місцях. Під час технічного обслуговування важливі безпечне відключення обладнання, контроль залишкової електричної небезпеки, оцінювання доступу до покрівель і платформ, а також планування роботи з урахуванням температури та погодних умов. Пожежа

на фотоелектричному об'єкті може створювати додаткові ризики для аварійних служб через електричні небезпеки, падіння конструкцій і можливе утворення диму та продуктів горіння. Конкретний хімічний склад таких продуктів залежить від матеріалів, що горять, тому його не слід узагальнювати без аналізу обставин події [25].

Наприкінці строку служби панелей зростає значення безпечного демонтажу, сортування й перероблення. Деякі технології містять матеріали, які потребують контрольованого поводження, зокрема окремі напівпровідникові сполуки та метали. Розбирання модулів може супроводжуватися механічними травмами, утворенням пилу й контактом із компонентами, що вивільняються внаслідок руйнування. Працівники, які займаються переробленням, потребують не лише загальних інструкцій для роботи з відходами, а й інформації про тип панелей, метод перероблення та контроль конкретних небезпечних речовин. Таким чином, оцінювання професійного ризику в сонячній енергетиці має охоплювати весь цикл — від виробництва до утилізації.

2.4.3. Біоенергетика та інші технології циркулярної економіки

Біоенергетичні процеси, зокрема виробництво біогазу, біомаси й біопалива, можуть створювати небезпеки, відмінні від тих, що характерні для сонячної та вітрової енергетики. Залежно від сировини й технології працівники можуть контактувати з органічним пилом, пліснявими грибами, ендотоксинами, леткими органічними сполуками, продуктами біологічного розкладання та технологічними газами. Під час зберігання й перероблення біомаси необхідно враховувати ризик займання, вибуху пилоповітряних сумішей, дефіциту кисню або накопичення небезпечних газів у замкнених просторах. Ці небезпеки добре відомі в інших галузях, однак їх поєднання в нових технологічних схемах може змінювати умови експозиції та вимоги до профілактики [24, 25].

У процесах компостування, сортування й перероблення відходів можливі інгаляційний вплив біоаерозолів і пилу, контакт із забрудненими поверхнями, ручне переміщення вантажів, шум, порізи та травми. На окремих підприємствах можуть одночасно існувати хімічні й біологічні небезпеки, а також ризики, пов'язані з рухом транспорту й роботою механізмів. Наявність біологічного агента в матеріалі не означає, що працівник обов'язково захворіє: значення мають концентрація, життєздатність агента, шлях надходження, тривалість контакту, стан вентиляції та індивідуальні чинники сприйнятливості. Тому контроль має ґрунтуватися на оцінюванні процесу, а не на загальному припущенні про небезпечність усіх органічних відходів.

Циркулярна економіка передбачає продовження строку використання матеріалів, ремонт, повторне використання, відновлення та перероблення. Однак повторне введення матеріалу у виробничий цикл може створювати додаткові експозиції, якщо склад відходів невідомий, забруднення не ідентифіковані або технологія перероблення не забезпечує належного контролю. Це стосується електронних компонентів, акумуляторів, композитів, полімерів, будівельних матеріалів і обладнання, що містить хімічні добавки. У таких умовах важливими є простежуваність матеріалу, маркування, доступність паспортів безпеки, контрольоване сортування та технологічна сегрегація потоків відходів.

З позиції професійної медицини працівників циркулярної економіки не слід розглядати як однорідну групу. Ризики сортувальника, оператора подрібнювальної лінії, фахівця з хімічного вилучення металів, ремонтника й водія відрізняються за складом агентів, інтенсивністю експозиції та ймовірністю травмування. Професійний анамнез має фіксувати конкретні операції й матеріали, а медичне спостереження — відповідати виявленим небезпекам. Особливу увагу потрібно приділяти тим працівникам, які виконують кілька функцій, переходять між ділянками або залучаються до очищення та аварійного обслуговування.

2.4.4. Психосоціальні та організаційні ризики «зелених» професій

Фізичні й хімічні небезпеки не вичерпують професійного ризику в секторах відновлюваної енергетики. Монтажні та сервісні бригади можуть працювати у віддалених місцях, за змінних погодних умов, із тривалими переїздами, нерегулярним графіком і високими вимогами до виконання робіт у короткі технологічні вікна. Для морських вітропарків додатковими чинниками є віддаленість від берега та обмеження евакуації; для монтажу сонячних систем — сезонність і необхідність виконувати роботи на відкритому повітрі. У поєднанні з високою відповідальністю за безпеку такі умови можуть підвищувати втому й психологічне напруження.

Дослідження працівників технічного обслуговування вітротурбін [26] показало, що сприйняття здоров'я пов'язане не лише з фізичними умовами, а й з організацією діяльності, тривалістю роботи всередині гондоли, плануванням виїздів і можливістю відновлення. Водночас доказів недостатньо, щоб робити висновок про єдиний специфічний психічний розлад, характерний для працівників відновлюваної енергетики. Доцільніше оцінювати конкретні психосоціальні чинники — контроль над роботою, підтримку команди, передбачуваність графіка, навантаження, якість навчання та можливість повідомляти про небезпечні умови без побоювання негативних наслідків.

Швидке розширення сектору може залучати працівників із різним рівнем підготовки, зокрема тих, хто переходить з інших галузей. Якщо навчання не відповідає складності технології, виникає розрив між формальним допуском до роботи та практичною компетентністю. У таких умовах індивідуальні інструктажі не можуть повністю компенсувати недоліки планування, кадрового забезпечення, технічного обслуговування чи організації аварійного реагування. Профілактика має поєднувати навчання з перевіркою практичних навичок, належним плануванням робіт, управлінням втомою та можливістю зупинити небезпечну операцію.

2.4.5. Профілактика ризиків упродовж життєвого циклу технології

Для запобігання професійним захворюванням і травмам у секторах відновлюваної енергетики доцільно застосовувати підхід життєвого циклу. На етапі проєктування й вибору матеріалів необхідно враховувати не лише енергоефективність та екологічні характеристики, а й можливість безпечного виготовлення, монтажу, ремонту й демонтажу. На етапі виробництва важливі замкнуті технологічні системи, локальна витяжна вентиляція, контроль контакту зі смолами, розчинниками та пилом, а також ергономічне проєктування робочих місць. Під час монтажу та обслуговування пріоритетними є запобігання падінням, електрична безпека, контроль теплового навантаження, безпечне переміщення вантажів і планування аварійного реагування [25, 27].

Управління хімічними ризиками має спиратися на ідентифікацію конкретних речовин і процесів. Необхідно забезпечити доступ до актуальних паспортів безпеки, оцінювати інгаляційний і шкірний шляхи надходження, а також переглядати заходи контролю після зміни матеріалу або технології. Для композитних матеріалів, покриттів і напівпровідникових компонентів особливо важливо не узагальнювати небезпеку за назвою технологічного сектору: ризик залежить від складу матеріалу та операції, що може спричинити його вивільнення. Там, де доказів щодо віддалених ефектів недостатньо, потрібні контроль експозиції та обґрунтовані запобіжні заходи, а не безпідставне проголошення нового професійного захворювання.

Тепловий стрес слід оцінювати з урахуванням температури, сонячного випромінювання, фізичної інтенсивності роботи, захисного одягу, доступу до води та можливості відпочинку в прохолодній зоні. Для робіт на дахах, відкритих майданчиках і вітроенергетичних об’єктах важливо мати критерії перенесення або припинення робіт за небезпечних погодних умов. Планування зміни має враховувати сезонність, тривалість переїздів, доступність медичної допомоги та реальну можливість

дотримання перерв. Навчання працівників щодо ранніх проявів теплового виснаження є важливим, але має доповнювати організаційні й технічні заходи, а не замінювати їх.

Для робіт на висоті, у замкнених просторах і з електрообладнанням потрібні спеціалізовані процедури, допуск підготовленого персоналу, перевірка обладнання, план рятувальних робіт і доступність засобів зв'язку. У віддалених вітропарках та на великих сонячних об'єктах план аварійного реагування має враховувати час прибуття допомоги й можливість евакуації. Засоби індивідуального захисту повинні відповідати оціненому ризику й бути сумісними з іншими засобами, що використовуються одночасно. Їх застосування не компенсує відсутність колективного захисту, неналежного планування чи небезпечного обладнання.

У професійно-медичному спостереженні необхідно поєднувати дані про конкретні виробничі завдання з клінічними проявами та результатами гігієнічної оцінки. Для працівників, які контактують зі смолами, розчинниками або пилом, обсяг спостереження визначають відповідно до матеріалів і можливих ефектів; для монтажників — також з огляду на теплове навантаження, фізичну працю й ризики опорно-рухових порушень. Систематичний облік інцидентів, симптомів, небезпечних ситуацій і змін технологічних процесів дає змогу виявляти повторювані проблеми, але не замінює індивідуальної клінічної оцінки. Виявлені асоціації слід перевіряти з урахуванням можливих альтернативних причин та якості даних про експозицію.

У таблиці 9 узагальнено основні виробничі сценарії в секторах відновлюваної енергетики та циркулярної економіки, а також напрями профілактики, які мають визначатися за результатами оцінювання конкретного робочого місця.

Наведена систематизація показує, що профілактика у «зелених» секторах не може бути універсальною: заходи мають відповідати конкретним операціям і поєднанню небезпек. У частині випадків домінують ризики травмування й електробезпеки, в інших — хімічні, біологічні, ергономічні або психосоціальні чинники. Водночас в одній трудовій ситуації вони можуть діяти одночасно, наприклад коли працівник виконує фізично складне

Таблиця 9

Потенційні професійні небезпеки у секторах відновлюваної енергетики та циркулярної економіки

Сектор і етап	Основні потенційні небезпеки	Напрями оцінювання	Пріоритетні заходи профілактики
Виробництво компонентів вітротурбін	Смоли, затверджувачі, розчинники, пил, шум, фізичне навантаження	Склад матеріалів, інгаляційний і шкірний контакт, умови вентиляції	Заміна небезпечних матеріалів за можливості, закриті процеси, локальна витяжка, контроль шкірного контакту
Монтаж та обслуговування вітротурбін	Падіння з висоти, електричні небезпеки, несприятлива погода, фізичне навантаження, втома	Оцінювання робочих завдань, графіка, умов доступу й аварійного реагування	Системи захисту від падіння, підготовка персоналу, план рятування, контроль графіка й відновлення
Монтаж сонячних панелей	Падіння, електротравми, тепловий стрес, ручне переміщення модулів	Погодні умови, ергономіка, електричні схеми, організація робіт на висоті	Захист від падіння, безпечне відключення, механізація переміщення, вода, перерви та перенесення робіт за небезпечних умов
Виробництво та перероблення фотоелектричних модулів	Залежні від технології напівпровідникові матеріали, пил, хімічні реагенти	Тип панелі, склад матеріалів, операції, що спричиняють вивільнення	Контрольоване поводження з матеріалами, вентиляція, безпечний демонтаж і сегрегація відходів
Біоенергетика та перероблення органічних відходів	Органічний пил, біоаерозолі, ендотоксини, гази, пожежа й вибух	Характер сировини, вентиляція, замкнені простори, ризик біологічного та хімічного впливу	Закриті процеси, контроль пилу й газів, безпечний доступ до замкнених просторів, профілактика пожеж і вибухів

Продовження табл. 9

Сортування й рециклінг матеріалів	Пил, метали, хімічні добавки, порізи, ручне переміщення вантажів	Склад потоку відходів, конкретні операції, можливість комбінованої експозиції	Простежуваність матеріалів, механізація, вентиляція, гігієна рук, контрольовані технологічні процеси

Джерело: авторське узагальнення на основі [24–27]. Наявність конкретного агента та рівень ризику мають бути підтверджені для відповідного процесу й робочого місця.

завдання на висоті в умовах спеки або контактує з хімічними матеріалами під час ремонтної операції.

Таким чином, відновлювана енергетика та циркулярна економіка створюють не єдину нову категорію професійних захворювань, а різноманітні виробничі контексти, в яких відомі небезпеки поєднуються по-новому, а окремі експозиції ще недостатньо досліджені. Науково обґрунтована оцінка потребує розмежування встановлених наслідків для здоров'я, епідеміологічних асоціацій і потенційних ризиків. Для професійної медицини пріоритетом є раннє виявлення небезпечних експозицій, документування конкретних робочих завдань, профілактика комбінованого впливу та систематичне оновлення оцінювання після змін технології. Цей підхід створює перехід до наступного підрозділу про біотехнології та нові біологічні агенти, де значення матимуть інші механізми експозиції й профілактики.

