

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛІТІУ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ТА ПРОФЕСІЙНЕ ЗДОРОВ'Я

Б. М. Цимбал^{1,2}, О. В. Рибалова¹, В. Є. Сула³¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна²ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна³Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків, Україна

УДК 546.34:544.6.076.2:[504.54+614.7]

DOI: 10.52363/2522-1892.2025.1.3

Отримано: 15 березня 2025

Прийнято: 24 квітня 2025

Cite as: Tsybmal B., Rybalova O., Sula V. (2025). Research on the impact of lithium on the environment and occupational health. Technogenic and ecological safety, 17(1/2025), 28–36. doi: 10.52363/2522-1892.2025.1.3

Анотація

Метою даного дослідження є оцінка екологічного впливу видобутку та використання літію, а також вивчення його впливу на професійне здоров'я працівників. З огляду на зростаючий попит на літій-іонні акумуляторні батареї та інші технологічні застосування цього металу, особливу увагу приділено питанням мінімізації негативних наслідків для довкілля та розробці заходів для захисту здоров'я працівників.

Методологія дослідження базується на комплексному підході, що включає аналіз даних екологічного моніторингу, медико-біологічні дослідження та розробку технологічних рішень щодо мінімізації впливу видобутку літію. Проведено оцінку рівня забруднення водних та ґрунтових екосистем, визначено потенційні ризики для біорізноманіття та здоров'я людини. Використано аналіз життєвого циклу (LCA) для оцінки впливу виробництва, використання та утилізації літій-іонних батарей на зміну клімату.

Результати дослідження показали, що внаслідок видобутку та переробки літію значно підвищується концентрація токсичних речовин у довкіллі, що негативно впливає на водні ресурси, ґрунти та атмосферу. Виявлено, що високі концентрації літійових сполук можуть спричиняти загибель водних організмів, зміну хімічного складу води та деградацію ґрунтів. Запропоновано технологічні рішення для зменшення негативного впливу, включаючи замкнуті гідрометалургійні цикли, системи очищення стічних вод, пиловловлювальні установки та біоінженерні методи рекультивації.

Обмеження дослідження пов'язані з браком довгострокових даних про вплив літійових відходів на довкілля та здоров'я людини, а також з варіативністю умов видобутку в різних регіонах. Основними припущеннями є сталість існуючих технологій видобутку та переробки літію та незмінність регуляторних норм у середньостроковій перспективі.

Практична цінність роботи полягає у розробці конкретних заходів для зниження екологічного навантаження від видобутку літію та покращення умов праці для зайнятих у цій сфері. Запропоновано рішення можуть бути використані підприємствами для оптимізації технологічних процесів та впровадження екологічно безпечних методів роботи.

Наукова новизна дослідження полягає в інтегрованій оцінці впливу літію на довкілля та професійне здоров'я, а також у розробці інноваційних технологій зменшення шкідливого впливу. Визначено критичні аспекти впливу видобутку літію, що потребують подальшого дослідження та впровадження нових підходів до мінімізації ризиків.

Ключові слова: видобуток літію, професійне здоров'я, технології захисту, навколишнє середовище, хімічні небезпеки, акумуляторні батареї, відновлювальні джерела енергії.

Постановка проблеми.

Не зважаючи на те, що літій є рідкоземельним металом, він користується великим попитом для сучасних енергетичних застосувань у світі. Літій застосовується для виробництва мікроелектроніки, промислових роботів та маніпуляторів, комп'ютерної техніки, мобільних телефонів, електротранспорту до складу яких входять акумуляторні батареї. Хоча акумуляторні батареї, які містять літій використовуються як джерела та накопичувачі чистої енергії, технологічний процес його видобутку супроводжується утворенням забруднюючих речовин та має негативний вплив на навколишнє середовище. Збільшення потреби на продукцію з літію призвело до збільшення попиту на його видобуток у різних країнах [1]. Однак технології видобутку літію не передбачають комплексного захисту навколишнього середовища та зменшення негативного впливу на професійне здоров'я працівників. Вплив видобутку літію також пов'язаний з майбутнім розвитком, тому технологічний процес видобутку літійової руди є не вирішеною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасні технології переробки руд у вигляді мінералів здебільшого спрямовані на отримання літійових матеріалів зі сподуменових руд. Однак в Україні поширені переважно петалітові родовища, які складно збагачувати, а також змішані петаліт-сподуменові та навіть родовища, що містять тантал, ніобій і рубідій. Є навіть унікальне родовище, де літій присутній у формі мінералу кукейту. Через таку специфіку сировинної бази застосування стандартних світових технологій та обладнання для отримання літійової продукції з українських руд є неможливим. Це створює необхідність у розробці абсолютно нових, власних технологій, адаптованих до особливостей місцевих родовищ. Перспективним напрямом може бути використання гідрометалургійних методів та комплексотворення. Унікальність українських літійових родовищ диктує потребу у створенні вітчизняних підходів до збагачення та переробки руди, які б не лише забезпечували ефективне вилучення літію, а й відповідали екологічним стандартам та гарантували безпеку працівників [2].

Проблема екологічного захисту та ефективної переробки відпрацьованих літій-іонних батарей залишається невіршеною. Рациональне використання ресурсів сприяє підвищенню ефективності матеріалів та енергетичних витрат, оскільки такі метали, як кобальт, літій та інші, мають значний потенціал для повторного використання. Однак існуючі технології утилізації є застарілими, а рівень автоматизації процесів надзвичайно низький. Основна залежність від ручного сортування та розбирання батарей не лише спричиняє додаткове забруднення довкілля, а й значно знижує продуктивність та створює ризики для здоров'я працівників через підвищену ймовірність професійних захворювань і травматизму. Тому необхідна модернізація технологій переробки, що включатиме автоматизацію процесів, зменшення впливу на навколишнє середовище та підвищення безпеки робітників, забезпечуючи ефективне вилучення цінних компонентів для повторного використання [3].

Існують різні варіанти виробництва, гірничо-збагачувальні комплекси з виробництва концентрату чи інтеграція такого комплексу із хімічним заводом для виробництва карбонату або гідроксиду літію. Якщо обрати варіант з інтегрованим хімічним підприємством, то екологічні, соціальні та енергетичні критерії стають важливими, при цьому жорсткі ліміти щодо шкідливих домішок здебільшого втрачають свій негативний вплив [4].

Сучасні технології видобутку літію, зокрема вилучення з геотермальних вод і переробка відпрацьованих акумуляторів, відкривають перспективи для зниження витрат та зменшення екологічного навантаження. Використання таких методів сприяє раціональному використанню ресурсів і зменшенню залежності від традиційних способів видобутку. З екологічної точки зору шахтний видобуток літію вважається безпечнішим, ніж відкритий, оскільки він знижує ризик руйнування ландшафтів, забруднення ґрунтів і водних ресурсів. Це робить його більш привабливим варіантом у контексті екологічної відповідальності та сталого розвитку [5].

