

Стійкість масивів порід флішової формації до вибуху: огляд

Stability of Flysch Rock Masses under Explosive Loading: A Review

Ігор Кордіяка

Corresponding author: Старший викладач, e-mail: vasyl.karabyn@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0008-2211-8612>

Василь Карабин

доктор технічних наук, професор, e-mail: vasyl.karabyn@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8337-5355>

Ihor Kordiaka

Corresponding author: Senior Lecturer, e-mail: vasyl.karabyn@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0008-2211-8612>

Vasyl Karabyn

Doctor of Engineering, Professor, e-mail: vasyl.karabyn@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8337-5355>

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

Received: April 10, 2026 | Revised: April 26, 2026 | Accepted: April 30, 2026

УДК: 624.131.1 : 622.235 : 614.8 : 55

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.16>

Мета роботи. Систематизувати сучасні наукові підходи до оцінки стійкості флішових масивів під дією вибухових навантажень та визначити можливості їх застосування для задач цивільного захисту.

Метод дослідження. Використано методи аналізу та синтезу наукових джерел, порівняльно-геомеханічний аналіз, таксономічний підхід до класифікації результатів, а також індуктивне узагальнення. Джерельною базою слугували міжнародні наукові публікації, відібрані за релевантними тематичними критеріями.

Результати дослідження. Узагальнено закономірності механічної поведінки флішових масивів з урахуванням їх гетерогенності, анізотропії та структурної порушеності. Встановлено визначальну роль співвідношення шарів різної міцності та умов зволоження у формуванні зон руйнування. Показано, що існуючі підходи до оцінки міцності базуються переважно на дослідженнях промислових вибухів, що накладає обмеження на їх застосування для аналізу вибухів військового походження.

Практична цінність дослідження. Отримані узагальнення можуть бути використані для попередньої оцінки небезпеки, зонування територій за рівнем ризику та підтримки прийняття рішень у системі цивільного захисту. Запропоновано враховувати невизначеності та застосовувати консервативні підходи при оцінці наслідків вибухових впливів.

Оригінальність дослідження. Робота поєднує геомеханічний аналіз із задачами цивільного захисту, акцентуючи на адаптації існуючих наукових підходів до умов воєнних впливів, що є новим для даної предметної області.

Обмеження дослідження. Обмеження пов'язані з відсутністю натурних даних щодо впливу бойових вибухів на флішові масиви, що визначає необхідність подальших експериментальних і польових досліджень.

Тип статті: Оглядова.

Purpose. To systematize current scientific approaches to assessing the stability of flysch rock masses under explosive loading and to determine their applicability to civil protection tasks.

Method. The study employs analysis and synthesis of scientific sources, comparative geomechanical analysis, a taxonomic approach to the classification of results, and inductive generalization. The source base consists of international scientific publications selected according to relevant thematic criteria.

Findings. The regularities of the mechanical behavior of flysch rock masses are generalized, taking into account their heterogeneity, anisotropy, and structural disturbance. The decisive role of the ratio of layers with different strength and moisture conditions in the formation of damage zones is established. It is shown that existing strength assessment approaches are primarily based on studies of industrial explosions, which imposes limitations on their application to the analysis of explosions of military origin.

Practical Implications. The obtained generalizations can be used for preliminary hazard assessment, zoning of territories according to risk levels, and decision-making support within the civil protection system. It is proposed to consider uncertainties and apply conservative approaches when assessing the consequences of explosive impacts.

Originality/value. The study combines geomechanical analysis with civil protection tasks, emphasizing the adaptation of existing scientific approaches to conditions of military impacts, which is novel for this research field.

Limitations/Future research. The limitations are related to the lack of field data on the effects of military explosions on flysch rock masses, which determines the need for further experimental and field studies.

Paper type: Review.

Ключові слова: вибух, зсувні процеси, критична інфраструктура, надзвичайна ситуація, стійкість масиву, флішові породи, цивільний захист.

Key words: Explosion, Landslide Processes, Critical Infrastructure, Emergency Situation, Rock Mass Stability, Flysch Rocks, Civil Protection.