2.5. Біотехнології та нові біологічні агенти

Біотехнології охоплюють широкий спектр процесів — від лабораторного культивування клітин і мікроорганізмів до виробництва вакцин, рекомбінантних білків, ферментів, діагностичних реагентів, клітинних продуктів і біофармацевтичних препаратів. Вони застосовуються в медицині, фармацевтичній

промисловості, сільському господарстві, харчовому виробництві, екологічних технологіях та наукових дослідженнях. Для працівників цих секторів потенційні небезпеки не обмежуються інфекційними мікроорганізмами: значення можуть мати біологічні матеріали невизначеного складу, алергени, ендотоксини, ферменти, клітинні компоненти, технологічні хімікати, дезінфекційні засоби та фізичні чинники, пов'язані з обладнанням і способом організації роботи [28, 29].

Поняття «нові біологічні агенти» не слід автоматично ототожнювати з новими патогенами. У професійному контексті емерджентність може стосуватися щонайменше чотирьох ситуацій: появи раніше не використовуваного агента; застосування відомого агента в новому технологічному процесі; зміни властивостей біологічного матеріалу внаслідок генетичної модифікації або іншої технологічної обробки; формування нового сценарію експозиції, коли працівник контактує з матеріалом у масштабі чи формі, які раніше були нетиповими. Водночас новизна технології сама по собі не доводить підвищеного ризику для здоров'я. Висновок має спиратися на властивості агента, можливість контакту, шлях надходження, умови експозиції та доступні докази несприятливих наслідків.

Біологічні небезпеки на робочому місці можуть бути інфекційними й неінфекційними. Інфекційний ризик виникає тоді, коли агент здатний спричиняти інфекцію за відповідних умов контакту. Неінфекційні ефекти можуть бути пов'язані з алергенністю білків, дією ендотоксинів, мікробними компонентами, біоаерозолями або біологічно активними речовинами. Систематизований огляд опублікованих оглядів з біологічних небезпек у сфері праці охопив 79 оглядів і визначив серед експонованих груп працівників лабораторій, медичних установ, сільського господарства та поводження з відходами. Автори відзначили різноманітність агентів — від інфекційних і неінфекційних біологічних чинників до ендотоксинів, органічного пилу та біоаерозолів — і нерівномірність профілактичних практик у різних секторах [29]. Цей огляд підтверджує широту проблеми, але не означає, що всі біотехнологічні працівники мають однаковий рівень ризику.

2.5.1. Біофармацевтичне виробництво та нові терапевтичні продукти

Біофармацевтичне виробництво може включати культивування клітин, ферментацію, очищення біологічних продуктів, концентрування, формуляцію, фасування й контроль якості. Ризиковий профіль залежить від того, який організм або клітинну систему використовують, який продукт виробляють і на якому етапі працівник може контактувати з біологічним матеріалом. У закритих біореакторах і автоматизованих системах контакт під час штатного процесу може бути обмеженим, але потенційні точки експозиції зберігаються під час відбору проб, під'єднання й від'єднання ліній, очищення обладнання, технічного обслуговування, розливу та ліквідації витоків.

Ризики відрізняються залежно від продукту. Виробництво рекомбінантного білка, вакцини, моноклонального антитіла, вірусного вектора або клітинного продукту не можна розглядати як єдиний тип біологічного процесу. Для частини продуктів ключовими можуть бути інфекційні властивості вихідного агента; для інших — фармакологічна активність продукту, його здатність викликати сенсибілізацію або особливості технологічних домішок. У публікації щодо встановлення професійних експозиційних меж для нових фармацевтичних модальностей наголошено, що традиційні підходи до оцінювання хімічних речовин не завжди можна безпосередньо застосувати до біологічних препаратів, генетично модифікованих організмів, онколітичних вірусів та інших нових терапевтичних продуктів [30]. Це обґрунтовує необхідність окремої оцінки небезпеки для кожного продукту, а не використання універсальної категорії «біологічний препарат».

Для працівників, які контактують із біологічно активними білками, ферментами або іншими продуктами, значення можуть мати інгаляційна експозиція аерозолями та контакт зі шкірою. Потенційними наслідками за певних умов є подразнення, сенсибілізація або інші специфічні біологічні ефекти; конкретний характер ризику залежить від властивостей речовини та рівня

контакту. При цьому небезпеку не слід визначати лише за терапевтичним призначенням продукту: речовина, яка використовується для лікування пацієнта, може потребувати спеціальних заходів захисту працівників, що виробляють або фасують її в концентрованій формі.

Для оцінювання експозиції необхідно аналізувати весь технологічний цикл, включаючи операції, які формально не є основним виробництвом. Відбір проб, очищення біореактора, заміна фільтрів, відкриття системи, усунення несправностей і деконтамінація можуть створювати інші умови контакту, ніж штатна робота обладнання. Важливі не лише середні умови протягом зміни, а й короткочасні пікові експозиції, випадкові витоки та відхилення від процедури. Документування таких подій дає змогу своєчасно переглядати оцінку ризику та коригувати заходи контролю.

2.5.2. Генетично модифіковані організми, вірусні вектори та клітинні технології

Генетично модифіковані мікроорганізми й клітинні системи використовують для синтезу біологічних продуктів, дослідження механізмів захворювань, розроблення вакцин і створення нових терапевтичних підходів. Оцінювання ризику має враховувати не лише походження організму, а й модифікацію, біологічні властивості, стабільність конструкції, здатність до реплікації, можливі шляхи поширення та конкретний сценарій контакту. Сам факт генетичної модифікації не означає автоматичного збільшення небезпеки; так само статус організму як непатогенного в одному контексті не звільняє від оцінювання ризику в іншому технологічному процесі.

Для лабораторних і виробничих операцій важливі процедури, під час яких можливе утворення аерозолів, бризок або забруднення поверхонь. До таких операцій можуть належати центрифугування, змішування, піпетування, відкривання ємностей, оброблення клітинних суспензій, робота з вірусними

векторами, очищення обладнання та поводження з відходами. Необхідні заходи визначаються на основі оцінювання конкретної діяльності: властивостей матеріалу, концентрації, обсягу, шляху потенційного надходження, тяжкості можливих наслідків і наявних засобів контролю. Такий підхід відповідає ризик-орієнтованій моделі, викладеній у четвертому виданні Посібника ВООЗ з лабораторної біобезпеки [28].

Окремого розгляду потребують вірусні вектори та клітинні продукти, які використовують у генній і клітинній терапії. Ризик залежить від конкретної конструкції, реплікативної здатності, біологічного тропізму, обсягу роботи й можливості контакту працівника з продуктом. Неприпустимо переносити оцінку одного вектора на всі інші або вважати, що будь-який вірусний вектор обов'язково спричиняє інфекцію. Водночас відсутність даних про професійні захворювання в новому технологічному процесі не є достатнім доказом відсутності ризику, особливо якщо кількість експонованих працівників невелика, спостереження коротке, а експозиція недостатньо документується.

У виробничій практиці потрібні чіткі процедури розділення чистих і потенційно забруднених зон, контрольоване переміщення матеріалів, належна робота первинних бар'єрів, безпечне поводження з гострими інструментами та валідація методів деконтамінації. Засоби індивідуального захисту мають відповідати конкретному сценарію експозиції й не можуть замінювати інженерні заходи. Після зміни конструкції організму, складу продукту, масштабу виробництва або способу оброблення ризик необхідно оцінювати повторно.

2.5.3. Лабораторні дослідження та біологічні небезпеки поза біотехнологічними підприємствами

Біологічні ризики притаманні не лише спеціалізованим біотехнологічним виробництвам. Із біологічними матеріалами працюють клінічні та діагностичні лабораторії, ветеринарні установи, дослідницькі центри, сільськогосподарські підприємства,

харчова промисловість, очисні споруди та підприємства з перероблення відходів. Відповідно, потенційна експозиція може бути пов'язана з інфекційними агентами, біологічними рідинами, культурами клітин, органічним пилом, ендотоксинами, грибковими спорами та іншими компонентами біологічного походження [29].

У лабораторному середовищі ризик визначається не тільки класифікацією агента, а й конкретною процедурою. Наприклад, робота з невеликим об'ємом матеріалу в закритій системі може мати інший профіль ризику, ніж операція, що створює аерозолі або передбачає відкриту обробку великих об'ємів. Важливими є характеристики приміщення, вентиляція, наявність і правильне використання біологічних шаф безпеки, організація деконтамінації, управління відходами, навчання персоналу та повідомлення про інциденти. Посібник ВООЗ з лабораторної біобезпеки рекомендує проводити оцінювання ризику до початку діяльності та визначати заходи контролю з урахуванням конкретних умов, а не лише формального рівня лабораторії [28].

Поза лабораторіями біологічні небезпеки можуть бути менш очевидними, оскільки працівники не завжди ідентифікують матеріал як потенційне джерело експозиції. У сільському господарстві, тваринництві, поводженні з органічними відходами й очищенні стічних вод можливі контакти з біоаерозолями, ендотоксинами, органічним пилом і мікроорганізмами. Систематизований огляд Descatha та співавторів вказав, що профілактичні практики в лабораторіях і медичних установах частіше є формалізованими, ніж у сільському господарстві та секторі відходів [29]. Це спостереження підтримує потребу в ширшому охопленні гігієнічним контролем робочих місць, де біологічний ризик не завжди є основним предметом системи управління охороною праці.

Для професійної медицини важливо розрізняти інфекційні захворювання, алергічні реакції, подразнення та інші стани, потенційно пов'язані з біологічною експозицією. Клінічні прояви можуть бути неспецифічними, а професійний контакт — переривчастим або сезонним. Тому анамнез має включати конкретні

завдання, матеріали, контакт із тваринами чи біологічними відходами, процедури очищення, інциденти, використання засобів захисту та часовий зв'язок між експозицією й симптомами. Для встановлення професійного походження потрібне зіставлення клінічних даних з епідеміологічними, лабораторними та гігієнічними доказами.

2.5.4. Біоаерозолі, ендотоксини та сенсибілізувальні біологічні компоненти

Біоаерозолі — це частинки біологічного походження, які перебувають у повітрі й можуть містити мікроорганізми, фрагменти клітин, спори, алергени, ендотоксини або інші компоненти. Їхній склад залежить від джерела, вологості, температури, способу механічної обробки, вентиляції та організації процесу. Професійний вплив біоаерозолів можливий у сільському господарстві, харчовому виробництві, лабораторіях, компостуванні, поводженні з відходами та на очисних спорудах. Проте наявність біологічного матеріалу в повітрі не дозволяє без додаткових даних зробити висновок про інфекційний ризик або конкретне захворювання [29].

Ендотоксини, що є компонентами зовнішньої мембрани грамнегативних бактерій, можуть спричиняти запальну відповідь за достатнього рівня експозиції. Органічний пил може містити суміш рослинних, тваринних, грибкових і мікробних компонентів; у таких умовах клінічні прояви можуть бути зумовлені різними механізмами, зокрема подразненням, запаленням або сенсибілізацією. Розмежування цих механізмів має практичне значення: профілактичні рішення й клінічне оцінювання не повинні ґрунтуватися на припущенні, що всі респіраторні симптоми за біологічної експозиції є інфекційними або мають однакове походження.

Для контролю біоаерозолів доцільно оцінювати джерело утворення, інтенсивність механічних операцій, вентиляцію, вологість матеріалу, локалізацію працівників і можливість

утворення пилу під час очищення. За можливості слід зменшувати утворення аерозолю, застосовувати закриті системи, локальне видалення забруднень і належні методи прибирання. Сухе підмітання або продування стисненим повітрям може повторно піднімати забруднений пил і тому потребує заміни контрольованими методами очищення. Засоби захисту органів дихання підбирають з урахуванням оціненого ризику, характеристик робочого процесу та сумісності з іншими засобами захисту.

Біологічний моніторинг не завжди є доступним або інформативним для складних сумішей біоаерозолів. Тому оцінювання може потребувати поєднання опису процесу, вимірювань відповідних компонентів, спостереження за умовами праці й аналізу групових симптомів. Якщо виявлено підвищену частоту респіраторних або алергічних проявів у працівників певної ділянки, це є підставою для поглибленого вивчення експозиції, але не автоматичним доказом професійного причинного зв'язку. Висновок має враховувати альтернативні причини, позапрофесійні контакти, сезонність і якість даних.