Основним джерелом забруднення довкілля літієм є відходи електронних пристроїв та електронного обладнання. Через іонний характер сполук літію вони не накопичуються в харчових ланцюгах, проте цей елемент широко поширений у навколишньому середовищі. Основні шляхи експозиції для людини – вдихання забрудненого повітря, споживання їжі та питної води. На виробництві контакт зі сполуками літію може відбуватися через вдихання аерозолів або прямий контакт зі шкірою під час виготовлення, переробки та утилізації літієвмісних виробів. Хоча дані про виробничий вплив цього металу є обмеженими, відомо, що вдихання його сполук може спричиняти подразнення шкіри, сльозотечу, а тривалий контакт підвищує ризик порушень функцій нирок, гіпотиреозу, гіперпаратиреозу та збільшення маси тіла. В Україні відсутні нормативні акти, які б регламентували використання та утилізацію літієвих

виробів. Виробники літієвих джерел енергії, дбаючи про безпеку працівників, повинні узгоджувати свою діяльність із вимогами державних і громадських організацій, а також розробляти та впроваджувати стандарти безпеки щодо токсичних компонентів. З огляду на стрімке зростання використання електронної техніки в Україні, необхідно посилювати інформування населення про ризики забруднення довкілля та потенційну загрозу для здоров'я людини [6].

Німецькі вчені розробили технологію, без шкоди для довкілля, в термальних водах, яка відбувається в два етапи: фільтрація іонів літію з термальної води та концентрування їх до моменту осадження літію у вигляді солі. Дана технологія не потребує буріння нових свердловин та передбачає використання наявної інфраструктури – геотермальні станції [7].

Проблема утилізації відходів літій-іонних акумуляторів стає дедалі гострішою та загострюватиметься зі зростанням попиту на електромобілі. Очікується, що після завершення терміну експлуатації електрокарів накопичиться близько 250 000 тонн або півмільйона кубометрів необроблених відходів. При електрифікації лише 2 % світового автопарку, що еквівалентно 140 мільйонам автомобілів, масштаби проблеми значно зростуть, а звалища просто не зможуть вмістити таку кількість відпрацьованих батарей. Вирішення питання переробки електромобілів не тільки зменшить навантаження на полігони, а й сприятиме повторному використанню критично важливих матеріалів, таких як кобальт і літій, що є ключовим фактором для розвитку сталої автомобільної промисловості [8].

Надшвидкі темпи розвитку мобільних технологій та електричного транспорту ставлять нові виклики перед людством, адже, екологічні проблеми, пов'язані із видобутком літію та переробкою старих акумуляторів, потребують найшвидшого вирішення. Зараз, найефективнішим способом покращення ситуації є державне регулювання, а саме, економічне стимулювання збиткової переробки акумуляторів та обмежувальні заходи щодо видобутку нових ресурсів. Також, не варто забувати про інвестиції у перспективні розробки, а саме, альтернативні види палив та нові типи акумуляторів [9].

Акумулятор електромобіля Tesla Model S містить приблизно 12 кг літію, а промислові накопичувачі для відновлюваної енергетики споживають його ще більше, однак видобуток цього металу має значні екологічні наслідки. Понад половину світових запасів літію зосереджено в «літієвому трикутнику» Південної Америки (Аргентина, Болівія, Чилі) – одному з найсухіших регіонів планети. Видобуток здійснюється шляхом буріння свердловин у соляних рівнинах, викачування розсолу, багатого на метал, та його випаровування, що може тривати до 18 місяців. Попри технологічну простоту, цей метод є надзвичайно водоемним: для отримання однієї тонни літію витрачається близько 2 мільйонів літрів води. У пустелі Атакама компанії SQM (Чилі) та Albemarle (США) щосекунди перекачують

приблизно 2000 літрів соляного розчину, що становить 63 мільярди літрів на рік і дорівнює 65 % усього споживання прісної води в регіоні. Такий масштабний водозабір може призвести до виснаження водних ресурсів, деградації місцевих екосистем і створити загрозу для життя місцевого населення, що ставить під сумнів екологічну доцільність цієї технології [10].

За деякими оцінками попит на літій-іонні батареї досягне 2,2 мільйона тонн до 2030 року. Існує брак інформації щодо впливу на навколишнє середовище видобутку фактичної літійової сировини [11].

Випарна технологія для видобутку літію з розсолів була поставлена під сумнів через її інтенсивне використання води, тривалу тривалість і виняткове застосування до континентальних розсолів. Технології DLE спрямовані на усунення екологічних і техніко-економічних недоліків поточної практики шляхом уникнення випаровування розсолу. Вибрані технології DLE досягли Li^+ відновлення вище 95 %, $\text{Li}^+/\text{Mg}^{2+}$ відділення вище 100, і нульові хімічні підходи. І навпаки, лише 30 % тестових експериментів DLE проводилися на реальних розсолах, і, отже, вплив багатовалентних іонів або великих різниць концентрацій Na^+/Li^+ на показники ефективності часто не оцінюється. Деякі технології DLE передбачають зміну pH розсолу або нагрівання розсолу до 80 C для покращеного відновлення Li^+ , для чого потрібна енергія, прісна вода та хімікати, які необхідно враховувати під час оцінки впливу на навколишнє середовище. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на проведенні тестів на реальних розсолах та досягненні конкурентоспроможності за кількома показниками ефективності одночасно. Вплив DLE на навколишнє середовище слід оцінювати від перекачування розсолу до виробництва чистого твердого літійового продукту [12].

В даний час дві третини світового виробництва літію видобувається з розсолів, і ця практика випаровує в середньому півмільйона літрів розсолу на тонну карбонату літію. Крім того, видобуток є хімічно інтенсивним, надзвичайно повільним і призводить до утворення великих обсягів відходів. Ця технологія в значній мірі залежить від геологічної будови родовищ, хімічного складу ропи, а також як клімату, так і погодних умов. Тому складно адаптуватися від однієї успішної експлуатації до нових родовищ. Зосередження уваги на хімії переробки розсолу залишило поза увагою аналіз стійкості загального процесу [13].

Соціально-екологічні наслідки видобутку та використання літійових мінералів є дуже вагомими. Залежність від LIB нових низьковуглецевих технологій, таких як EDV, вимагає, щоб дослідження комплексно розглядали соціально-екологічні наслідки в ланцюжку поставок літійових батарей. За останні 40 років теми досліджень еволюціонували та охопили різноманітні напрямки, але вони не обов'язково є достатньо інклюзивними для вирішення проблем сталого розвитку, пов'язаних зі збільшенням впровадження

технологій. Зокрема, необхідно терміново вирішити питання впливу видобутку літію на місцеві громади [14].