Вступ

Україна понад 10 років перебуває у стані війни та зазнає масивних ударів ракетами та літальними апаратами різного типу по всій території включаючи Карпати. У межах Складчастих Карпат

домінують масиви порід флішової формації, які здебільшого складаються з шарів пісковиків, алевролітів та аргілітів (Lazaruk et al., 2023; Shainoga & Karabyn, 2021). Руйнування схилів таких масивів порід поблизу об'єктів критичної інфраструктури, зокрема об'єктів транспортної інфраструктури є вкрай небезпечним та призводить до надзвичайних ситуацій техногенного характеру підкласу "НС унаслідок пожеж, вибухів" (код 10200)(Класифікатор, 2010).

Постановка проблеми

Оцінка стійкості масивів флішових порід є вкрай складною, оскільки фліш, здебільшого – це складна трьохкомпонентна система, яка містить дуже різні за міцністю породи: відносно міцні пісковики, менш міцні алевроліти та ще менш міцніші – аргіліти. Водночас, оцінка та прогнозування міцнісних параметрів таких масивів є вкрай актуальною з огляду на значне поширення таких масивів в Україні та за її межами.

Мета дослідження полягає у систематизації сучасних наукових підходів до оцінки стійкості флішових масивів під дією вибухових навантажень та визначенні можливості їх застосування для задач цивільного захисту.

Методологія дослідження

Основним джерелом повнотекстової інформації була база ScienceDirect (Elsevier). Додатково залучалися ресурси ResearchGate, Google Scholar та MDPI. Пошукова стратегія базувалася на поєднанні чотирьох термінологічних кластерів. Ключові слова були систематизовані двома мовами (англійською та українською) для забезпечення максимальної релевантності:

- Кластер А (Об'єкт): фліш, флішові породи, гетерогенний масив / *flysch, flysch rock mass, heterogeneous rock*.
- Кластер В (Процес): вибухове руйнування, динамічний вплив / *explosive destruction, dynamic loading*.
- Кластер С (Механіка): анізотропія, фрагментація порід, пошкодження, які спричинені вибухом, зона порушення / *anisotropy, rock fragmentation, blast-induced damage, excavation damage zone*.
- Кластер D (Інструментарій): чисельне моделювання, метод скінченних елементів, машинне навчання/ *numerical simulation, Distinct Element Method (DEM), machine learning*.

Процес фільтрації джерел реалізовано за трирівневою схемою, аналогічною до протоколу PRISMA (Chigbu et al., 2023; Sarkis-Onofre et al., 2021): *i) первинний скринінг*: аналіз назв та анотацій на предмет відповідності об'єкту дослідження (флішові товщі). На цьому етапі відсіювалися праці, присвячені виключно гелогічним аспектам генези та поширення флішових басейнів без геомеханічного аспекту; *ii) тематична оцінка*: перевірка наявності даних щодо динамічної стійкості, впливу шаруватості (анізотропії) або параметрів фрагментації при вибуху; *iii) якісна валідація*: обов'язкова наявність у статтях експериментального підтвердження, валідованих чисельних моделей або детальних описів польових досліджень.

Для обробки зібраного масиву інформації було застосовано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів. Методи аналізу та синтезу за допомогою яких фліш розглядався як дворівнева (міцний пісковик / слабкий аргіліт-алевроліт) система. Таксономічний аналіз дав змогу нам класифікувати результати за напрямками: (1) глобальне поширення, (2) вплив анізотропії на енергію вибуху, (3) чисельні методи прогнозування. Порівняльно-геомеханічний аналіз застосовувався нами для порівняння класичних та адаптованих для флішу систем оцінки стійкості. Метод індуктивного узагальнення використаний нами у процесі формування висновків про загальні закономірності руйнування флішу на основі розрізнених даних з різних географічних локацій.

Результати

1. Генеза та поширення порід флішової формації

Термін “фліш” був уперше запроваджений швейцарським геологом Б. Штудером у 1827 році для опису темних сланців та пісковиків у центральній Швейцарії, схильних до зсувів.