2.5.5. Оцінювання біологічного ризику: від властивостей агента до реальної експозиції

Оцінювання біологічного ризику має починатися з визначення агента або матеріалу, завдання, що виконується, і можливого шляху контакту. Потрібно з'ясувати, чи є агент інфекційним, чи може він викликати сенсибілізацію або інший біологічний ефект, чи здатний зберігати життєздатність за умов процесу та які наслідки можливі за реалістичного сценарію експозиції. Далі оцінюють обсяг і концентрацію матеріалу, частоту операцій, можливість утворення аерозолів, ефективність первинних бар'єрів, вентиляцію, деконтамінацію та ймовірність аварійного контакту. Саме такий ризик-орієнтований підхід лежить в основі рекомендацій ВООЗ з лабораторної біобезпеки та окремого керівництва з оцінювання ризику [28, 31].

Для біотехнологічних процесів важливо документувати зміни, які можуть впливати на ризик: заміну клітинної лінії або мікроорганізму, генетичну модифікацію, зміну масштабу виробництва, збільшення концентрації продукту, перехід від ручної операції до автоматизованої або навпаки, зміну методів очищення й утилізації. Після таких змін попередня оцінка може втратити актуальність. Повторне оцінювання має проводитися до впровадження нової процедури, а не лише після появи інциденту чи симптомів у працівників.

Важливо також розмежовувати біобезпеку та біозахист. Біобезпека спрямована на запобігання ненавмисному контакту, вивільненню або поширенню біологічних агентів; біозахист стосується запобігання втраті, крадіжці, неналежному використанню чи навмисному вивільненню біологічних матеріалів. Для охорони здоров'я працівників обидва напрями можуть бути важливими, але вони не є взаємозамінними. У цьому підрозділі основну увагу приділено професійній експозиції й запобіганню шкоді здоров'ю під час штатної роботи, технічного обслуговування та аварійних ситуацій.

Для оцінювання наслідків для здоров'я необхідно зіставляти гігієнічні дані з клінічними спостереженнями. У разі підозри на інфекцію враховують інкубаційний період, характер контакту, лабораторні результати й можливі позапрофесійні джерела. За підозри на алергічний або запальний стан важливими є часовий зв'язок симптомів із роботою, зміни під час вихідних або відпустки, результати спеціалізованого обстеження та можливі альтернативні чинники. Виявлення одного випадку може бути сигналом для перегляду умов праці, але оцінювання професійної причинності має залишатися індивідуальним і доказовим.

2.5.6. Профілактика та організація професійно-медичного нагляду

Профілактика біологічних ризиків має ґрунтуватися на поєднанні інженерних, організаційних і медичних заходів.

До інженерних заходів належать закриті технологічні системи, відповідні первинні бар'єри, біологічні шафи безпеки, контрольована вентиляція, герметичне транспортування матеріалів і валідація деконтамінації. Організаційні заходи включають стандартні операційні процедури, обмеження доступу відповідно до характеру робіт, навчання й перевірку практичних навичок, безпечне поводження з гострими предметами, управління відходами та оперативне повідомлення про інциденти. ВООЗ наголошує, що засоби контролю повинні відповідати результатам оцінювання конкретного ризику, а не призначатися лише за формальним найменуванням агента або лабораторії [28].

Для працівників, які працюють із біологічно активними білками, ферментами або іншими сенсибілізувальними матеріалами, важливо запобігати утворенню аерозолів і шкірному контакту, а також забезпечити швидке розпізнавання симптомів. Для процесів, що передбачають інфекційні агенти, пріоритетними є відповідні бар'єрні заходи, безпечне поводження з матеріалами, належна деконтамінація та визначені процедури реагування після потенційного контакту. У кожному випадку засоби індивідуального захисту мають доповнювати, а не замінювати інженерний контроль.

Професійно-медичний нагляд має бути пропорційним характеру експозиції. Не всі працівники біотехнологічних підприємств потребують однакового набору обстежень; обсяг спостереження визначають за конкретними агентами, можливими наслідками та наявністю валідованих методів виявлення ранніх змін. Доцільно встановити порядок повідомлення про випадкові контакти, документування симптомів, оцінювання групових сигналів і перегляду умов праці. Медичні дані повинні використовуватися для захисту здоров'я та виявлення можливих професійних проблем, з дотриманням конфіденційності й без автоматичного ототожнення будь-якого захворювання з виробничою експозицією.

Важливо забезпечити, щоб профілактичні системи охоплювали не лише штатних працівників, а й персонал технічного обслуговування, прибирання, транспортування матеріалів,

утилізації відходів і тимчасових підрядників. Саме ці групи можуть виконувати операції з відкритими системами або забрудненим обладнанням, не маючи повного доступу до інформації про біологічні матеріали. Передавання інформації про небезпеки, навчання, допуск до робіт і координація між роботодавцем та підрядниками є необхідними компонентами профілактики.

У таблиці 10 узагальнено основні типи біологічних небезпек, потенційні сценарії експозиції та напрями контролю. Таблиця має аналітичний характер: конкретні заходи слід визначати після оцінювання агенту й робочої операції.

Таблиця 10

Біологічні небезпеки в біотехнологіях і суміжних секторах: сценарії експозиції та напрями контролю

Тип матеріалу або агента	Потенційні сценарії експозиції	Можливі наслідки або механізми	Пріоритетні напрями контролю
Інфекційні мікроорганізми та біологічні зразки	Відбір проб, відкривання ємностей, утворення аерозолів, аварійний контакт	Інфекція за наявності відповідного агента й шляху надходження	Оцінювання ризику, первинні бар'єри, безпечні процедури, деконтамінація
Генетично модифіковані організми та вірусні вектори	Культивування, центрифугування, перенесення матеріалу, очищення систем	Залежні від конкретної конструкції біологічні ефекти	Оцінювання властивостей конструкції, контроль аерозолів, закриті процеси, повторна оцінка після змін
Біологічно активні білки й ферменти	Дозування порошків, розлив, очищення, обслуговування обладнання	Потенційна сенсибілізація, подразнення або інші специфічні ефекти	Запобігання утворенню аерозолів, локальна витяжка, контроль шкірного контакту

Продовження табл. 10

Біоаерозолі та органічний пил	Робота з біомасою, компостом, відходами, сировиною тваринного або рослинного походження	Запальні, подразнювальні або алергічні прояви залежно від складу й дози	Контроль джерела, вентиляція, методи прибирання, оцінювання експозиції
Ендотоксини та мікробні компоненти	Перероблення органічних матеріалів, робота з забрудненими рідинами й пилом	Запальна відповідь за достатньої експозиції	Зменшення утворення пилу й аерозолів, гігієнічний контроль, належне очищення
Біологічно забруднені відходи й обладнання	Очищення, ремонт, транспортування, утилізація	Контактне або інгаляційне надходження залежно від матеріалу	Маркування, герметичне пакування, навчання, деконтамінація й координація з підрядниками

Джерело: авторське узагальнення на основі [28–30]. Потенційні ефекти не є діагнозами й мають уточнюватися відповідно до властивостей агента та фактичної експозиції.

Наведена систематизація демонструє, що біологічні ризики не можна оцінювати лише за назвою агента або сектору. Одна й та сама біологічна речовина може створювати різні умови контакту залежно від концентрації, форми, масштабу процесу та застосованих бар'єрів. Водночас подібні клінічні симптоми можуть виникати внаслідок різних механізмів, тому професійно-медичний висновок потребує зіставлення експозиційних і клінічних даних.

Таким чином, біотехнології та нові біологічні агенти формують різнорідний спектр професійних небезпек — від інфекційних агентів до сенсибілізувальних білків, ендотоксинів і біоаерозолів.

Емерджентність у цьому секторі часто пов'язана не з появою принципово нового патогена, а зі зміною масштабу, форми або умов використання біологічного матеріалу. Тому науково обґрунтована профілактика має спиратися на оцінювання конкретної діяльності, регулярний перегляд ризику після технологічних змін, документування інцидентів і належне професійно-медичне спостереження. Після розгляду нових технологічних агентів наступний етап монографії присвячується кліматичним та екологічним трансформаціям, які можуть змінювати інтенсивність відомих небезпек і створювати нові комбінації професійних експозицій.

Розділ 3.
КЛІМАТИЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЯК ЧИННИКИ ПРОФЕСІЙНОЇ ПАТОЛОГІЇ

Кліматичні зміни впливають на професійне здоров'я не лише через підвищення середньої температури повітря. Вони змінюють частоту й інтенсивність теплових хвиль, режим ультрафіолетового опромінення, поширення диму від ландшафтних пожеж, умови праці під час повеней, посух і штормів, а також географічні та сезонні характеристики окремих біологічних небезпек. Для працівників ці впливи накладаються на звичайні виробничі чинники: фізичне навантаження, пил, хімічні речовини, засоби індивідуального захисту, змінний графік і обмежені можливості відпочинку.

У глобальній доповіді Міжнародної організації праці 2024 року кліматично зумовлені небезпеки для працівників згруповано навколо надмірної спеки, ультрафіолетового випромінювання, екстремальних погодних явищ, забруднення повітря, векторних інфекцій і впливу агрохімікатів [32]. Такий перелік показує, що кліматичні трансформації не формують одну окрему нозологічну групу. Їхнє значення полягає у зміні інтенсивності, тривалості, сезонності та поєднання експозицій, а також у появі нових умов виконання звичних робочих завдань.

Для професійної медицини принциповим є розмежування кліматичного чинника, фактичної експозиції на робочому місці та клінічного наслідку. Саме підвищення температури регіону не доводить, що конкретний працівник зазнавав небезпечного теплового навантаження; так само наявність диму або біологічного агента в довкіллі не встановлює автоматично професійної причинності захворювання. Потрібно враховувати робочі завдання, час і місце виконання роботи, фізичне навантаження, доступність засобів контролю, дані моніторингу та альтернативні джерела впливу.

3.1. Тепловий стрес і професійне здоров'я в умовах потепління клімату

Тепловий стрес є одним із найбільш безпосередніх шляхів впливу кліматичних змін на працівників. Його формування визначається не лише температурою повітря, а й вологістю, рухом повітря, тепловим випромінюванням, інтенсивністю фізичної роботи, властивостями одягу та засобів індивідуального захисту, тривалістю зміни й можливістю відновлення. Тому однакові метеорологічні умови можуть створювати різне навантаження для працівника, який виконує легку роботу в затіненому приміщенні, і для працівника, який переміщує вантажі на відкритому майданчику або працює біля джерела технологічного тепла.

Огляд Gibb та співавторів узагальнює дані про зростання ризику теплових захворювань у працівників сільського господарства, будівництва, гірничодобувної промисловості, виробництва, військової служби та пожежогасіння. Автори підкреслюють, що ризик залежить від взаємодії температури, фізичного навантаження, важкого обладнання, захисного одягу й організації праці [33]. Систематичний огляд Habibi та співавторів, який включив 29 досліджень працівників на відкритому повітрі, також визначив акліматизацію, затінення, відповідний одяг і планові перерви серед важливих напрямів підвищення стійкості до теплового навантаження [34].

Гострі наслідки надмірного теплового навантаження охоплюють теплове виснаження, тепловий удар, зневоднення, судоми й порушення здатності безпечно виконувати робочі завдання. Підвищення температури тіла, втрата рідини та серцево-судинне навантаження можуть знижувати фізичну працездатність і увагу, збільшуючи ймовірність помилок і травм. Окремо слід ураховувати, що тепловий стрес може посилювати навантаження на працівників із серцево-судинними, нирковими або іншими хронічними захворюваннями. Водночас клінічний ризик конкретної особи не можна визначати лише за віком або фактом наявності хронічного діагнозу: потрібні індивідуальна оцінка та аналіз умов праці.

У літературі обговорюються також можливі довготривалі наслідки повторного теплового навантаження, зокрема ниркові порушення в окремих групах працівників, які виконують інтенсивну фізичну роботу в спекотному середовищі. Проте сила доказів відрізняється залежно від популяції, тривалості спостереження, супутнього зневоднення та контролю інших чинників. Тому в межах професійної діагностики не слід трактувати будь-яку хронічну хворобу нирок у працівника, зайнятого на відкритому повітрі, як автоматично спричинену спекою. Потрібні задокументовані дані про повторювані експозиції, клінічну динаміку й альтернативні причини.