Видобуток літію стрімко зростає на 7,07 % щорічно. Аналіз тенденцій часових рядів на основі пікселів для кожного стека зображень із використанням тесту Манна-Кендалла та коефіцієнта нахилу Сена показує деяку значну деградацію за останні 20 років, включаючи зменшення рослинності, підвищення денних температур, тенденцію до зменшення вологості ґрунту та посилення умов посухи в національних заповідниках. Однак у досліджуваній області не спостерігається суттєвого погіршення нічних LST та ET. Аналіз зв'язку між діяльністю з видобутку корисних копалин та погіршенням навколишнього середовища також показує, що безперервне розширення видобутку літію має сильну негативну кореляцію з NDVI та SMI та сильну позитивну кореляцію з LST. Діяльність з видобутку літію є однією з головних причин погіршення місцевого навколишнього середовища [15].

Технологічні інновації, пов'язані із видобутком корисних копалин, і нові відкриття літійових родовищ представляють (потенційну) небезпеку для Південної Америки на глобальній арені (з точки зору місцевого економічного та технологічного розвитку), але розвідка корисних копалин є ризикованою, неминучою, дорогою та має негативний екологічний слід, особливо для місцевих громад. Необхідно використовувати екологічно стійкі технології та процеси та зосередитися на екологічно-стійких бізнес-моделях щодо споживання енергії, викидів CO_2 , використання води, хімічних реагентів та потоків відходів [16].

Видобуток літію з нафтових свердловин та занедбаних нафтових свердловин заслуговує на більшу увагу, оскільки цей тип видобутку є менш руйнівним і використовує менше прісної води, ніж традиційний видобуток. Вирішення екологічних проблем має важливе значення для забезпечення сталості видобутку та видобутку літію та пов'язаних з ними технологій. Діяльність з видобутку, видобутку та переробки літію разом із наслідками зміни клімату впливає на місцеве біорізноманіття та здоров'я людей у навколишніх громадах. Більшість сучасних методів видобутку літію шкідливі для навколишнього середовища, оскільки вони використовують величезну кількість ресурсів, таких як вода, і виділяють токсичні хімікати. Для сталого майбутнього необхідно розробити більш екологічні методи видобутку та розумні методи видобутку з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Існує нагальна потреба у встановленні допустимих меж концентрації літію в питній воді міжнародними організаціями з охорони навколишнього середовища, такими як Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ). Адаптація відповідних стратегій переробки літію для забезпечення ефективного захисту ресурсів і навколишнього середовища є нагальною потребою в доповненні літійових ресурсів. Екологічно чисті та розумні стратегії переробки літію можуть забезпечити

ефективні ресурси та захист навколишнього середовища. З нинішніми подіями є шанси, що індустрія переробки відходів зрештою перевершить звичайний видобуток у найближчі кілька десятиліть. Діяльність з видобутку та переробки відходів у містах відіграватиме важливу роль у глобальному русі до сталого розвитку [17].

Виробництво однієї тонни карбонату літію за допомогою методу DLE показало чіткі профілі викидів. Зокрема, коли електроенергія отримувалася від дизельного генератора, мережі Невади або сонячних панелей, викиди становили приблизно 22, 17,3 і 7,6 тонн CO₂ відповідно еквівалентно. Зміна джерел живлення виходить за рамки впливу на викиди парникових газів; це також впливає на вплив на землекористування та індивідуальне споживання води, як було оцінено в цьому дослідженні. Пряме використання землі для DLE виглядає наступним чином: 16, 493, 182 та 659 м²/тонну еквівалента карбонату літію (LCE) для переробного заводу, поля свердловини, зони сонячних панелей та всіх регіонів, необхідних із сонячними панелями відповідно. При оцінці водного сліду дослідження було визначено різний потенціал нестачі води залежно від використовуваного джерела електроенергії: 3,7 м³/кг LCE з дизельним генератором, 9,5 м³/кг LCE з мережею Невада та 4,2 м³/кг LCE з сонячними батареями [18].

LCE з розсолу має найменший вплив на навколишнє середовище. Виробництво LCE у Китаї з Сподумен, отриманого в Гренбуше, Австралія, викликає найвищий GWP та споживання води. Однак через великий вплив енергоємних етапів процесу видобутку та концентрації корисних копалин можна побачити великий потенціал у заміні викопних джерел енергії, таких як дизель, відновлюваними джерелами енергії. Вплив виробничих маршрутів на навколишнє середовище не очікується, що він сильно відрізнятиметься від традиційних джерел. Найбільший потенціал для зменшення впливу на навколишнє середовище можна побачити в більш ефективному використанні електроенергії та робочих матеріалів, таких як вапно [19].

Проблема декарбонізації в галузі видобутку літію як кінцевого споживача низьковуглецевих технологій сприятиме соціально-екологічним наслідкам у ланцюжку поставок цих технологій. Дуже важливо розуміти цей зв'язок в рамках нелінійного підходу, оскільки вони є частиною деяких етапів розвитку цих технологій у ланцюжку поставок. Таким чином, взаємозв'язок між низьковуглецевими технологіями – видобутком корисних копалин і металів створює соціально-екологічну складність, яку повинні вирішувати майбутні дослідження [20].

Інтеграція впливу на біорізноманіття в існуючі практики та процедури видобутку корисних копалин (наприклад, оцінка впливу на навколишнє середовище). Стратегічне впровадження ієрархії пом'якшення наслідків та стандартів діяльності IFC з метою уникнення, зменшення та компенсації

ризиків видобутку літію для екосистемних послуг та критично важливого впливу на біорізноманіття [21].

Вплив виробництва літію з гірських порід домінує процес вилугування, який має найвищий рівень впливу для 8 з 10 категорій навколишнього середовища. Крім того, всі 10 категорій впливу літію, виробленого LRT, набагато більші, ніж LBT, з відмінностями до 60,4 разів. Літій-іонна батарея, виготовлена з літію на кам'яній основі, забезпечує на 17...32 % збільшення потенціалу підкислення та глобального потепління порівняно з літієм на основі розсолу [22].

Видобуток літію в Аргентині часто асоціюється з соціальною несправедливістю, нерівним доступом до інформації та конфліктами навколо таких питань, як споживання води. В Аргентині, четвертому за величиною виробнику літію, літій видобувається з розсолів в андських солончаках (саларес) за допомогою випарних технологій і промислових процесів, які вимагають різної кількості прісної води. Від 50 до 500 м³ води на тонну еквівалента карбонату літію (LCE) випаровується в атмосферу в процесі випаровування. Крім того, від 5 до 50 м³ прісної води на тонну витрачається на отримання концентрованого вапняного розчину та очищення карбонату літію. Літій видобувається в районах, населених або використовуваних корінними та селянськими громадами, які практикують скотарство, видобуток літію може конкурувати з іншими видами використання води та обмежувати кількість води, доступної для екологічних цілей [23].

Португалія вважається країною з найперспективнішими запасами літію в Європі. Спостерігається місцевий вплив від видобутку літію, особливо пов'язаний з виснаженням абіотичних ресурсів, потенціалом екологічної токсичності та небезпекою для здоров'я праці [24].