Генеза флішових відкладів: механізми та умови седиментації. Генезис флішових формацій є однією з найбільш дискусійних проблем у сучасній геології. Історико-тектонічне значення флішу полягає в тому, що він завжди документує активний тектонічний режим, проте для його утворення необхідна ще одна фундаментальна умова — постійне надходження гігантських обсягів теригенного (уламкового) матеріалу (Ступка, 2010).

Концепція утворення флішу зазнала справжньої революції в середині ХХ століття, коли Ф. Кюнєн та К. Мільйоріні (1950) довели, що ритмічна шаруватість флішу є результатом дії турбідітних (каламутних) потоків — суспензійних течій високої густини, які переносять осади з мілководдя у глибоководні басейни. На основі цих досліджень була розроблена класична модель градаційної шаруватості — послідовність Боума, яка тривалий час вважалася еталоном для опису турбідітів. Однак згодом стало зрозуміло, що класична модель не може пояснити всього розмаїття флішових фацій. Сучасна седиментологія розглядає фліш як результат складного спектра “гравітаційних потоків осадів”, що включає не лише турбулентні течії, а й уламкові потоки, зернові потоки та розріджені потоки. Більшість турбідітних течій, які формують потужні пісковикові пласти, є двокомпонентними: вони складаються з базального, швидкорухомого щільного зернового шару, що рухається за рахунок інерції, та перекриваючої розбавленої турбулентної суспензії. Виникнення та розвиток таких потоків відбувається двома основними шляхами. Перший — це раптові підводні зсуви та обвали на континентальному схилі, які під час руху трансформуються у каламутні потоки. Другий механізм, роль якого була усвідомлена лише нещодавно, — це гіперпікнальні потоки, які генеруються річками під час катастрофічних повеней. У таких випадках густа суміш води та осаду здатна долати шельф і безпосередньо спускатися по схилу у глибоководний басейн у вигляді тривалих, підтримуваних турбідітних течій (Mutti et al., 2009).

Тектоніка та джерела матеріалу. Фліш традиційно визначається як синорогенна формація, що накопичується у передових прогинах, жолобах або залишкових басейнах під час зближення та колізії літосферних плит (Miall, 1984). Проте джерело гігантських мас уламкового матеріалу залишалося предметом палких дискусій.

Наприклад, для Карпатського флішового басейну класичні теорії припускали винесення матеріалу величезними транзитними річками з континенту (Східноєвропейської платформи) або ж розмив гіпотетичних “стаціонарних кордильєр” (виступів фундаменту всередині басейну). Сучасні геодинамічні дослідження спростовують ці гіпотези. Існуванню транзитних річкових систем у крейдовий період перешкоджали широкі епіконтинентальні моря, що вкривали Європу, і фізично унеможливлювали рух прісноводних русел під сотнями метрів солоної води (Ступка, 2010). Натомість, відповідно до новітніх мобілістичних концепцій, основним джерелом теригенного матеріалу слугували “безкореневі кордильєри”. У мезозої, внаслідок великомасштабного розшарування і деструкції земної кори країв давніх континентів (зокрема, Гондвани), утворилися численні мікроплити, терейни та гранітогнейсові масиви. Під час закриття океану Тетіс ці сіалічні маси переміщувалися в бік Європейського континенту, утворюючи гігантські тектонічні покриви, які інтенсивно розмивалися і постачали величезну кількість уламкового матеріалу (включаючи гранітоїди) безпосередньо в турбідітні системи (Ступка). Аналогічно, дослідження мінерального складу та детритових цирконів Нумідійського флішу в Західному Середземномор’ї доводять, що його ультразрілі кварцові пісковики походять виключно з Африканського кратону, виключаючи будь-яке північне (європейське) джерело (Thomas et al., 2010).

Палеоокеанографічні умови та еволюція басейнів. Осадження флішу відбувалося у глибоководних морських басейнах (абісаль та батіаль), які характеризувалися інтенсивним тектонічним зануренням (Mutti et al., 2009). Формування таких басейнів пов'язане з розтягненням літосфери, що призводило до швидкого початкового ізостатичного прогинання, після якого слідувала тривала фаза термічного осідання кори, що дозволяло накопичувати багатокілометрові товщі флішу (Sclater et al., 1980). У цих специфічних термобаричних умовах накопичені піщано-глинисті ритми зазнавали складних післяседиментаційних (літогенетичних) перетворень (Деревська та інші, 2009).