Теплове навантаження має особливе значення для працівників, які використовують герметичні або багатошарові засоби захисту, працюють у гарячих цехах, шахтах, теплицях, на дахах, у дорожньому будівництві, на об'єктах енергетики та під час ліквідації аварій. Засоби індивідуального захисту можуть обмежувати тепловіддачу, але їх не можна просто скасовувати у відповідь на спеку: необхідно шукати сумісні рішення щодо матеріалів, режиму роботи, охолодження та організації завдань. Аналогічно, для працівників аварійних служб тепловий стрес може поєднуватися з димом, обмеженою видимістю, фізичним навантаженням і психологічним напруженням.

Профілактика має починатися з організаційного плану теплової безпеки, який визначає відповідальних осіб, критерії оцінювання погодних умов і теплового навантаження, порядок акліматизації нових працівників, доступ до питної води, затінених або охолоджуваних зон, частоту перерв і дії у разі появи симптомів. За можливості роботи слід переносити на прохолодніші години, знижувати фізичну інтенсивність завдань, механізувати переміщення вантажів і забезпечувати поступове збільшення навантаження після перерви або повернення до роботи. Показники температури повітря самі по собі не завжди достатні; для робіт із високим навантаженням доцільно застосовувати відповідні індекси теплового стресу та локальні процедури оцінювання.

3.2. Ультрафіолетове випромінювання та зміна умов роботи на відкритому повітрі

Працівники сільського господарства, будівництва, дорожніх служб, рибальства, лісового господарства, комунальних служб і частина аварійних бригад можуть зазнавати тривалого сонячного ультрафіолетового опромінення. Його інтенсивність залежить від географічного положення, сезону, часу доби, хмарності, висоти над рівнем моря та відбиття від поверхонь. Кліматичні зміни не слід розглядати як єдину причину зростання професійного ультрафіолетового ризику, однак зміни температурного режиму й організації робочого часу можуть впливати на тривалість перебування працівників просто неба та можливість використання захисного одягу.

Основними відомими наслідками надмірного ультрафіолетового впливу є гострі ураження шкіри й очей та підвищений ризик окремих злоякісних новоутворень шкіри за тривалої кумулятивної експозиції. Для професійної оцінки важливі не лише загальна кількість років роботи, а й сезонність, характер завдань, режим перебування на сонці, використання головних уборів, одягу, окулярів і сонцезахисних засобів. Діагностичний висновок має враховувати інші чинники ризику та не ґрунтуватися виключно на професії працівника.

Профілактика передбачає технічне й організаційне зменшення прямого опромінення: створення затінених місць, перенесення частини завдань на години з нижчим рівнем ультрафіолету, планування перерв, використання відповідного одягу, головних уборів і засобів захисту очей. Навчання працівників має охоплювати раннє розпізнавання уражень шкіри та очей і порядок звернення по медичну допомогу. Для роботодавця важливо забезпечити реальну доступність засобів захисту й часу для їх застосування, а не обмежуватися формальним інструктажем.

3.3. Забруднення повітря, дим від ландшафтних пожеж і професійні респіраторні ризики

Кліматичні та екологічні зміни можуть змінювати професійну експозицію до забруднення повітря через пожежі, пилові явища, зміни температури й атмосферної циркуляції, а також через проникнення зовнішніх забруднювачів у виробничі приміщення. Для працівників на відкритому повітрі ризик визначається концентрацією та складом забруднювачів, тривалістю перебування в забрудненій зоні, фізичним навантаженням і можливістю використання ефективних засобів захисту органів дихання. Під час фізичної роботи хвилинна вентиляція легень зростає, тому за однакової концентрації зовнішнього забруднювача фактична інгаляційна доза може бути вищою, ніж у людини, яка перебуває в стані спокою.

Дим від ландшафтних пожеж є складною сумішшю дрібнодисперсних частинок і газоподібних компонентів. Склад залежить від типу палива, вологості, температури горіння та наявності штучних матеріалів у зоні пожежі. Пожежники, рятувальники, працівники лісового й сільського господарства, дорожні бригади та інші фахівці, які працюють поблизу пожеж або в зоні поширення диму, можуть зазнавати значного інгаляційного впливу. Систематичний огляд Wah та співавторів виявив переконливі докази гострих респіраторних ефектів у пожежників і певні дані щодо можливих триваліших наслідків, водночас підкресливши обмеженість досліджень для частини клінічних показників [35].

У професійній діагностиці важливо відрізняти короткочасне подразнення дихальних шляхів від загострення наявної астми чи хронічного обструктивного захворювання легень, гострого інгаляційного ушкодження та можливих віддалених наслідків повторних експозицій. Поява кашлю, задишки, подразнення очей або свистячого дихання після роботи в димовій зоні є підставою для клінічної оцінки та документування експозиції, але не визначає діагноз автоматично. Значення мають час

появи симптомів, зміни після припинення контакту, дані про функцію зовнішнього дихання, попередні захворювання й інші можливі експозиції.

Заходи контролю мають починатися з оцінювання якості повітря й можливості зменшити або припинити роботи в небезпечних умовах. Там, де роботу неможливо відкласти, необхідні процедури щодо вибору, правильного прилягання, використання й заміни засобів захисту органів дихання, а також забезпечення чистих зон для відпочинку. Звичайна тканинна маска не є еквівалентом респіратора, призначеного для конкретного типу частинок; водночас респіратор не забезпечує універсального захисту від усіх газоподібних компонентів диму. Вибір обладнання має ґрунтуватися на оцінці суміші забруднювачів, умов праці та можливостей програми захисту органів дихання.

Для працівників у приміщеннях важливими є належне обслуговування вентиляції, оцінювання проникнення зовнішнього диму та за потреби коригування режиму припливу зовнішнього повітря відповідно до технічних рекомендацій. Проте просте закриття приміщення без оцінки внутрішніх джерел забруднення, температури й вентиляції може створити інші ризики. Тому рішення повинні враховувати характеристики будівлі, тип виробничого процесу й можливість безпечного продовження роботи.

3.4. Екстремальні погодні явища, травматизм і психосоціальні наслідки

Повені, шторми, сильні опади, посухи, лісові пожежі та інші екстремальні явища впливають на працівників як безпосередньо, так і через зміну організації праці. Безпосередні наслідки можуть включати травми, утоплення, електротравми, падіння, переохолодження або перегрівання, контакт із забрудненою водою, хімічними речовинами й нестійкими конструкціями. Непрямі наслідки виникають, коли працівники виконують

аварійні роботи, ремонтують інфраструктуру, очищують підтоплені приміщення або працюють у режимі підвищеної терміновості й тривалих змін.

Після повеней та інших стихійних явищ може змінюватися склад пилу й забруднень у приміщеннях, а ремонтні роботи можуть супроводжуватися контактом із пліснявою, каналізаційними забрудненнями, продуктами горіння, пошкодженими електричними системами та нестійкими матеріалами. Такі сценарії вимагають попередньої оцінки місця, а не застосування універсального набору засобів захисту. Наприклад, візуально сухе приміщення не обов'язково є безпечним для входу, якщо невідомий стан електромереж, повітря або конструкцій.

Кліматичні катастрофи також можуть створювати психологічне навантаження внаслідок загрози життю, загибелі чи травмування колег, руйнування житла, втрати засобів існування та тривалого виконання аварійних завдань. Огляд Nowrouzi-Kia та співавторів, який охопив 62 дослідження, описує як фізичні наслідки спеки та екстремальних подій, так і психологічний дистрес, тривогу й пов'язані з роботою проблеми [36]. Водночас цей масив досліджень неоднорідний, тому він не дозволяє встановити єдиний специфічний психічний розлад, характерний для всіх професійних груп, що працюють в умовах кліматичних загроз.

Профілактика має передбачати оцінювання ризику до початку аварійних робіт, чіткі критерії припинення операцій, навчання роботі з електричним обладнанням і забрудненими матеріалами, наявність засобів зв'язку, план евакуації та доступ до першої допомоги. Для рятувальників і ремонтних бригад важливі обмеження тривалості безперервної роботи, ротація завдань, контроль втоми та організована підтримка після особливо тяжких подій. Психологічна допомога має бути доступною, конфіденційною та не супроводжуватися стигматизацією працівників, які повідомляють про симптоми.

3.5. Біологічні ризики, векторні захворювання та зміна екологічних умов

Зміни температури, вологості, режиму опадів і поширення природних оселищ можуть впливати на сезонність та географію окремих переносників інфекцій. Для професійного здоров'я це має значення насамперед для працівників лісового й сільського господарства, ветеринарії, польових досліджень, комунальних служб, природоохоронної діяльності та аварійних бригад. Ризик залежить від локальної циркуляції збудника, наявності переносника, типу робіт, одягу, тривалості перебування на відкритому повітрі й доступності профілактичних заходів. Саме кліматична зміна не означає однакового збільшення ризику всіх векторних інфекцій у кожному регіоні.

До практично значущих заходів належать локальне оцінювання епідеміологічної ситуації, інформування працівників про місцеві переносники, зменшення контакту з ними, використання відповідного одягу й репелентів, контроль місць розмноження переносників там, де це можливо, та своєчасне звернення по медичну допомогу після потенційного контакту. У разі підозри на професійно зумовлену інфекцію необхідно документувати місце й час роботи, характер контакту, виконувані завдання та можливі позапрофесійні джерела зараження. Професійна причинність визначається за сукупністю клінічних і епідеміологічних даних.

Кліматичні зміни можуть також впливати на застосування агрохімікатів, наприклад через зміщення строків обробки, зміну поширення шкідників або потребу в додаткових обробках. Однак інтенсивність використання конкретних речовин залежить від культури, агротехніки, регуляторних рішень і місцевої екологічної ситуації; цей зв'язок не можна вважати універсальним. Для працівників аграрного сектору необхідно оцінювати не лише дію діючої речовини, а й умови приготування сумішей, спосіб нанесення, можливість дрейфу аерозолю, температуру, засоби захисту та інтервали повторного входу на оброблену ділянку.

3.6. Комбіновані кліматично зумовлені експозиції та профілактика

У реальних робочих умовах кліматичні небезпеки рідко діють ізольовано. Працівник може одночасно зазнавати теплового навантаження, ультрафіолетового опромінення, інгаляційного впливу пилу або диму й фізичного навантаження. Засоби індивідуального захисту можуть зменшувати один тип експозиції, але водночас ускладнювати тепловіддачу або збільшувати фізичне навантаження. Аварійні ситуації додають ризики травмування, нестачі сну, психологічного напруження та обмеженого доступу до медичної допомоги. Така конфігурація потребує інтегрованого оцінювання, а не окремого аналізу кожного чинника без урахування їх взаємодії.

Для оцінювання комбінованого ризику доцільно фіксувати: (1) конкретні робочі завдання та їх тривалість; (2) метеорологічні умови й показники теплового навантаження; (3) наявні хімічні, пилові та біологічні агенти; (4) інтенсивність фізичної роботи й характеристики захисного одягу; (5) можливості відпочинку, гідратації та евакуації; (6) симптоми, інциденти й результати медичного спостереження. Такий набір не є універсальним протоколом вимірювань: його слід адаптувати до професії, завдання й локальних небезпек.

Ключовим організаційним інструментом має бути план адаптації охорони праці до кліматичних умов. Він повинен включати сезонну підготовку, відповідальних за моніторинг погодних попереджень, критерії коригування або припинення робіт, процедури для працівників підрядних організацій, навчання керівників змін і порядок реєстрації теплових симптомів, інгаляційних інцидентів та інших несприятливих подій. Для малих підприємств і тимчасових працівників особливо важливо, щоб процедури були практичними, зрозумілими й доступними мовою, якою працівники реально користуються.

Професійно-медичний нагляд має бути пов’язаний з експозицією, а не лише з формальним найменуванням професії.

У разі повторного теплового навантаження важливо оцінювати симптоми, епізоди теплового виснаження, супутні захворювання та умови відновлення; після значної експозиції диму — клінічні прояви з боку дихальної системи та за показаннями функціональні дослідження; після аварійних робіт — травми, інгаляційні контакти й психологічні наслідки. Необхідно уникати надмірного скринінгу без доведеної користі та забезпечувати конфіденційність медичних даних.

Для систематизації практичних підходів у таблиці 11 наведено основні кліматично зумовлені професійні небезпеки, групи працівників, потенційні наслідки та напрями профілактики. Таблиця має орієнтовний характер і не замінює оцінювання конкретного робочого місця.