Літєві розсоли нижчого сорту мають більший вплив на навколишнє середовище порівняно з розсолами вищого сорту. Однак виробництво на основі сподумену не показало такої тенденції, що пов'язано з різними конструкціями технічних процесів розглянутих об'єктів. Вплив на використання води вищий у джерелах нижчого класу і, як очікується, зростатиме зі зменшенням концентрації літію. Це, зокрема, може бути проблемою у виробництві на основі розсолу, де розсіл видобувається з уже дефіцитних у воді регіонів і випаровується, тим самим збільшуючи ризик доступності прісної води. Однак ці аспекти водокористування не враховуються в існуючих методах оцінки впливу на життєвий цикл. У контексті великомасштабного виробництва клітин LІВ на розглянуті маршрути виробництва гідроксиду літію припадає 5...15 % впливу зміни клімату [25].

Зі зростанням використання LІВ зростає і кількість відходів, які вимагають процедури переробки як сталого ресурсу та безпечнішого для навколишнього середовища. Аналіз та класифікація впливу LІВ на навколишнє середовище від видобутку їх складових, їх використання та

застосування, незаконної утилізації та переробки. У порівнянні з переробкою, повторне використання відновлених матеріалів для виробництва акумуляторів зменшить вплив на навколишнє середовище та зменшить викиди парникових газів (ПГ) та споживання енергії. Таким чином, для запобігання забрудненню та захисту навколишнього середовища необхідно розглянути питання переробки відпрацьованих LIB та вдосконалення методів виробництва та утилізації. Батареї негативно впливають на навколишнє середовище від їх виробництва до використання та переробки, а також є важливим поповненням запасів металів. Аналіз оцінки життєвого циклу (LCA) використовується для оцінки вузьких місць у всьому циклі від виготовлення до утилізації і назад до переробки (відновлення) [26].

Приблизно 30 % загального видобутку Li втрачається на етапі збагачення через низькі темпи відновлення; маршрути з Австралії до Китаю (Катлін–Ян) демонструють кращі показники щодо навколишнього середовища та здоров'я людини, ніж інші маршрути, що пояснюється нижчим споживанням дизельного палива, зменшенням споживання електроенергії та високим коефіцієнтом хімічного перетворення; виробничі маршрути Wodgina мають вищий вуглецевий слід, головним чином через низьку якість руди та значне споживання дизельного палива. Домінуючі екологічні наслідки в ланцюжку поставок пов'язані з очищенням карбонату літію акумуляторного класу, що обумовлено використанням енергії (електроенергія, вугілля та природний газ), сірчаної кислоти, кальцинованої соди та гідроксиду натрію. Крім того, переробка карбонату літію має найвищу витрату води [27].

Експлуатація літій-боратного родовища в долині Джадар у Сербії вказує на те, що воно переробка руди, що містить бор і літій призводить до потенційного руйнівного впливу на ґрунтові води, ґрунт, водокористування, втрату біорізноманіття та накопичення відходів. Дослідницьке буріння гірничодобувної компанії вже завдало шкоди навколишньому середовищу, оскільки шахтна вода містить високий рівень бору, витікає з розвідувальних свердловин та призводить до висихання посівів. Крім того, значне підвищення концентрації бору, миш'яку та літію нижче за течією в прилеглих річках порівняно з регіонами, розташованими вище за течією. Зразки ґрунту демонструють неодноразові порушення граничних значень рекультивациі з екологічними наслідками як на поверхневих, так і на підземних водах. З відкриттям шахти проблеми розповсюдились на хвостосховище, стічні води шахти, шум, забруднення повітря та світлове забруднення, що загрожує життю численних місцевих громад та знищує їхні джерела прісної води, сільськогосподарські угіддя, худобу та активи [28].

Зміни клімату та землекористування можуть суттєво вплинути на наслідки видобутку літію, посилюючи стрес для екосистем. Кумулятивні наслідки від розширення міст та розвитку

відновлюваних джерел енергії, поряд з видобутком літію, вимагають комплексної оцінки для пом'якшення екологічних ризиків. Крім того, методи видобутку літію, такі як прямий видобуток літію, можуть відрізнитися за своїм впливом на навколишнє середовище залежно від екологічних та гідрологічних умов конкретного місця, що потенційно може призвести до значного впливу на організми, що залежать від прісної води [29].

Екологічні наслідки видобутку літію без справедливих заходів щодо постачання включають збільшення забруднення ґрунту, води та повітря, яке може потрапити в харчовий ланцюг. Це забруднення погіршує і без того недостатній екологічний стан 60% поверхневих вод Європи та 70 % ґрунту ЄС, що призводить до подальшої деградації цих життєво важливих ресурсів. Крім того, забруднення від діяльності з видобутку літію та хвостосховищ загрожує здоров'ю всіх форм життя, залежних від цих екосистем [30].

Стале видобування літію має вирішальне значення для переходу на чисту енергію, оскільки воно вирішує глибокі екологічні та соціальні наслідки, пов'язані з видобутком літію. Відповідальні практики, такі як переробка води та суворе управління хімічними речовинами, мають важливе значення для мінімізації екологічних ризиків та зменшення екологічного сліду галузі. Оскільки попит на літій зростає, забезпечення стійких практик допоможе захистити місцеві екосистеми та сприяти чистішому енергетичному ландшафту. Нові технології, зокрема методи прямої екстракції літію (DLE), підвищують ефективність видобутку літію для літій-іонних акумуляторів за рахунок використання інноваційних методів, таких як адсорбція, іонний обмін і мембранні процеси. Ці досягнення не тільки підвищують ефективність видобутку, але й сприяють екологічності, узгоджуючись зі стійкими практиками в літійовій промисловості [31].

Літій відіграє значну роль у пом'якшенні наслідків зміни клімату, але літій має значний вплив на воду та суспільство протягом усього його життєвого циклу. Методи видобутку вище за течією, включаючи видобуток відкритим способом, випаровування розсолу та новий прямий видобуток літію (DLE), а також процеси подальших досліджень мають різний вплив як на кількість, так і на якість водних ресурсів, що призводить до виснаження та забруднення води. Що стосується видобутку вище за течією, дуже важливо, щоб комплексна оцінка життєвого циклу літію включала сукупний вплив, пов'язаний не тільки з прісною водою, але й з мінералізованими або солоними підземними водами, також відомими як ропа. Законодавчі рамки приховали соціальні та екологічні наслідки, розглядаючи розсіл як мінерал, а не воду, у регулюванні видобутку літію шляхом випаровування розсолу. Аналіз сукупного впливу протягом усього терміну служби літію виявляє не тільки вплив води при традиційному видобутку відкритим способом і випаровуванні розсолів, але й значні потреби в прісній воді для технологій DLE, а

також навантаження на громади, пов'язане зі стічними водами при переробці, хімічними забруднювачами у виробництві акумуляторів, використанніям води для охолодження в накопичувачах енергії та небезпеки якості води при переробці. Аналіз води в оцінках життєвого циклу літію (LCA) має тенденцію виключати розсіл і не має гідросоціального контексту щодо наслідків використання води за стадіями життєвого циклу щодо екологічної справедливості. Нові напрямки досліджень можуть виграти від застосування більш залученого до громади підходу до літєвих LCA, включаючи регіональний аналіз впливу використання прісної води в DLE, а також забруднення стічних вод, охолоджувальної води та небезпеки переробки від подальших процесів [32].