Хаотичні комплекси. Особливим, генетично спорідненим із флішем утворенням є хаотичні комплекси — так звані «дикий фліш» та меланжі (Mutti et al., 2009). Це геологічні тіла, що характеризуються специфічною внутрішньою текстурою, де уламки та гігантські брили занурені у тонкозернисту масу. Сучасні дослідження виділяють три генетичні типи таких комплексів: осадові, тектонічні та діапирові (Ogata et al., 2021). *Осадові меланжі (олістостроми)* виникають внаслідок масштабних підводних гравітаційних процесів (зсувів, обвалів) на схилах флішових басейнів. Вони формують хаотичну, ізотропну структуру, де поліміктові блоки різного віку та походження хаотично розподілені у брекчійованій матриці. Натомість *тектонічні меланжі* формуються у зонах глибинних розломів та насувів, де інтенсивний стрес призводить до розлінзування порід, утворення витягнутих сигмоїдальних блоків та формування чітко вираженого лускуватого кліважу (Ogata et al., 2021). У деяких випадках формування грандіозних товщ “дикого флішу” було спровоковане подіями катастрофічного, планетарного масштабу. Зокрема, гігантські мегабрекчії у Карибському регіоні (формації Пеньяльвер та Какарахіка на Кубі), які утворилися на межі крейди та палеогену, містять екзотичні блоки мілководних вапняків, офіолітів та зміненого скла. Вважається, що ці утворення є прямим наслідком землетрусів небувалої сили та мега-цунамі, викликаних падінням метеорита, що утворив кратер Чіксулуб на півострові Юкатан, або ж утворенням кратера Беата (James et al., 2005).

Це демонструє, що генезис флішу може фіксувати не лише тривалі тектонічні процеси, а й раптові імпактні події.

2. Регіональне поширення флішу у світі

Флішові формації поширені у багатьох регіонах світу, будучи невіддільним елементом великих складчастих поясів планети. Вони слугують ключовими індикаторами давніх колізійних процесів, закриття океанічних басейнів та еволюції континентальних окраїн (таблиця 1.).

Таблиця 1 – Характеристика флішових комплексів світу (узагальнено авторами)

Регіон / Геологічна структура	Вік відкладів	Джерело
Альпи, Апенніни	Крейда – неоген	Mutti E. et al. (2009); Ogata K. et al. (2021)
Українські Карпати (Флішові Карпати)	Крейда – неоген	Гнилко О.М. (2011); Деревська К. та ін. (2009); Гнилко О. (2011); Ступка О.С. (2010)
Кримські гори (басейн р. Бодрак)	Тріас – юра	Білоніжка П. та ін. (2010)
Балканський півострів (Динариди, Албанія)	Верхня крейда – палеоген	Golijanin A. et al. (2018); Terron-Almenara J. (2024)
Західне Середземномор'я (Нумідійський фліш)	Олігоцен – ранній міоцен	Thomas M.F.H. et al. (2010)
Карибський басейн, Центральна та Південна Америка	Палеоцен – середній еоцен	James K.H. (2005)
Гімалаї (Південно-Східний Тибет)	Тріас	Dunkl I. et al. (2011)

Джерело: розроблено автором

2.1. Альпійсько-Гімалайський складчастий пояс Альпійсько-Гімалайський орогенний пояс є класичним регіоном вивчення флішу, де, власне, і зародилася концепція цієї геологічної формації. Він включає у себе передусім Альпи, Апенніни, Дінариди, Карпатський басейн, Кримські гори та Гімалаї.