Таблиця 11

Кліматично зумовлені професійні небезпеки та напрями профілактики

Небезпека або сценарій	Групи працівників із потенційно значущою експозицією	Можливі наслідки / питання оцінювання	Основні напрями профілактики
Тепловий стрес	Сільське господарство, будівництво, дорожні служби, виробництво, гірничі роботи, аварійні служби	Теплове виснаження, тепловий удар, зневоднення, зниження уваги та збільшення ризику травм	План теплової безпеки, акліматизація, вода, охолодження, перерви, перенесення робіт, оцінювання теплового навантаження
Ультрафіолетове випромінювання	Працівники на відкритому повітрі, зокрема в аграрному й будівельному секторах	Ураження шкіри й очей; кумулятивний ризик окремих новоутворень шкіри	Затінення, коригування графіка, відповідний одяг, головні убори, захист очей, інформування

Продовження табл. 11

Дим від ландшафтних пожеж і зовнішнє забруднення повітря	Пожежники, рятувальники, лісові та польові працівники, дорожні й комунальні бригади	Подразнення дихальних шляхів, загострення респіраторних хвороб, можливі гострі та довготривалі наслідки	Моніторинг повітря, зміна/припинення робіт, правильно підібраний захист органів дихання, чисті зони відпочинку
Повені, шторми та аварійні роботи	Рятувальники, ремонтні бригади, комунальні служби, працівники інфраструктури	Травми, електротравми, контакт із забрудненою водою, небезпечними конструкціями й матеріалами	Попереднє оцінювання місця, допуск, засоби зв'язку, план евакуації, навчання та перша допомога
Зміни векторних і біологічних ризиків	Працівники лісового й сільського господарства, ветеринарії, польових служб	Інфекційні захворювання за наявності локального збудника та відповідного контакту	Локальний епіднагляд, одяг і репеленти, інформування, документування контактів
Зміна умов застосування агрохімікатів	Працівники аграрного сектору, оператори обробки рослин	Інгаляційний і шкірний контакт; ризик залежить від речовини, дози та способу застосування	Оцінювання конкретних речовин, безпечне приготування й нанесення, контроль дрейфу, засоби захисту та дотримання інтервалів повторного входу

Джерело: авторське узагальнення на основі [32–36]. Перелік груп і наслідків не є вичерпним; реальний ризик залежить від локальної експозиції та умов виконання робіт.

Отже, кліматичні та екологічні трансформації здебільшого змінюють профіль уже відомих небезпек, але можуть створювати нові експозиційні сценарії й ускладнювати встановлення професійної причинності. Найбільш обґрунтованою відповіддю є інтеграція кліматичних чинників до оцінювання ризиків на робочому місці, своєчасне коригування режимів роботи, контроль експозиції та клінічне спостереження, пов'язане з реальними робочими завданнями. Для визнання конкретного захворювання професійним необхідно окремо оцінювати характер і тривалість впливу, клінічні дані, альтернативні пояснення та рівень наукових доказів.

Розділ 4.
КОМБІНОВАНІ ЕКСПОЗИЦІЇ, МЕХАНІЗМИ ПАТОЛОГІЇ ТА МУЛЬТИМОРБІДНІСТЬ

4.1. Від ізольованого чинника до сукупного профілю професійного ризику

Традиційна модель професійної гігієни часто будується навколо окремого небезпечного чинника: вимірюється концентрація речовини, інтенсивність шуму або рівень фізичного навантаження, після чого результат порівнюють із нормативним значенням. Такий підхід залишається необхідним, однак не завжди відображає реальні умови праці. У багатьох виробничих ситуаціях працівник одночасно або послідовно контактує з кількома агентами, а їхній вплив залежить від тривалості зміни, темпу роботи, температури, вентиляції, засобів індивідуального захисту та індивідуальної вразливості.

Огляд Barbey та співавторів, що охопив 63 дослідження комбінованих професійних експозицій, показав, що в літературі описують хімічні поєднання, комбінації хімічних і фізичних або біомеханічних чинників, а також поєднання експозицій із психосоціальними й організаційними факторами. Водночас профілактичні рекомендації, спеціально спрямовані на комбіновані впливи, були представлені лише в частині досліджень; біологічні чинники та деякі інші важливі комбінації залишилися недостатньо охопленими [37]. Це свідчить не про відсутність комбінованих ризиків, а про обмеження доказової бази та дослідницьких методів.

Для оцінювання ризику доцільно розрізняти щонайменше чотири сценарії: одночасну дію кількох чинників; послідовні експозиції протягом зміни або трудового життя; повторні короткі пікові впливи; поєднання професійних і непрофесійних

експозицій. Останній сценарій особливо важливий для хронічних захворювань, адже робоче середовище взаємодіє з міським забрудненням повітря, житловими умовами, поведінковими факторами та доступом до медичної допомоги.

Сам факт одночасної присутності кількох небезпек ще не доводить синергічної взаємодії. Їхній сумарний ефект може бути адитивним, потенціювальним, антагоністичним або залежати від конкретного результату для здоров'я. Тому в науковому тексті та практичній оцінці потрібно відокремлювати встановлену взаємодію від правдоподібного, але ще не підтвердженого механізму. Особливо обережно слід інтерпретувати результати, коли експозиції вимірювали різними методами або коли дослідження не дозволяє встановити часову послідовність між впливом і хворобою.

4.2. Основні механізми взаємодії експозицій

Комбіновані впливи можуть формувати патологічний процес через кілька взаємопов'язаних механізмів. Перший — спільна дія чинників на одну систему органів. Наприклад, подразнювальні гази, пил і дим можуть одночасно впливати на дихальні шляхи, а фізичне навантаження збільшує вентиляцію легень і потенційно змінює кількість інгаляційно отриманої дози. Конкретний клінічний наслідок, однак, залежатиме від складу суміші, концентрації, тривалості контакту та стану працівника.

Другий механізм — вплив на різні ланки одного патофізіологічного процесу. Частинки або хімічні агенти можуть спричиняти запалення чи оксидативний стрес, тоді як тепло, зневоднення або фізичне навантаження змінюють терморегуляцію, гемодинаміку та метаболічні потреби. У певних умовах це може знижувати фізіологічний резерв організму. Проте не можна автоматично переносити результати експериментів на конкретні професійні ситуації без даних про реальні дози та рівні експозиції.

Третій механізм пов'язаний із порушенням захисних бар'єрів і зміною поведінки працівника. Висока температура, важке

навантаження або незручні засоби захисту можуть знижувати їхню переносимість і прихильність до використання. Унаслідок цього організаційне рішення — наприклад, недостатні перерви або непридатний режим роботи — здатне посилювати фактичну експозицію, навіть якщо технічні характеристики окремого агента не змінилися.

Четвертий механізм — взаємодія фізичних і психосоціальних чинників. Шум, нічні зміни, дефіцит часу, низький контроль над робочим процесом і недостатнє відновлення можуть впливати на увагу, сон, емоційну регуляцію та ризик помилок. Ці фактори не є взаємозамінними з хімічними або фізичними агентами, але вони можуть змінювати умови контакту з ними, відновлення після навантаження та ймовірність травми. У клінічному аналізі важливо враховувати також зворотний зв'язок: симптоми або хронічна хвороба можуть підвищувати чутливість до робочих умов і ускладнювати виконання завдань.

Таким чином, поняття комбінованої експозиції не слід зводити лише до змішування хімічних речовин. Воно охоплює поєднання хімічних, фізичних, біологічних, біомеханічних і психосоціально-організаційних чинників, якщо їхня взаємодія має значення для виникнення захворювання або травми. Наявні огляди водночас наголошують на неоднорідності методів і недостатності даних для багатьох комбінацій [37, 38].

4.3. Професійний експозом і накопичення впливів упродовж життя

Концепція експозому розширює аналіз від окремої експозиції до сукупності впливів, яких людина зазнає протягом життя, включно з професійними, екологічними та пов'язаними з умовами проживання чинниками. Для професійної медицини особливе значення має експозом трудового життя: послідовність робочих місць, змін у технологіях, епізодів інтенсивного впливу, періодів відновлення та контактів поза роботою. Такий підхід

допомагає пояснити, чому оцінка лише поточного робочого місця може бути недостатньою для хвороб із тривалим латентним періодом [38, 39].

Практичне застосування експозомного підходу не означає, що всі можливі впливи потрібно вимірювати одночасно або що їх можна звести до єдиного універсального показника. Насамперед необхідно реконструювати професійну траєкторію: посади й фактичні завдання, матеріали та технології, умови вентиляції, засоби захисту, аварійні події, інтенсивність і тривалість контактів. Далі ці дані зіставляють із клінічною хронологією: початком симптомів, загостреннями, змінами після відпустки або переведення, результатами обстежень і можливими альтернативними причинами.

Реконструкція експозицій має спиратися на кілька джерел, коли вони доступні: розповідь працівника, дані виробничого контролю, технологічну документацію, паспорти безпеки речовин, результати гігієнічних вимірювань, записи про аварії та медичні документи. Жодне джерело не є безпомилковим. Спогади можуть бути неповними, документи — не охоплювати неформальні завдання, а сучасні вимірювання — не відображати умови минулих років. Тому в карті експозицій варто фіксувати не лише передбачуваний чинник, а й підставу для такого висновку та рівень невизначеності.

Перспективним є поєднання історичних даних із сучасними методами оцінювання зовнішньої та внутрішньої експозиції, біомоніторингом і цифровими даними. Проте біомаркер не є автоматичним доказом професійного походження захворювання: його інтерпретація залежить від специфічності, періоду напіввиведення, часу відбору проб, позаробочих джерел і валідованих референтних значень. Аналогічно, носимі сенсори можуть допомогти виявити пікове теплове навантаження або зміну робочої активності, але потребують перевірки точності та чіткого визначення мети використання.

Отже, експозомний підхід найбільш корисний як спосіб організувати й зіставити різнорідні дані, а не як заміна професійного анамнезу, гігієнічної оцінки або клінічного судження.

Він також допомагає виявляти прогалини: коли відсутні дані про певний період трудової діяльності, коли неможливо оцінити інтенсивність контакту або коли одночасно діяли кілька правдоподібних причин.

4.4. Мультиморбідність і зниження фізіологічного резерву

Мультиморбідність — співіснування в однієї людини двох або більше хронічних захворювань — має важливе значення для оцінювання професійного ризику, але потребує точного трактування. Наявність кількох діагнозів не означає, що всі вони спричинені роботою, і не доводить, що їхній перебіг обов'язково зумовлений взаємодією професійних експозицій. Водночас поєднання хронічних респіраторних, серцево-судинних, метаболічних, опорно-рухових або психічних порушень може зменшувати здатність переносити фізичне навантаження, спеку, змінний графік чи контакт із подразнювальними агентами.

Для клінічної практики це означає, що ризик визначається не лише назвою професійного чинника, а й функціональним станом працівника, тяжкістю та стабільністю хвороби, лікуванням, можливістю відновлення й конкретними вимогами робочого завдання. Наприклад, працівник із серцево-судинним захворюванням може мати менший резерв для виконання важкої роботи в умовах спеки, а людина з хронічною хворобою дихальних шляхів — гірше переносити пил або дим. Це не є підставою для автоматичного усунення людини від роботи; першочерговим завданням є оцінка функціональних обмежень і можливості контролювати небезпеку шляхом зміни умов праці.

Мультиморбідність також ускладнює встановлення професійної причинності. Симптоми можуть мати кілька можливих пояснень, а професійний вплив — бути одним із чинників, що сприяє виникненню, загостренню або прискоренню перебігу хвороби. У таких випадках необхідно розмежовувати: професійне

захворювання, професійно зумовлене загострення, вплив роботи на функціональні можливості та випадкове співіснування захворювання з певною професією. Ці категорії мають різне клінічне й правове значення.

Оцінювання має бути динамічним. Стан здоров'я, технологія, навантаження та засоби захисту змінюються, тому висновок, зроблений за попередніх умов, не завжди придатний для нового робочого місця або зміненого графіка. Доцільно узгоджувати клінічну оцінку з конкретними професійними завданнями та розглядати адаптацію праці як один із засобів збереження зайнятості, а не лише як наслідок визнання працівника непридатним.

4.5. Від оцінки окремих небезпек до інтегрованої профілактики

Інтегрована профілактика починається з опису реального робочого процесу та ідентифікації всіх значущих експозицій. Після цього оцінюють їхні джерела, шляхи надходження, інтенсивність, тривалість і часові профілі, а також можливу взаємодію. Необхідно враховувати не тільки типову зміну, а й технічне обслуговування, очищення обладнання, аварійні ситуації, сезонні піки та нестандартні завдання. Особливу увагу слід приділяти роботам, під час яких працівник переходить між різними зонами або поєднує фізичне навантаження з теплом, пилом, шумом чи психоемоційним напруженням.