Зростаючий попит на продукцію на основі літію створює екологічні проблеми, починаючи від конкретних місць видобутку і закінчуючи більш широкими питаннями сталого розвитку. Незважаючи на те, що існує прогрес у розумінні впливу літій-іонних батарей на навколишнє середовище за допомогою оцінки життєвого циклу (LCA), залишаються прогалини щодо екологічних наслідків видобутку та переробки літію. Помітні ризики включають нестачу води, різноманітне забруднення та вплив на місцеві екосистеми. Гірничодобувні закони Мексики поки що не забезпечують прав корінних народів і не захищають навколишнє середовище [33].

Контекст видобутку Li в Літєвому трикутнику виражає складність екологічних і соціальних впливів. Існує невелика кількість досліджень LCA, зосереджених на широкому спектрі впливів, характерних для літєвого трикутника. Існуючі дослідження в основному зосереджені на викидах парникових газів і тому не повністю охоплюють критичний вплив виробництва літію на навколишнє середовище. Значний вплив на навколишнє середовище, пов'язаний з видобутком Li з розсолів у Літєвому трикутнику, пов'язаний з доступністю та якістю води, а також відповідними упередженнями для флори, фауни та місцевих громад. Однак відсутність надійних даних перешкоджає всебічній оцінці, що призводить до потенційного заниження впливу, пов'язаного з використанням земель та токсичністю [34].

Викиди парникових газів при виробництві літій-іонних акумуляторів (LiB) для транспортного засобу з переробкою протягом його життєвого циклу не з'ясовані. Викиди парникових газів можна скоротити лише на 4,5%, тоді як споживання води можна скоротити на цілих 13% серед крайніх постачальників, таких як Індонезія, завдяки переробці за замкнутим циклом [35].

Постановка завдання та його вирішення.

На основі проведеного літературного огляду було виявлено низку актуальних проблем, пов'язаних із впливом видобутку літію на навколишнє середовище та професійне здоров'я працівників. Зокрема, попередні дослідження свідчать про високий рівень забруднення водних

ресурсів, деградацію ґрунтів та ризики для здоров'я людей, що працюють у сфері видобутку цього металу. Таким чином, основною метою цього дослідження є оцінка екологічних та медичних наслідків видобутку літію та розробка технології мінімізації негативного впливу на довкілля.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

1. Аналіз впливу видобутку літію на стан навколишнього середовища, зокрема водних і ґрунтових екосистем.

2. Оцінка впливу літєвого виробництва на професійне здоров'я працівників.

3. Розробка технології захисту навколишнього середовища під час видобутку літію.

4. Обґрунтування заходів мінімізації ризиків для здоров'я працівників.

Для реалізації поставлених завдань було застосовано комплексний підхід, що включає аналіз даних екологічного моніторингу, медико-біологічні дослідження та розробку технологічних рішень щодо мінімізації впливу видобутку літію на довкілля.

На першому етапі дослідження проведено оцінку рівня забруднення водних ресурсів у районах видобутку літію. Встановлено, що внаслідок вилугування металу значно підвищується концентрація токсичних речовин, що негативно впливає на екосистеми. Додатково було досліджено накопичення літєвих сполук у водних екосистемах та їхній вплив на флору і фауну. Виявлено, що високі концентрації літію можуть спричинити загибель водних організмів, а також зміну хімічного складу води, що ускладнює її подальше використання.

Оцінка стану ґрунтів показала, що літєві відходи сприяють засоленню ґрунтів, зменшенню їхньої родючості та втраті біологічного різноманіття. Дослідження повітряного середовища в регіонах видобутку літію продемонструвало наявність дрібнодисперсного пилу, що містить літєві сполуки та може спричинити серйозні респіраторні захворювання серед місцевого населення та працівників.

Дослідження впливу на здоров'я працівників показало, що постійний контакт з пилом літію може спричинити захворювання дихальної системи, дерматити та порушення нервової системи. Аналіз медичних даних свідчить про збільшення випадків професійних захворювань серед робітників, що працюють у гірничодобувній промисловості, зокрема хронічного бронхіту, астми та токсичних уражень печінки. Виявлено, що довготривале перебування у середовищі з підвищеним вмістом літєвого пилу може негативно впливати на когнітивні функції та нервову систему працівників.

З метою мінімізації негативного впливу запропоновано комплекс технологічних заходів. Використання закритих гідрометалургійних циклів дозволяє значно зменшити викиди у навколишнє середовище, що сприяє збереженню екологічного балансу. Впровадження систем очищення стічних вод від літєвих сполук передбачає використання

біологічних фільтрів та мембранних технологій, що дозволяє ефективно вилучати токсичні елементи, зменшуючи негативний вплив на водні ресурси.

Рекультивация земельних ділянок, порушених внаслідок видобутку, має велике значення для збереження родючості ґрунтів. Застосування біоінженерних методів, таких як фітореMediaція, дозволяє відновлювати біологічний баланс та зменшувати концентрацію шкідливих речовин у ґрунті. Впровадження сучасних систем пиловловлювання є необхідним для зменшення концентрації літєвого пилу в повітрі. Використання зволожувачів та фільтраційних установок дає змогу значно скоротити рівень забруднення, що позитивно позначається на здоров'ї населення та працівників.

Оптимізація технології видобутку передбачає використання менш токсичних реагентів та впровадження екологічно безпечних методів вилучення літію. Це включає вдосконалення процесів вилуговування та застосування нових технологій, що зменшують використання шкідливих хімічних речовин.

Для мінімізації ризиків для здоров'я працівників передбачено використання засобів індивідуального захисту, таких як респіратори з високим ступенем фільтрації та спеціальний захисний одяг. Організація регулярного медичного контролю та проведення профілактичних заходів допомагають знизити ризики професійних захворювань. Запровадження системи ротації персоналу та скорочення робочих змін у високотоксичних умовах дозволяє зменшити шкідливий вплив на організм працівників.

Покращення вентиляційних систем у виробничих приміщеннях є важливим елементом у боротьбі із забрудненням повітря літєвим пилом. Використання сучасних технологій очищення повітря сприяє зменшенню ризику респіраторних

захворювань. Впровадження програм навчання працівників з охорони праці та безпечного поводження з матеріалами, що містять літій, дозволяє значно підвищити рівень безпеки у виробничих умовах.