Альпи та Апенніни. В Альпійсько-Апеннінському регіоні історично виділяють два базові типи флішу: силіцикластичний (піщаний), відомий як тип “Massigno”, та карбонатний, знаний як тип “Alberese”. Окрім класичного ритмічного флішу, тут широко розвинений “дикий фліш” — хаотичні комплекси з екзотичними блоками (олістоліти), зануреними в деформовану глинисту матрицю, які в Апеннінах отримали назву *Argille scagliose* (Mutti et al., 2009). Особливої уваги заслуговує Нумідійський фліш (олігоцен – міоцен) — гігантська глибоководна система ультразрілих кварцових пісковиків, яка простягається на понад 2000 км від Марокко через Алжир і Туніс до Сицилії та Південної Італії, відображаючи седиментацію на пасивній Північноафриканській окраїні давнього океану Tetic (Thomas et al., 2010).

Дінариди (Балканський півострів). У цьому регіоні виділяється Дурміторський флішовий комплекс (верхня крейда – палеоген), що простягається від Північної Албанії через Чорногорію до Боснії і Герцеговини. Він характеризується гетерогенною літологічною будовою і складається з ритмічного чергування брекчій, конгломератів, вапняків, мергелів та аргілітів (Golijanin & Malbašić, 2019). В Албанії (Дінаридо-Еллінський пояс) флішові товщі зазнали інтенсивного складкоутворення та насування; їхня відносно м’яка реологія сприяла масштабному тектонічному транспортуванню та обдукції більш твердих офіолітових комплексів на континентальну окраїну (Terron-Almenara & Panthi, 2025).

Карпатський басейн. Зовнішні (флішові) Карпати є грандіозною крейдово-неогеновою акреційною призмою, що повністю складена зірваними зі своєї седиментаційної основи товщами флішу (переважно турбідітами), які утворюють систему тектонічних покривів (насувів) (Гнилко, 2011). Їх накопичення відбувалося в глибоководному басейні внаслідок субдукції фундаменту Карпатського флішового басейну під мікроконтинентальні терейни під час закриття океану Tetic (Ступка). У процесі занурення ці відклади зазнали значних післяседиментаційних перетворень від стадій катагенезу до метагенезу, що супроводжувалося утворенням кварц-кальцитових прожилків та твердих бітумів (Деревська та інші, 2009).

Кримські гори: У Криму (зокрема в басейні річки Бодрак) флішова формація представлена відкладами тріас-юрського віку (таврійська серія, джидайрська та мендерська світи). Вона складена ритмічним чергуванням пісковиків, алевролітів та аргілітів. Характерною є мендерська (ескіординська) світа, що являє собою дикий фліш (олістостром) із хаотичними брилами різновікових порід, включаючи вапняки, кварцити та магматичні породи, що свідчить про активні тектонічні рухи та підводні зсуви на схилах тогочасного басейну (Білоніжка та інші, 2010).

Гімалаї (Тибет). На сході Тетіської Гімалайської споруди в Південно-Східному Тибеті відслонюється потужна смуга флішу (середній тріас – рання юра), складена турбідітними пісковиками та сланцями. Ці відклади формувалися в абісальних умовах на пасивній окраїні Індійського континенту. Під час колізії Індії з Азією (еогімалайська та неогімалайська фази) цей фліш зазнав інтенсивних тектонічних деформацій та складного регіонального метаморфізму, що фіксується за перетворенням інтрузивних дайок на хлоритові та амфіболові сланці (Dunkl et al., 2011).

2.2. Карибський регіон, Центральна та Південна Америка У Західній півкулі масштабні смуги флішових і дикий флішових (олістостромових) відкладів формувалися переважно у палеоцені – середньому еоцені. Цей пояс відкладів простягається через великі території: від Мексики та Гватемали (групи Сепур та Ель-Тамбор), через Великі Антильські острови — Кубу (формації Пеньяльвер, Какарахіка, Віа Бланка), Пуерто-Рико та Домініканську Республіку, вздовж Малих Антильських островів (формація Скотланд на Барбадосі, Тафтон Холл на Гренаді), до Тринідаду (формації Пуент-а-П’єр, Чаудьєр) і півночі Південної Америки — у

Венесуелі (формації Гуаріко, Мататере, Ескорзонера), Колумбії, Еквадорі та Перу (James et al. 2005).