Заходи контролю слід добирати відповідно до ієрархії профілактики: усунення небезпеки або заміна менш небезпечним процесом; інженерні заходи; організаційні рішення; засоби індивідуального захисту. У разі комбінованих впливів недостатньо перевірити ефективність кожного заходу ізольовано. Наприклад, респіратор може зменшувати інгаляційну експозицію, але його придатність і переносимість необхідно оцінювати з урахуванням спеки, фізичного навантаження, тривалості використання

та сумісності з іншими засобами захисту. Організаційні зміни мають зменшувати експозицію, а не просто переносити її на іншу групу працівників або збільшувати темп праці.

Система спостереження за здоров'ям має бути пов'язана з оціненими ризиками. Вона може включати цільові медичні огляди, реєстрацію ранніх симптомів, аналіз випадків загострення, контроль функціональних показників і механізм направлення до профпатолога. Обсяг обстежень потрібно визначати за науковими доказами, клінічними показаннями та нормативними вимогами; безпідставне розширення тестування може створювати хибнопозитивні результати, непотрібні втручання й додаткове навантаження на працівників.

Важливою складовою є участь працівників у виявленні небезпек і перевірці практичної придатності заходів. Працівники часто першими помічають пікові експозиції, порушення технологічного режиму або ситуації, коли засоби захисту неможливо використовувати належним чином. Повідомлення про симптоми й небезпечні ситуації має відбуватися без покарання за добросовісне інформування. Водночас персональні медичні дані слід відокремлювати від управлінської інформації, доступ до якої має бути обмежений визначеною метою.

Для оцінювання результативності інтегрованої профілактики доцільно поєднувати показники процесу й наслідків: охоплення вимірюваннями, частку виявлених і усунутих небезпек, дотримання технологічних процедур, доступність засобів захисту, частоту симптомів і загострень, травматизм, тимчасову непрацездатність та дані про довгострокове здоров'я. Жоден окремий показник не відображає всієї ефективності. Зменшення зареєстрованих випадків, наприклад, може бути пов'язане як із поліпшенням умов, так і з недоповідомленням; тому потрібне зіставлення кількох джерел інформації (табл. 12).

Комбіновані експозиції є важливою, але методологічно складною частиною сучасної професійної патології. Вони можуть охоплювати хімічні, фізичні, біологічні, біомеханічні й психосоціально-організаційні чинники, а їхній ефект залежить від дози, тривалості, послідовності впливів і стану здоров'я

Таблиця 12

Практична схема інтегрованої оцінки комбінованих професійних експозицій

Етап	Ключові питання	Джерела інформації	Практичний результат
Опис робочого процесу	Які завдання виконує працівник і за яких умов?	Спостереження, опитування, технологічні карти	Карта робочих завдань і зон контакту
Ідентифікація експозицій	Які хімічні, фізичні, біологічні, біомеханічні й організаційні чинники діють одночасно або послідовно?	Документація, паспорти безпеки, виробничий контроль, дані працівників	Перелік чинників і можливих поєднань
Характеристика впливу	Які інтенсивність, тривалість, піки та шляхи надходження?	Гігієнічні вимірювання, сенсори, реконструкція минулих умов	Профіль експозиції з описом невизначеності
Оцінка здоров'я	Які симптоми, діагнози й часові зв'язки підтверджені?	Медична документація, огляд, цільові дослідження	Клінічна оцінка з диференційною діагностикою
Контроль ризику	Які заходи усувають джерело або зменшують сумарний вплив?	Інженерний аудит, участь працівників, перевірка засобів захисту	План заходів із відповідальними й строками
Перевірка результату	Чи зменшилася експозиція і чи є ознаки поліпшення безпеки та здоров'я?	Повторні вимірювання, аудит, медичне спостереження	Оновлена оцінка ризику та корекція плану

Джерело: авторське узагальнення на основі [37–39]. Схема є робочою рамкою й має адаптуватися до галузі, конкретних небезпек і національних нормативних вимог.

працівника. Наявні огляди підтверджують значущість проблеми, водночас вказуючи на обмежену кількість досліджень, які безпосередньо оцінюють взаємодію експозицій і пропонують відповідні профілактичні рішення [37].

Експозомний підхід допомагає реконструювати професійну траєкторію та розглядати робочі й позаробочі впливи в їх часовому контексті. Однак він не замінює якісного професійного анамнезу, гігієнічної оцінки та клінічного аналізу. Мультиморбідність може зменшувати фізіологічний резерв і ускладнювати встановлення причинності, але сама по собі не доводить професійного походження всіх наявних захворювань.

Практична відповідь полягає в переході від контролю ізольованих агентів до інтегрованого опису робочих завдань, оцінки сумарного профілю експозицій, адаптації профілактичних заходів і динамічного спостереження за здоров'ям. Рішення мають ґрунтуватися на рівні доказів, враховувати невизначеність і не підміняти усунення небезпеки формальним використанням засобів індивідуального захисту.

Розділ 5.
ПРОФІЛАКТИКА ЕМЕРДЖЕНТНИХ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ І ТРАНСФОРМАЦІЯ СИСТЕМ ПРОФЕСІЙНОЇ МЕДИЦИНИ

5.1. Випереджувальна профілактика в умовах технологічних і кліматичних змін

Профілактика емерджентних професійних ризиків відрізняється від реагування на вже сформовану проблему часовим горизонтом і характером доказів. Для традиційних небезпек часто доступні усталені гігієнічні нормативи, клінічні критерії та накопичені дані спостережень. У випадку нових матеріалів, технологічних процесів або змін клімату дані можуть бути неповними, а наслідки для здоров'я — проявлятися із затримкою. Це не є підставою автоматично оголошувати нову технологію небезпечною, але вимагає систематичного виявлення невизначеності, пропорційних запобіжних заходів і подальшого перегляду оцінки в міру надходження доказів [40].

Випереджувальна профілактика має спиратися на регулярне спостереження за змінами у виробництві, матеріалах, організації праці, складі робочої сили та довкіллі. Практичне значення мають не лише повідомлення про вже зареєстровані професійні захворювання, а й дані про нові завдання, появу нових речовин, зміну температурного режиму, нестандартні режими експлуатації обладнання, повідомлення працівників про симптоми та небезпечні ситуації. Для прогнозування можуть використовуватися огляди літератури, аналіз даних виробничого контролю, консультації з працівниками й фахівцями, а також сценарне планування. Прогнозні сценарії слід розглядати як інструмент підготовки до можливих змін, а не як достовірне передбачення конкретного майбутнього [40].

Важливо розрізняти небезпеку, ризик і невизначеність. Наявність небезпечної властивості агента ще не визначає величину ризику для конкретного працівника; вона залежить від рівня й тривалості експозиції, шляху надходження, ефективності контролю та індивідуальних особливостей. Водночас відсутність задокументованих випадків не доводить відсутності ризику, якщо експозицію не вимірювали або захворювання не виявляли систематично. У практиці це означає, що рішення мають документувати вихідні припущення, якість даних, межі застосовності результатів і підстави для повторного оцінювання.

Для України випереджувальний підхід особливо актуальний під час відновлення інфраструктури, розвитку відновлюваної енергетики, ремонту пошкоджених промислових об'єктів, поводження з будівельними відходами та організації робіт у зонах із воєнними й екологічними ризиками. Ці види діяльності не слід об'єднувати в одну категорію небезпеки: кожен об'єкт потребує конкретної оцінки матеріалів, технологічних операцій, можливих забруднювачів і доступних засобів контролю. Принциповою вимогою є включення охорони здоров'я працівників до планування робіт від початку, а не після появи симптомів або аварій.

5.2. Ієрархія контролю небезпек і контроль на джерелі

Основою профілактики залишається послідовне застосування ієрархії заходів контролю: усунення небезпеки, заміна менш небезпечним матеріалом або процесом, інженерні заходи, адміністративні заходи та засоби індивідуального захисту. Ця послідовність важлива, оскільки заходи не є взаємозамінними за надійністю. Навчання й інструктаж не компенсують відсутності місцевої витяжної вентиляції, а респіратор не повинен бути єдиним засобом контролю, якщо експозицію реально усунути або знизити інженерними рішеннями [41].

На етапі проєктування нового процесу потрібно оцінювати не лише основну виробничу операцію, а й транспортування, дозування, технічне обслуговування, очищення, ремонт, утилізацію та аварійні сценарії. Небезпека може бути незначною за штатного режиму, але істотно зростати під час відкриття обладнання, заміни фільтрів, усунення закупорення, роботи з відходами або відновлення після зупинки. Тому інструкції з безпеки мають відповідати реальній послідовності завдань, а ефективність контролю слід перевіряти в умовах, які відображають можливі пікові експозиції.

Заміна небезпечного агента потребує повноцінного порівняльного оцінювання. Матеріал, що має меншу токсичність за одним показником, може створювати інші небезпеки через пилогенність, реакційну здатність, займистість, біологічну активність або складність утилізації. Аналогічно автоматизація може зменшувати прямий контакт працівника з небезпечним процесом, але водночас створювати нові завдання з обслуговування роботизованого обладнання, дистанційного нагляду або втручання в аварійні режими. Профілактичне рішення має враховувати весь життєвий цикл технології та можливе перенесення ризику між групами працівників.

Коли повне усунення небезпеки поки неможливе, потрібне поєднання інженерних і організаційних заходів: ізоляція процесу, локальна витяжна вентиляція, герметизація, автоматизоване дозування, контроль доступу, безпечні процедури технічного обслуговування, достатній час для відпочинку й відновлення, а також належно підібрані засоби індивідуального захисту. Для робіт у спеку або під час надзвичайних погодних явищ організаційні заходи мають бути заздалегідь визначені й пов'язані з фактичними умовами, а не залежати лише від суб'єктивного відчуття працівника.

5.3. Раннє виявлення, професійний анамнез і медичне спостереження

Раннє виявлення емерджентних професійних захворювань залежить від здатності пов'язати клінічні прояви з умовами праці. Професійний анамнез має охоплювати поточну роботу, попередні місця зайнятості, конкретні виробничі завдання, матеріали й суміші, режими роботи, використання засобів захисту, аварійні події, сезонність симптомів і зміну стану під час вихідних або відпустки. Загальна назва професії часто недостатня: працівники з однаковою посадою можуть виконувати різні завдання й мати різні профілі експозиції.

Медичне спостереження має бути пов'язане з оціненим ризиком і передбачати зрозумілий шлях подальших дій за виявлення відхилень. Його метою є не тільки фіксація вже сформованого захворювання, а й своєчасне виявлення ранніх ознак, оцінка придатності наявних профілактичних заходів і направлення до відповідного спеціаліста. Програми спостереження не повинні зводитися до однакового набору тестів для всіх працівників незалежно від експозиції. Невиправдане тестування може спричиняти хибнопозитивні результати, додаткові обстеження та необґрунтовані обмеження зайнятості.

У разі підозри на професійне захворювання клінічні дані необхідно зіставляти з гігієнічною характеристикою робочого місця, часовою послідовністю експозиції й симптомів, даними колег за подібних умов та альтернативними причинами. Відсутність вимірювань у минулому не повинна автоматично закривати питання професійної причинності; за потреби можна реконструювати історичні умови за технологічними документами, паспортами безпеки, даними виробничого контролю та свідченнями працівника. Водночас така реконструкція має чітко позначати припущення й не створювати видимості точності, якої джерела не забезпечують.

Особливу увагу слід приділяти працівникам, які можуть мати підвищену вразливість через вік, супутні захворювання, вагітність, інвалідність, попередні професійні ушкодження або

приймання певних лікарських засобів. Індивідуальна вразливість не повинна ставати підставою для автоматичного виключення людини з роботи. Насамперед потрібно оцінити, чи можна адаптувати робоче місце, графік або завдання та усунути небезпеку. Медична інформація має використовуватися пропорційно до мети охорони здоров'я, із захистом конфіденційності й недопущенням дискримінації.

5.4. Цифрові інструменти, штучний інтелект і межі автоматизованого нагляду

Сенсори, носимі пристрої, цифрові системи управління безпекою та алгоритми аналізу даних можуть допомагати виявляти небезпечні умови раніше, ніж це можливо за періодичних ручних перевірок. Такі системи можуть реєструвати температуру, шум, певні параметри повітря, фізичне навантаження або наближення працівника до небезпечної зони. Автоматизація також дає змогу виконувати окремі операції в токсичних, гарячих або інших небезпечних середовищах без постійної присутності людини. Проте ефективність технології залежить від точності сенсорів, якості калібрування, умов експлуатації, належного тлумачення даних і того, чи призводить сигнал до реального усунення небезпеки [42].