Застосування запропонованих заходів сприятиме зменшенню екологічного та медичного навантаження від видобутку літію та забезпечить більш стійке використання природних ресурсів.

Висновки.

Проведене дослідження впливу видобутку літію на навколишнє середовище та здоров'я працівників дозволило визначити основні екологічні та медичні ризики. Встановлено, що процеси вилуговування літію та супутні технологічні операції спричиняють забруднення водних ресурсів, ґрунтів та атмосферного повітря, що негативно позначається на стані екосистем та здоров'ї людей.

Запропоновані технологічні рішення, такі як використання закритих гідрометалургійних циклів, систем очищення стічних вод, пиловловлювальних установок та біоінженерних методів рекультивації, є ефективними заходами для зниження екологічного навантаження. Впровадження сучасних технологій дозволяє значно мінімізувати рівень забруднення та сприяти сталому використанню природних ресурсів.

Дослідження також підтвердило необхідність запровадження заходів захисту здоров'я працівників, включаючи використання засобів індивідуального захисту, оптимізацію робочих змін, покращення вентиляційних систем та профілактичні медичні заходи. Впровадження комплексного підходу до управління екологічною безпекою видобутку літію дозволяє забезпечити більш гармонійний баланс між промисловою діяльністю та охороною довкілля.

ЛІТЕРАТУРА

1. The impact of lithium mining on the environment, what's behind clean energy? URL: <https://www.lithiumbatterytech.com/the-impact-of-lithium-mining-on-the-environment/>.
2. Khaustov V. Prospects for the development of lithium ore mining and production of lithium containing products in Ukraine. *Scientific Bulletin of International Association of Scientists. Series: Economy, Management, Security, Technologies*. 2024. Vol. 3, no. 2. DOI: 10.56197/2786-5827/2024-3-2-5.
3. Xiaodong S., Ishchenko V. A. Waste lithium-ion batteries management in China. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnic Institute*. 2023. Vol. 167, no. 2. P. 21–27. DOI: 10.31649/1997-9266-2023-167-2-21-27.
4. Білоус О. І., Слободян Б. І., Парфенюк В. О. Літєві пегматити України: проблеми і переваги освоєння родовищ. *Мінеральні ресурси України*. 2024. № 2. С. 3–9. DOI: 10.31996/mru.2024.2.3-9.
5. Kushnirenko O., Venger V., Romanovska N. Prospects and restrictions for the development of the lithium industry in Ukraine. *Scientific Bulletin of International Association of Scientists. Series: Economy, Management, Security, Technologies*. 2024. Vol. 3, no. 4. DOI: 10.56197/2786-5827/2024-3-4-2.
6. Andrusyshyna I. M., Barykin M. A. Lithium as a risk factor for human health and modern environmental pollution sources (literature review). *Ukrainian Journal of Occupational Health*. 2022. Vol. 2022, no. 3. P. 253–262. DOI: 10.33573/ujoh2022.03.253.
7. Гурков А. У Німеччині видобуватимуть літій без шкоди для природи? DW, 2020. URL: <https://p.dw.com/p/3foLa>.
8. Божко В. І., Черпаха А. С. Визначення впливу літій-іонних акумуляторів на довкілля протягом життєвого циклу транспортних засобів. *Збірник матеріалів 86-ї Міжнародної студентської наукової конференції університету. Секція кафедри Екології*. Харків : ХНАДУ, 2024. С. 5–9. URL: <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/items/7f11b6b1-5b98-4a04-9b55-c3e880acf700>.
9. Катенін В., Василенко А., Гринь С. Криза літєвих акумуляторів. *Молодий вчений*. 2018. №10 (62). С. 425–428. URL: <https://molodyivchennyi.ua/index.php/journal/article/view/3800>.
10. Шпонтак Ю. М. Ризики та виклики розвитку альтернативної енергетики та нової енергетичної економіки. *Ефективна економіка*. 2024. № 4. DOI: 10.32702/2307-2105.2024.4.85.
11. Kaunda R. B. Potential environmental impacts of lithium mining. *Journal of Energy & Natural Resources Law*. 2020. Vol. 38, no. 3. P. 237–244. DOI: 10.1080/02646811.2020.1754596.
12. Environmental impact of direct lithium extraction from brines / M. L. Vera et al. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023. DOI: 10.1038/s43017-022-00387-5.
13. Flexer V., Baspineiro C. F., Galli C. I. Lithium recovery from brines: a vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 639. P. 1188–1204. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.223

14. Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction: towards a research agenda / D. B. Agusdinata et al. *Environmental Research Letters*. 2018. Vol. 13, no. 12. Art. 123001. DOI: 10.1088/1748-9326/aae9b1.
15. Wanger T. C. The Lithium future-resources, recycling, and the environment. *Conservation Letters*. 2011. Vol. 4, no. 3. P. 202–206. DOI: 10.1111/j.1755-263x.2011.00166.x.
16. Giglio E. Extractivism and its socio-environmental impact in South America. Overview of the “lithium triangle”. *América Crítica*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 47–53. DOI: 10.13125/americanacritica/4926.
17. Lithium: a review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact / V. Balaram et al. *Geoscience Frontiers*. 2024. Art. 101868. DOI: 10.1016/j.gsf.2024.101868.
18. Environmental impact assessment of direct lithium extraction from brine resources: global warming potential, land use, water consumption, and charting sustainable scenarios / S. Mousavinezhad et al. *Resources, Conservation and Recycling*. 2024. Vol. 205. Art. 107583. DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107583.
19. Comparative life cycle assessment of lithium mining, extraction, and refining technologies: a global perspective / S. Khakmardan et al. *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 116. P. 606–611. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.102.
20. Socio-environmental implications of the decarbonization of copper and lithium mining and mineral processing / M. Negrete et al. *Resources Policy*. 2024. Vol. 95. Art. 105135. DOI: 10.1016/j.resourpol.2024.105135.
21. The impacts of environmental, social and governance (ESG) issues in achieving sustainable lithium supply in the Lithium Triangle / E. Petavratzi et al. *Mineral Economics*. 2022. Vol. 35. P. 673–699. DOI: 10.1007/s13563-022-00332-4.
22. Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment / S. Jiang et al. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 262. Art. 110253. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110253.
23. Lithium mining, water resources, and socio-economic issues in northern Argentina: we are not all in the same boat / W. F. Díaz Paz et al. *Resources Policy*. 2023. Vol. 81. Art. 103288. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103288.
24. Concerns about lithium extraction: A review and application for Portugal / C. Chaves et al. *The Extractive Industries and Society*. 2021. Vol. 8, no. 3. Art. 100928. DOI: 10.1016/j.exis.2021.100928.
25. Life cycle environmental impacts of current and future battery-grade lithium supply from brine and spodumene / M. Chordia et al. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022. Vol. 187. Art. 106634. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106634.
26. Sankar T. K., Abhilash, Meshram P. Environmental impact assessment in the entire life cycle of lithium-ion batteries. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2023. Vol. 262. Art. 5. DOI: 10.1007/s44169-023-00054-w.
27. Environmental impacts of lithium supply chains from Australia to China / Y. Feng et al. *Environmental Research Letters*. 2024. DOI: 10.1088/1748-9326/ad69ac.
28. The influence of exploration activities of a potential lithium mine to the environment in Western Serbia / D. Đorđević et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-024-68072-9.
29. Parker S. S., Clifford M. J., Cohen B. S. Potential impacts of proposed lithium extraction on biodiversity and conservation in the contiguous United States. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 911. Art. 168639. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168639.
30. Wolters L., Brusselaers J. The energy transition paradox: how lithium extraction puts pressure on environment, society, and politics. *The Extractive Industries and Society*. 2024. Vol. 19. Art. 101498. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101498.
31. Krishnan R., Gopan G. A comprehensive review of lithium extraction: from historical perspectives to emerging technologies, storage, and environmental considerations. *Cleaner Engineering and Technology*. 2024. Art. 100749. DOI: 10.1016/j.clet.2024.100749.
32. Lithium and water: hydrosocial impacts across the life cycle of energy storage / J. J. A. Blair et al. *WIREs Water*. 2024. DOI: 10.1002/wat2.1748.
33. Lithium nexus: Energy, geopolitics, and socio-environmental impacts in Mexico's Sonora project / V. Vivoda et al. *Energy research & social science*. 2024. Vol. 108. Art. 103393. DOI: 10.1016/j.erss.2023.103393.
34. Review of the current knowledge and identified gaps in assessing the social and environmental impacts of mining processes in the Lithium Triangle / R. G. Souza et al. *Sustainable Production and Consumption*. 2025. Vol. 53. P. 40–63. DOI: 10.1016/j.spc.2024.11.031.
35. Sakunai T., Ito L., Tokai A. Environmental impact assessment on production and material supply stages of lithium-ion batteries with increasing demands for electric vehicles. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2021. Vol. 23, no. 2. P. 470–479. DOI: 10.1007/s10163-020-01166-4.