Більшість цих відкладів фіксує жорстоку взаємодію між Карибською літосферною плитою та прилеглими континентальними масами, що традиційно пояснюється процесами “ларамійського (інкайського) орогенезу” (James et al., 2005). Формування хаотичних комплексів з гігантськими олістолітами відбувалося в глибоководних жолобах перед фронтом насувів (наприклад, метаморфічних комплексів і офіолітів). Водночас детальні стратиграфічні дослідження деяких формацій звузили їх вік до самої межі крейди та палеогену.

3. Геомеханічна класифікація та оцінка масиву

Оцінка флішових товщ як об'єкта руйнування ускладнюється їхньою вираженою гетерогенністю та анізотропією (Del Fabbro et al., 2024; Marinos et al., 2014). Через високу мінливість характеристик та наявність тектонічних порушень застосування традиційних систем класифікації до таких масивів є проблематичним, що вимагає використання спеціалізованих геотехнічних підходів (Marinos et al., 2001). Через складність моделювання трьох компонентних систем переважна більшість дослідників зводять вивчення флішових масивів до двохкомпонентних систем об'єднуючи алевроліти і аргіліти в один шар під назвою сланці.

Для оцінювання стійкості гетерогенних масивів, таких як фліш, адаптовано систему Індекс геологічної міцності (Geological Strength Index (GSI) (Mohammed et al., 2025; Singh et al., 2023). Сучасна класифікація передбачає використання модифікованих діаграм GSI, які поділяють флішові формації на 11 типів (від I до XI) залежно від кількісного співвідношення пісковиків та алевроліту, а також від ступеня їхнього тектонічного порушення (Marinos et al., 2014). Оскільки міцні блоки пісковиків часто розділені слабкими шарами сланців, їхній прямиий контакт між собою обмежений (Tziallas et al., 2013). Для вирішення цієї проблеми застосовується метод “зваженого середнього” для визначення параметрів інтактної породи (зокрема, міцності на стиск та константи) (Pepe et al., 2014). Цей підхід передбачає зниження міцнісних показників міцного шару (наприклад, пісковиків) на 20–40 % залежно від об'ємного співвідношення міцних і слабких порід, коли вони розділені слабкішими шарами (Tziallas et al., 2013). Водночас порівняльні лабораторні дослідження композитних зразків показують, що емпіричний метод “зваженого середнього” в рамках GSI може давати завищені значення міцності масиву порівняно з прямими випробуваннями, що вказує на необхідність обережного підходу та калібрування даних (Tziallas et al., 2013).

Механічна поведінка флішу демонструє виражену “дуальність”, яка керується складною взаємодією між міцним каркасом та слабкою матрицею. Лабораторні випробування на штучних композитних зразках, що імітують чергування шарів флішу, підтверджують, що межа міцності на одновісний стиск та модуль Юнга експоненціально зменшуються зі збільшенням відсотка слабого шару (Tziallas et al., 2013). Дослідниками (Tziallas, 2013) встановлено, що коли об'ємна частка слабого компонента (аргіліту, алевроліту) досягає 37%, загальна міцність гетерогенного масиву різко падає і фактично дорівнює міцності найслабшого шару. Залежно від співвідношення шарів, механізм руйнування може змінюватися від крихкого у міцних шарах до локалізованого руйнування вздовж слабких прошарків. Результати досліджень V. Marinos (2001) свідчать, що зі збільшенням частки слабких порід або при сильному тектонічному роздробленні, механічний відгук масиву переходить від сильно анізотропного до псевдоізотропного, перетворюючи фліш на хаотичне ґрунтоподібне середовище. Саме для таких сильно порушених та псевдоізотропних масивів (де руйнування не контролюється однією площиною, а загальним рівнем напружень) критерій Хука-Брауна та індекс GSI є найбільш репрезентативним (Kang et al., 2022; Marinos et al., 2014).