Цифрові системи можуть створювати й додаткові ризики. Постійний моніторинг індивідуальної продуктивності, непрозоре алгоритмічне оцінювання, надмірна кількість сигналів, автоматичне планування темпу роботи або обмеження автономії здатні посилювати психологічне навантаження. Дані носимих пристроїв також можуть бути неповними або неточними, а показник, розроблений для загальної популяції, не обов'язково придатний для ухвалення рішень щодо конкретної людини. Тому технологічні рішення слід оцінювати не лише за їхньою технічною ефективністю, а й за впливом на організацію праці, конфіденційність, справедливість і можливість працівника оскаржити автоматизоване рішення [42].

Дані цифрового моніторингу не повинні підміняти професійну гігієнічну оцінку, клінічний огляд або консультацію з працівниками. Алгоритм може виявити відхилення, але сам по собі не встановлює діагноз і не доводить причинного зв'язку між експозицією та хворобою. До впровадження системи потрібно визначити, хто відповідає за перевірку сигналів, які порогові значення застосовуються, як обробляються помилки, кому доступні персональні дані та які дії виконуються після виявлення ризику. Якщо система лише збирає дані, але не забезпечує відповідного реагування, її внесок у профілактику буде обмеженим.

5.5. Професійна медицина як міждисциплінарна система

Складність нових професійних ризиків потребує співпраці профпатологів, лікарів первинної та спеціалізованої допомоги, фахівців із гігієни праці, інженерів з охорони праці, токсикологів, епідеміологів, ергономістів, психологів і представників працівників. Жодна з цих груп не має повної інформації самостійно: клініцист оцінює стан здоров'я, гігієніст характеризує експозицію, а працівник може описати фактичну організацію завдань і ситуації, які не відображені в документації. Координація потрібна не лише для підтвердження діагнозу, а й для перетворення клінічних висновків на конкретні зміни умов праці.

Система професійної медицини має забезпечувати доступ до базових профілактичних послуг незалежно від розміру підприємства, виду контракту або формального статусу зайнятості. Особливо складним є охоплення працівників малих підприємств, самозайнятих, тимчасово зайнятих, мігрантів, працівників платформ і людей, які виконують роботу через субпідряд. Якщо профілактичні послуги доступні лише на великих підприємствах із власними медичними службами, значна частина працівників може залишатися поза систематичним спостереженням. ВООЗ

підкреслює необхідність розширення доступу до професійних медичних послуг і первинної профілактики для різних груп зайнятих [43].

На рівні підприємства потрібні визначені відповідальні особи, письмова політика охорони праці, регулярна оцінка ризиків, навчання, участь працівників і процедура перегляду заходів після змін технології, аварій або появи нових даних. На національному рівні важливими є координація охорони здоров'я й праці, достатня спроможність лабораторій та інспекції, стандартизовані підходи до реєстрації професійних захворювань і можливість обміну знеособленими даними для нагляду. Міжнародні документи з охорони праці наголошують на системному й випереджувальному підході, а не на ізольованих діях після настання шкоди [41–43].

Для України організаційний розвиток має враховувати обмеженість ресурсів, наслідки війни, переміщення працівників, пошкодження підприємств і потребу відновлення виробничої діяльності. Практично доцільно розбудовувати поетапну модель: базове виявлення небезпек і професійний анамнез на первинному рівні; доступ до профпатолога та фахівців із гігієни праці за показаннями; регіональні маршрути направлення; цифрову реєстрацію даних із належним захистом; цільові програми для секторів із новими або комбінованими ризиками. Така модель не повинна зводитися до цифровізації заради самої цифровізації: спершу визначаються функції, відповідальність і клініко-профілактичні маршрути, а вже потім обираються технологічні засоби.

5.6. Оцінювання результативності та навчання системи на даних

Результативність профілактики не можна оцінювати лише за кількістю зареєстрованих професійних захворювань або нещасних випадків. Ці показники важливі, але залежать від

виявлення, доступу до медичної допомоги, практики повідомлення й процедури визнання професійного походження. На ранньому етапі поліпшення виявлення може навіть збільшити число зареєстрованих випадків, не означаючи погіршення умов праці. Тому потрібна система показників, яка поєднує охоплення профілактикою, характеристики експозиції, виконання заходів і стан здоров'я.

До процесуальних показників можуть належати частка робочих місць, для яких оцінено актуальні ризики; час між появою нового процесу й проведенням оцінки; частка працівників, охоплених належним навчанням і медичним спостереженням; частота перевірки інженерних систем; кількість небезпек, усунутих на джерелі; доступність засобів захисту та своєчасність реагування на повідомлення. Показники результату можуть охоплювати зміни рівнів експозиції, частоту симптомів, загострень і травм, тривалість непрацездатності, а також повернення до роботи після захворювання. Вибір конкретних показників має відповідати галузі й типу ризику.

Дані необхідно аналізувати з урахуванням структури робочої сили, відпрацьованого часу, зміни виробничих обсягів і повноти реєстрації. Порівняння підприємств або періодів без таких поправок може призвести до помилкових висновків. Наприклад, зменшення кількості випадків може бути пов'язане зі скороченням виробництва, а не з поліпшенням профілактики; відсутність повідомлень — із недовірою до системи, а не з відсутністю небезпек. Важливо також фіксувати небажані наслідки самих профілактичних заходів, зокрема перенесення ризику на підрядників, посилення темпу роботи або необґрунтоване виключення окремих груп працівників (табл. 13).

Профілактика емерджентних професійних захворювань має поєднувати випереджувальне виявлення ризиків, контроль небезпек на джерелі, професійно орієнтоване медичне спостереження та систематичне оцінювання результатів. Неповнота доказів щодо нових агентів не виправдовує бездіяльності, але й не дає підстав робити категоричні висновки без урахування експозиції, якості даних і можливих альтернативних пояснень.

Таблиця 13

Рамка оцінювання профілактики емерджентних професійних ризиків

Рівень оцінювання	Приклади показників	Питання для інтерпретації
Випереджувальна готовність	Час від упровадження нової технології до оцінки ризику; наявність сценаріїв аварій і кліматичних подій	Чи виявляються зміни до появи шкоди?
Контроль небезпек	Частка небезпек, усунутих або контрольованих на джерелі; результати повторних вимірювань	Чи зменшився реальний рівень експозиції?
Доступ до послуг	Охоплення працівників оцінкою ризику, професійним анамнезом і цільовим медичним спостереженням	Чи не залишаються поза системою окремі категорії зайнятих?
Раннє виявлення	Час від перших симптомів до оцінки професійного чинника; повнота направлення до профпатолога	Чи скорочується затримка діагностики?
Здоров'я та працездатність	Динаміка симптомів, загострень, травм, непрацездатності й повернення до роботи	Чи узгоджуються зміни клінічних результатів із даними про експозицію?
Справедливість і довіра	Повідомлення про небезпеки без негативних наслідків; доступність процедур оскарження; захист медичних даних	Чи може працівник повідомити про ризик і отримати відповідь без дискримінації?

Джерело: авторське узагальнення на основі [40–43]. Наведені показники є прикладами; їх слід адаптувати до виробничого контексту та перевіряти на валідність перед використанням для управлінських рішень.

Ієрархія контролю має залишатися основою практичних рішень. Цифрові технології й штучний інтелект можуть посилювати виявлення небезпек і зменшувати контакт із ними,

проте їхні переваги залежать від технічної надійності, прозорості, захисту даних і реального реагування на виявлені ризики. Автоматизований моніторинг не замінює професійної гігієни, клінічного судження та участі працівників.

Трансформація професійної медицини потребує міждисциплінарної взаємодії, доступних маршрутів направлення, систематичного професійного анамнезу й охоплення працівників незалежно від форми зайнятості. Для України ці завдання необхідно пов'язувати з відновленням виробництва, кліматичною адаптацією, технологічною модернізацією та наслідками війни. Кінцевим критерієм має бути не кількість впроваджених процедур або цифрових інструментів, а підтверджене зменшення експозиції, своєчасніше виявлення проблем і поліпшення здоров'я працівників.

ВИСНОВКИ

1. Технологічні та кліматичні трансформації змінюють не лише перелік професійних небезпек, а й умови їх виникнення, поєднання та виявлення. Нові матеріали, цифрові виробничі системи, адитивне виробництво, акумуляторні технології, біотехнології та низьковуглецеві виробничі процеси можуть створювати нові профілі експозиції або змінювати значення вже відомих чинників. Водночас поява нової технології сама по собі не є доказом виникнення нового професійного захворювання. Для обґрунтованого висновку необхідно встановити характер небезпеки, фактичну експозицію, можливі наслідки для здоров'я та достатність доказів причинного зв'язку.

2. Виявлення емерджентних професійних ризиків потребує систематичного аналізу змін у виробничих процесах, матеріалах, організації праці та структурі зайнятості. Запізніла реєстрація захворювань, недостатнє вимірювання експозицій і фрагментарність даних можуть створювати розрив між фактичною наявністю небезпеки та її визнанням у клінічній і профілактичній практиці. Тому оцінювання ризику має включати аналіз наявних доказів, їхніх обмежень і невизначеності, а також регулярний перегляд висновків після отримання нових даних.

3. Профіль професійного ризику визначається не тільки властивостями окремого агента, а й виробничою операцією, шляхом надходження, інтенсивністю та тривалістю контакту, режимом роботи, ефективністю вентиляції, технічного обслуговування й інших засобів контролю. У виробництві наноматеріалів, напівпровідників, акумуляторів, під час рециклінгу, використання біотехнологій і розвитку відновлюваної енергетики особливого значення набувають етапи очищення, ремонту, заміни компонентів, поводження з відходами та реагування на аварійні ситуації. Саме ці операції необхідно включати до оцінювання, не обмежуючись аналізом штатного виробничого процесу.

4. Кліматичні зміни посилюють значення теплового стресу, ультрафіолетового випромінювання, диму від ландшафтних пожеж, екстремальних погодних явищ та окремих біологічних небезпек. Наслідки залежать від характеру роботи, тривалості перебування в небезпечних умовах, доступності охолодження й питної води, можливості змінювати графік та ефективності організаційних заходів. Кліматичні чинники також можуть змінювати вплив традиційних виробничих агентів, тому їх доцільно враховувати в оцінюванні професійного ризику, плануванні робіт і програмах медичного спостереження.

5. Поєднання хімічних, фізичних, біологічних, біомеханічних і психосоціальних чинників ускладнює оцінювання сумарного впливу. Комбіновані експозиції можуть мати адитивний характер або взаємодіяти іншим чином, однак конкретний тип взаємодії не можна встановлювати лише на підставі одночасної наявності кількох небезпек. Потрібні дані про рівні й тривалість експозицій, часову послідовність, біологічну правдоподібність та клінічні наслідки. Експозомний підхід допомагає реконструювати сукупність впливів упродовж трудового життя, але не замінює професійного анамнезу, гігієнічного обстеження та клінічної диференційної діагностики.

6. Мультиморбідність і зниження фізіологічного резерву можуть впливати на переносимість професійних навантажень, перебіг захворювань і відновлення після шкідливих впливів. Водночас наявність супутніх захворювань не доводить їх професійного походження й не повинна підміняти аналіз причинності. Клінічна оцінка має враховувати вік, попередні експозиції, стан здоров'я та індивідуальну вразливість, зберігаючи пріоритет усунення небезпеки й адаптації умов праці над необґрунтованим виключенням працівника з професійної діяльності.

7. Основою профілактики залишається ієрархія контролю небезпек: їх усунення, заміна менш небезпечними матеріалами або процесами, інженерні рішення, організаційні заходи та належно підібрані засоби індивідуального захисту. Ефективність профілактики необхідно оцінювати за фактичним зниженням експозиції та змінами показників безпеки й здоров'я, а не лише

за наявністю інструкцій, навчання або засобів захисту. Впровадження нових технологій має супроводжуватися оцінюванням небезпек протягом усього життєвого циклу — від виробництва й експлуатації до ремонту та утилізації.

8. Раннє виявлення професійних захворювань залежить від систематичного збору професійного анамнезу, доступності гігієнічної інформації, належного клінічного обстеження та ефективного маршруту направлення до фахівців. Назви професії або посади недостатньо для реконструкції експозиції: необхідно з'ясовувати конкретні завдання, використані матеріали, режими роботи, аварійні події та часовий зв'язок між експозицією й симптомами. Якщо історичні вимірювання відсутні, реконструкція умов праці можлива за документами й іншими доступними даними, але має відкрито позначати межі достовірності.