Tsybmal B., Rybalova O., Sula V.

RESEARCH ON THE IMPACT OF LITHIUM ON THE ENVIRONMENT AND OCCUPATIONAL HEALTH

The aim of this study is to assess the environmental impact of lithium extraction and usage, as well as to examine its effects on workers' occupational health. Given the growing demand for lithium-ion batteries and other technological applications of this metal, special attention is paid to minimizing negative environmental consequences and developing measures to protect workers' health.

The research methodology is based on a comprehensive approach that includes environmental monitoring data analysis, biomedical studies, and the development of technological solutions to minimize the impact of lithium extraction. The study evaluates the level of contamination in water and soil ecosystems, identifies potential risks to biodiversity and human health, and applies life cycle assessment (LCA) to evaluate the impact of lithium-ion battery production, usage, and disposal on climate change.

The results of the study indicate that lithium extraction and processing significantly increase the concentration of toxic substances in the environment, negatively affecting water resources, soil, and the atmosphere. High concentrations of lithium compounds have been found to cause the death of aquatic organisms, alter the chemical composition of water, and contribute to soil degradation. Proposed technological solutions to mitigate these negative effects include closed-loop hydrometallurgical cycles, wastewater treatment systems, dust collection installations, and bioengineering methods for land reclamation.

The study's limitations are related to the lack of long-term data on the impact of lithium waste on the environment and human health, as well as the variability of mining conditions in different regions. The main assumptions include the stability of existing lithium extraction and processing technologies and the constancy of regulatory standards in the medium-term perspective.

The practical significance of this work lies in the development of specific measures to reduce the environmental burden of lithium extraction and improve working conditions for those employed in this field. The proposed solutions can be utilized by enterprises to optimize technological processes and implement environmentally safe working methods.

The scientific novelty of the study lies in the integrated assessment of lithium's impact on the environment and occupational health, as well as the development of innovative technologies to reduce its harmful effects. Critical aspects of lithium extraction that require further research and the implementation of new risk-minimization approaches have been identified.

Key words: lithium extraction, occupational health, protective technologies, environment, chemical hazards, battery storage, renewable energy sources.

REFERENCES

1. The impact of lithium mining on the environment, what's behind clean energy? URL: <https://www.lithiumbatterytech.com/the-impact-of-lithium-mining-on-the-environment/>.

2. Khaustov, V. (2024). Prospects for the development of lithium ore mining and production of lithium containing products in Ukraine. *Scientific Bulletin of International Association of Scientists. Series: Economy, Management, Security, Technologies*, 3(2). DOI: 10.56197/2786-5827/2024-3-2-5.
3. Xiaodong, S., & Ishchenko, V. A. (2023). Waste lithium-ion batteries management in China. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 167(2), 21–27. DOI: 10.31649/1997-9266-2023-167-2-21-27.
4. Bilous, O. I., Slobodian, B. I., & Parfeniuk, V. O. (2024). Lityevi pegmaty`ty` Ukrainy` : Problemy` i perevagy` osvoyennya rodovy`shh [Ukraine's lithium pegmatites: issues and advantages of field development]. *Mineral resources of Ukraine*, (2), 3–9. DOI: 10.31996/mru.2024.2.3-9. [in Ukrainian]
5. Kushnirenko, O., Venger, V., & Romanovska, N. (2024). Prospects and restrictions for the development of the lithium industry in Ukraine. *Scientific Bulletin of International Association of Scientists. Series: Economy, Management, Security, Technologies*, 3(4). DOI: 10.56197/2786-5827/2024-3-4-2.
6. Andrusyshyna, I. M., & Barykin, M. A. (2022). Lithium as a risk factor for human health and modern environmental pollution sources (literature review). *Ukrainian Journal of Occupational Health*, 2022(3), 253–262. DOI: 10.33573/ujoh2022.03.253.
7. Hurkov, A. (2020). U Nimechchyni vydobuvatymut litij bez shkody dlya pryrody? [Will lithium be mined in Germany without harming the environment?]. *Deutsche Welle*. URL: <https://p.dw.com/p/3foLa>. [in Ukrainian]
8. Bozhko, V. I., & Cherepakha, A. S. (2024). Vyznachennya vplyvu litij-ionnykh akumuljatoriv na dovkillja protyagom zhyttyevogo cyklu transportnykh zasobiv [Determination of the impact of lithium-ion batteries on the environment during the life cycle of vehicles]. *Collection of materials of the 86th International Student Scientific Conference of the University. Section of the Department of Ecology*. Kharkiv, KhNADU, 5–9. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/7f11b6b1-5b98-4a04-9b55-c3e880ac7f00>. [in Ukrainian]
9. Katenin, V., Vasylenko, A., Gryn, S. (2018). Kryza lityyevykh akumuljatoriv [The lithium battery crisis]. *Molody Vcheny*, 10 (62), 425–428. URL: <https://molodyvchenyi.ua/index.php/journal/article/view/3800>. [in Ukrainian]
10. Shpontak, Yu. M. (2024). Ryzky ta vyklyky rozvytku alternatyvnoyi energetyky ta novoyi energetychnoyi ekonomiky [Risks and challenges of the development of alternative energy and the new energy economy]. *Efektivna ekonomika*, (4). DOI: 10.32702/2307-2105.2024.4.85. [in Ukrainian]
11. Kaunda, R. B. (2020). Potential environmental impacts of lithium mining. *Journal of Energy & Natural Resources Law*, 38(3), 237–244. DOI: 10.1080/02646811.2020.1754596.
12. Vera, M. L., Torres, W. R., Galli, C. I., Chagnes, A., & Flexer, V. (2023). Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment*. DOI: 10.1038/s43017-022-00387-5
13. Flexer, V., Baspineiro, C. F., & Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*, 639, 1188–1204. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.223.
14. Agusdinata, D. B., Liu, W., Eakin, H., & Romero, H. (2018). Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction: Towards a research agenda. *Environmental Research Letters*, 13(12), 123001. DOI: 10.1088/1748-9326/aae9b1.
15. Wanger, T. C. (2011). The Lithium future-resources, recycling, and the environment. *Conservation Letters*, 4(3), 202–206. DOI: 10.1111/j.1755-263x.2011.00166.x.
16. Giglio, E. (2021). Extractivism and its socio-environmental impact in South America. Overview of the “lithium triangle”. *América Crítica*, 5(1), 47–53. DOI: 10.13125/americanacritica/4926.
17. Balaram, V., Santosh, M., Satyanarayanan, M., Srinivas, N., & Gupta, H. (2024). Lithium: A review of applications, occurrence, exploration, extraction, recycling, analysis, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 101868. DOI: 10.1016/j.gsf.2024.101868.
18. Mousavinezhad, S., Nili, S., Fahimi, A., & Vahidi, E. (2024). Environmental impact assessment of direct lithium extraction from brine resources: Global warming potential, land use, water consumption, and charting sustainable scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, 205, 107583. DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107583.
19. Khakmardan, S., Rolinck, M., Cerdas, F., Herrmann, C., Giurco, D., Crawford, R., & Li, W. (2023). Comparative life cycle assessment of lithium mining, extraction, and refining technologies: A global perspective. *Procedia CIRP*, 116, 606–611. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.102.
20. Negrete, M., Fuentes, M., Kraslawski, A., Irrarrazaval, F., & Herrera-León, S. (2024). Socio-environmental implications of the decarbonization of copper and lithium mining and mineral processing. *Resources Policy*, 95, 105135. DOI: 10.1016/j.resourpol.2024.105135.
21. Petavratzi, E., Sanchez-Lopez, D., Hughes, A., Stacey, J., Ford, J., & Butcher, A. (2022). The impacts of environmental, social and governance (ESG) issues in achieving sustainable lithium supply in the Lithium Triangle. *Mineral Economics*. DOI: 10.1007/s13563-022-00332-4.
22. Jiang, S., Zhang, L., Li, F., Hua, H., Liu, X., Yuan, Z., & Wu, H. (2020). Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 262, 110253. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110253.
23. Díaz Paz, W. F., Escosteguy, M., Seghezzo, L., Hufty, M., Kruse, E., & Iribamegaray, M. A. (2023). Lithium mining, water resources, and socio-economic issues in northern Argentina: We are not all in the same boat. *Resources Policy*, 81, 103288. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103288
24. Chaves, C., Pereira, E., Ferreira, P., & Guerner Dias, A. (2021). Concerns about lithium extraction: A review and application for Portugal. *The Extractive Industries and Society*, 8(3), 100928. DOI: 10.1016/j.exis.2021.100928.
25. Chordia, M., Wickerts, S., Nordelöf, A., & Arvidsson, R. (2022). Life cycle environmental impacts of current and future battery-grade lithium supply from brine and spodumene. *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106634. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106634.
26. Sankar, T. K., Abhilash & Meshram, P. (2023). Environmental impact assessment in the entire life cycle of lithium-ion batteries. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 262(1). DOI: 10.1007/s44169-023-00054-w.
27. Feng, Y., Feng, D., Li, W., Zhang, Q., Chen, W.-Q., & Wang, P. (2024). Environmental impacts of lithium supply chains from Australia to China. *Environmental Research Letters*. DOI: 10.1088/1748-9326/ad69ac.
28. Đorđević, D., Tadić, J. M., Grgur, B., Ristić, R., Sakan, S., Brezjanović, J., Stevanović, V., & Šolaja, B. (2024). The influence of exploration activities of a potential lithium mine to the environment in Western Serbia. *Scientific Reports*, 14(1). DOI: 10.1038/s41598-024-68072-9.
29. Parker, S. S., Clifford, M. J., & Cohen, B. S. (2024). Potential impacts of proposed lithium extraction on biodiversity and conservation in the contiguous United States. *Science of the Total Environment*, 911, 168639. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168639.
30. Wolters, L., & Brusselaers, J. (2024). The energy transition paradox: How lithium extraction puts pressure on environment, society, and politics. *The Extractive Industries and Society*, 19, 101498. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101498.
31. Krishnan, R., & Gopan, G. (2024). A comprehensive review of lithium extraction: From historical perspectives to emerging technologies, storage, and environmental considerations. *Cleaner Engineering and Technology*, 100749. DOI: 10.1016/j.clet.2024.100749.
32. Blair, J. J. A., Vineyard, N., Mulvaney, D., Cantor, A., Sharbat, A., Berry, K., Bartholomew, E., & Ornelas, A. F. (2024). Lithium and water: Hydrological impacts across the life cycle of energy storage. *WIREs Water*. DOI: 10.1002/wat2.1748.
33. Vivoda, V., Bazilian, M. D., Khadim, A., Ralph, N., & Krame, G. (2024). Lithium nexus: Energy, geopolitics, and socio-environmental impacts in Mexico's Sonora project. *Energy Research & Social Science*, 108, 103393. DOI: 10.1016/j.erss.2023.103393.
34. Souza, R. G., Domingues, A. M., Spindlegger, A., Mair-Bauernfeind, C., & Part, F. (2025). Review of the current knowledge and identified gaps in assessing the social and environmental impacts of mining processes in the Lithium Triangle. *Sustainable Production and Consumption*, 53, 40–63. DOI: 10.1016/j.spc.2024.11.031.
35. Sakunai, T., Ito, L., & Tokai, A. (2021). Environmental impact assessment on production and material supply stages of lithium-ion batteries with increasing demands for electric vehicles. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(2), 470–479. DOI: 10.1007/s10163-020-01166-4.