9. Цифрові системи й штучний інтелект можуть допомагати в моніторингу небезпечних умов, аналізі виробничих даних і своєчасному реагуванні. Проте вони не гарантують автоматичного зниження ризику: результат залежить від якості вимірювань, надійності алгоритмів, прозорості критеріїв, участі працівників і реальних дій після виявлення проблеми. Цифровий нагляд також потребує захисту персональних даних, обмеження непропорційного контролю та запобігання дискримінаційному використанню медичної інформації.

10. Для України профілактика емерджентних професійних ризиків має бути складовою технологічної модернізації, відновлення інфраструктури, розвитку відновлюваної енергетики та кліматичної адаптації. Роботи з відновлення пошкоджених об'єктів, демонтажу конструкцій і поводження з відходами потребують оцінювання конкретних матеріалів, можливих забруднювачів, фізичних небезпек і умов виконання робіт. Пріоритетними організаційними завданнями є міждисциплінарна взаємодія, доступність професійної медицини для працівників із різними формами зайнятості, належний обмін даними та регулярне оцінювання результативності профілактичних заходів.

Узагальнюючи, ефективна відповідь на емерджентні професійні ризики передбачає перехід від переважно реактивного

реагування на встановлені захворювання до систематичного виявлення небезпек, оцінювання експозицій, раннього клінічного розпізнавання та контролю ризиків на джерелі. Такий підхід не скасовує вимог до доказовості, а робить їх практично значущими: рішення мають відповідати наявним даним, відкрито враховувати невизначеність і переглядатися в міру накопичення доказів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lindholm M., Reiman A., Tappura S. The evolution of new and emerging occupational health and safety risks: A qualitative review. Work. 2024;79(2):503-521. doi:10.3233/WOR-230005.

2. Shekaftik S.O., SheikhMozafari M.J., Biganeh J., Fasih Ramandi F., Shahtaheri S.J. Occupational hazards of emerging technologies: Insights from key-enabling technologies. Science of the Total Environment. 2025;995:180101. doi:10.1016/j.scitotenv. 2025. 180101.

3. National Institute for Occupational Safety and Health. About Additive Manufacturing (3D Printing). Centers for Disease Control and Prevention; 2024. Available from: https://www.cdc.gov/niosh/manufacturing/about/additive-manufacturing.html.

4. Brown C.W., Goldfine C.E., Allan-Blitz L.T., et al. Occupational, environmental, and toxicological health risks of mining metals for lithium-ion batteries: a narrative review of the PubMed database. Journal of Occupational Medicine and Toxicology. 2024;19:35. doi:10.1186/s12995-024-00433-6.

5. Midander K., Julander A., Rosengren E., Johannesson S., Harari F. Sustainable Working Life Within the Production and Recycling of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles (GreenWorkLiB). Batteries. 2026;12(6):203. doi:10.3390/batteries12060203.

6. Hess P., Skoczylas A., Smętek J., Wołosik E., Zurawski A. Smart digital systems for improving worker safety and health: Overview of research and practices: comparative report of case studies. European Agency for Safety and Health at Work; 2024. doi:10.2802/3725120.

7. European Agency for Safety and Health at Work. OSH management in the context of an ageing workforce. Bilbao: EU-OSHA. Available from: https://osha.europa.eu/en/themes/osh-management-context-ageing-workforce.

8. International Labour Organization. The effects of non-standard forms of employment on worker health and safety. Conditions of Work and Employment Series No. 67. Geneva: ILO; 2015. Available from: https://www.ilo.org/publications/effects-non-standard-forms-employment-worker-health-and-safety.

9. European Agency for Safety and Health at Work. Health and safety insights for digital platform work. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2024. doi:10.2802/378.

10. Floeder A., Jones R.M., Arnold S.F. Risk assessment methods in occupational health and hygiene: a scoping review. Annals of Work Exposures and Health. 2025;69(2):120–131. doi:10.1093/annweh/wxae095.

11. Pega F., Momen N.C., Bero L., et al. Towards a framework for systematic reviews of the prevalence of exposure to environmental and occupational risk factors. Environmental Health. 2022;21:64. doi:10.1186/s12940-022-00878-4.

12. World Health Organization. Framework for the use of systematic review in chemical risk assessment. Geneva: WHO; 2021. ISBN 978-92-4-003448-8. Available from: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034488.

13. World Health Organization. WHO guidelines on protecting workers from potential risks of manufactured nanomaterials. Geneva: WHO; 2017. ISBN 978-92-4-155004-8. Available from: https://www.who.int/publications/i/item/9789241550048.

14. Schulte P.A., Leso V., Niang M., Iavicoli I. Current state of knowledge on the health effects of engineered nanomaterials in workers: a systematic review of human studies and epidemiological investigations. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health. 2019;45(3):217–238. doi:10.5271/sjweh.3800.

15. National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Risk Assessment of Engineered Nanomaterials. CDC; 2024. Available from: https://www.cdc.gov/niosh/bulletin/2024/nano_20_risk.html.

16. Yoon C., Kim S., Park D., Choi Y., Jo J., Lee K. Chemical use and associated health concerns in the semiconductor manufacturing industry. Safety and Health at Work. 2020;11(4):500–508. doi:10.1016/j.shaw.2020.04.005.

17. Kim K., Sung H.K., Lee K., Park S.K. Semiconductor work, leukemia, and cancer risk: a systematic review and meta-analysis. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022;19(22):14733. doi:10.3390/ijerph192214733.

18. Modupeola D., Popoola P. Safety practices and occupational hazards of the additive manufacturing of high entropy alloys. Safety in Extreme Environments. 2024;6:139–146. doi:10.1007/s42797-023-00097-1.

19. Hodson L., Dunn K.L., Dunn K.H., Glassford E., Hammond D., Roth G. Approaches to safe 3D printing: a guide for makerspace users, schools, libraries, and small businesses. Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health; 2023. DHHS (NIOSH) Publication No. 2024–103. doi:10.26616/NIOSHPUB2024103. Available from: https://www.cdc.gov/niosh/docs/2024-103/default.html.

20. Park D.U., Zoh K.E., Jeong E.K., Koh D.H., Lee K.H., Lee N., Ha K. Assessment of occupational health risks for maintenance work in fabrication facilities: brief review and recommendations. Safety and Health at Work. 2024;15(1):87–95. doi:10.1016/j.shaw.2023.11.010.

21. Won Y.L., Lee H.Y., Choi J., Koh D.H. Occupational exposure to nickel and cobalt and health symptoms among lithium-ion battery workers in Korea. International Archives of Occupational and Environmental Health. 2025;98(9–10):849–857. doi:10.1007/s00420-025-02172-5.

22. Occupational Safety and Health Administration. Lithium-ion Battery Safety: Hazards. Washington, DC: OSHA. Available from: https://www.osha.gov/lithium-ion-battery-safety/hazards.

23. World Health Organization. Electronic waste (e-waste). Fact sheet. Geneva: WHO; 2024 Oct 1. Available from: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-%28e-waste%29.

24. Vitale E., Salvago P., Campanella A.F., Cirrincione L. Emerging occupational risks in green jobs: a review. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health. 2024;37(3):244–256. doi:10.13075/ijomeh.1896.02396.

25. European Agency for Safety and Health at Work. Health and safety of workers in green jobs. OSHwiki. Available from: https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/health-and-safety-workers-green-jobs.

26. Cunha L., Silva D., Macedo M. Different shades of green: an analysis of the occupational health and safety risks faced by wind farm workers. Sustainability. 2024;16(7):3012. doi:10.3390/su16073012.

27. Duroha J.C., Macht G.A. Solar installation occupational risks: a systematic review. Safety Science. 2023;160:106048. doi:10.1016/j.ssci.2022.106048.

28. World Health Organization. Laboratory biosafety manual. 4th ed. Geneva: WHO; 2020. ISBN 978-92-4-001131-1. Available from: https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789240011311.

29. Descatha A., Hamzaoui H., Takala J., Oppliger A. A systematized overview of published reviews on biological hazards, occupational health, and safety. Safety and Health at Work. 2023;14(4):347–357. doi:10.1016/j.shaw.2023.10.008.

30. Graham J.C., Hillegass J., Schulze G. Considerations for setting occupational exposure limits for novel pharmaceutical modalities. Regulatory Toxicology and Pharmacology. 2020;118:104813. doi:10.1016/j.yrtph.2020.104813.

31. World Health Organization. Laboratory biosafety manual, 4th edition: Risk assessment. Geneva: WHO; 2020. Available from: https://www.who.int/publications/i/item/9789240011458.

32. International Labour Organization. Ensuring safety and health at work in a changing climate: Global report. Geneva: ILO; 2024. ISBN 978-92-2-040506-2 (print); 978-92-2-040507-9 (PDF). Available from: https://www.ilo.org/publications/ensuring-safety-and-health-work-changing-climate.

33. Gibb K., Beckman S., Vergara X.P., Heinzerling A., Harrison R. Extreme heat and occupational health risks. Annual Review of Public Health. 2024;45(1):315–335. doi:10.1146/annurev-publhealth-060222-034715.

34. Habibi P., Razmjouei J., Moradi A., Mahdavi F., Fallah-Aliabadi S, Heydari A. Climate change and heat stress resilient outdoor workers: findings from systematic literature review. BMC Public Health. 2024;24:1711. doi:10.1186/s12889-024-19212-3.

35. Wah W., Gelaw A., Glass D.C., Sim M.R., Hoy R.F., Berecki-Gisolf J., et al. Systematic review of impacts of occupational exposure to wildfire smoke on respiratory function, symptoms, measures and diseases. International Journal of Hygiene and Environmental Health. 2025;263:114463. doi:10.1016/j.ijheh.2024.114463.

36. Nowrouzi-Kia B., Choi C., Premji R., Sathananthan A., Balakrishnar K., Haritos A., et al. The impacts of climate change on occupational health and work among outdoor workers: a scoping review. PLOS Global Public Health. 2026;6(2): e0005888. doi:10.1371/journal.pgph.0005888.

37. Barbey C., Bonvallot N., Clerc F.. Health Outcomes Related to Multiple Exposures in Occupational Settings: A Review. Safety and Health at Work. 2024;15(4):382–395. doi:10.1016/j.shaw.2024.10.004. Available from: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11650800/.

38. Peters S., Undem K., Oude Hengel K., Schlunssen V., Selander J., Solovieva S., et al. Narrative review of occupational exposures and noncommunicable diseases. Annals of Work Exposures and Health. 2024;68(6):562–580. doi:10.1093/annweh/wxae045.

39. Kuijpers E., Ge C., Loh M., et al. 309. Development of an exposome toolbox for reducing the occupational burden of disease: the EU EPHOR project [conference abstract]. Annals of Work Exposures and Health. 2024;68(Suppl 1):1. doi:10.1093/annweh/wxae035.121.

40. European Agency for Safety and Health at Work. Emerging risks. Bilbao: EU-OSHA. Available from: https://osha.europa.eu/other/emerging-risks. Accessed 2026 Oct 19.

41. World Health Organization. Healthy workplace framework and model: background and supporting literature and practices. Geneva: WHO; 2010. ISBN 978-92-4-150024-1. Available from: https://www.who.int/publications/i/item/who-healthy-workplace-framework-and-model.

42. International Labour Organization. Revolutionizing health and safety: the role of AI and digitalization at work: global report. Geneva: ILO; 2025. ISBN 978-92-2-041770-6 (print); 978-92-2-041771-3 (PDF). doi:10.54394/KNZE0733. Available from: https://www.ilo.org/publications/revolutionizing-health-and-safety-role-ai-and-digitalization-work.

43. World Health Organization. Occupational health: expanding health coverage to all workers. Geneva: WHO. Available from: https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/occupational-health/health-coverage. Accessed 2026 Oct 19.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Капустник Валерій

НОВІ ТА ЕМЕРДЖЕНТНІ ПРОФЕСІЙНІ ЗАХВОРЮВАННЯ В УМОВАХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І КЛІМАТИЧНИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ: виробничі експозиції, механізми патології та профілактика

Монографія

Комп'ютерна верстка — *Євгеній Ткаченко*

ТОВ «Видавничий дім «Інтернаука»
Україна, м. Київ, вул. Павлівська, 22, оф. 12
Контактний телефон: +38 (067) 401-8435
E-mail: editor@inter-nauka.com
www.inter-nauka.com
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців
№ 6275 від 02.07.2018 р.