4. Механізми руйнування масивів порід флішової формації

У фліші механічний відгук сильно залежить від напрямку навантаження відносно площин шаруватості. Лабораторні дослідження підтверджують, що залежність міцності на

стиск від кута нахилу шаруватості має яскраво виражену U-подібну форму (Saroglou, 2013). Максимальна міцність масиву спостерігається, коли навантаження прикладається перпендикулярно ($\beta = 90^\circ$) або паралельно ($\beta = 0^\circ$) до площин шаруватості (Saroglou & Steiakakis, 2010). Натомість мінімальна опірність руйнуванню (найнижча міцність) фіксується при кутах нахилу шарів 45° відносно напрямку навантаження (Saroglou, 2013).

Механізми руйнування флішових порід відрізняються високою складністю через їхню гетерогенність, розривність, анізотропію та двофазну, або трифазну природу (Jakubowski & Phan, 2024). Механічна поведінка флішу значною мірою визначається водонасиченням порід, що значно знижує їхню загальну міцність. Зокрема, наявність глинистих мінералів в аргілітах та алевролітах робить їх вкрай чутливими до води. При зволоженні вони зазнають процесів розмокання, набухання та втрати внутрішніх цементацийних зв'язків, перетворюючись на поверхні ковзання (Kaspar et al., 2025). Особливо критичним є вплив циклів зволоження-висушування, які створюють градієнти всмоктування у дрібних порах, що призводить до швидкого відшаровування частинок і деградації породи (Kaspar et al., 2025; Marinos, 2014).

Флішові породи, як правило зазнавали багаторазових тектонічних деформацій, що призвело до порушення їхньої первісної нашарованості та утворення масштабних зон слабкості (Бондарева & Беган, 2025). У сильно зім'ятих флішах, де первісна структура зруйнована тектонікою і зсувними процесами, масив стає геотехнічно хаотичним, а його механіка визначається високою розривністю, гетерогенністю та анізотропією. У таких умовах руйнування набуває ізотропного (грунтоподібного) характеру, що знайшло своє відображення у необхідності розробки спеціалізованих підходів моделювання дискретних блоків (Gong et al., 2025) та модифікованих систем GSI для сильно порушеного флішу (Jakubowski & Phan, 2024).

Проаналізовані матеріали дали змогу нам запропонувати принципову схему формування нестійкості флішових масивів під дією вибуху як чинника надзвичайних ситуацій (рис. 1).

4.5. Параметри фрагментації та ефективність вибуху

Оцінка результатів безпосереднього вибухового впливу на складні геологічні середовища, такі як фліш, вимагає комплексного підходу, що враховує як геометричні параметри заряду, так і фізико-механічні властивості самого масиву.

Для прогнозування гранулометричного складу підірваної гірської маси найчастіше застосовується емпірична модель Куз-Рама (Yilmaz, 2023), яка пов'язує параметри заряду з властивостями гірських порід. Критичним етапом у цій моделі є правильне визначення «фактора породи» (A), який безпосередньо впливає на розрахунок середнього розміру частинок (X_{50}) (César de Souza et al., 2018). У класичному вигляді цей фактор базується на геомеханічній класифікації Ліллі (Lilly) і враховує опис масиву (RMD), індекс щільності (RDI) та фактор твердості (HF) (César de Souza et al., 2018; Moomivand et al., 2026). Однак для таких анізотропних середовищ, як шаруватий фліш, застосування стандартних підходів ускладнюється. Значний вплив на формування тріщин має просторова орієнтація площин нашарування відносно напрямку вибуху та відкритої поверхні: нахил слабких шарів може слугувати каналом витоку газів, що кардинально змінює ефективність руйнування (César de Souza et al., 2018). Крім того, сланцюваті та шаруваті породи демонструють різну межу міцності на розтяг у різних напрямках (Casale et al., 2025). Детальні лабораторні дослідження (зокрема, методом бразильського розколювання) показують, що хоча теоретичні моделі передбачають класичний U-подібний розподіл міцності на розтяг із максимумом при навантаженні перпендикулярно до шарів (90°), реальна поведінка гетерогенних порід є набагато складнішою. Залежно від літології та міцності слабких прошарків, дослідники виділяють щонайменше шість різних трендів анізотропії міцності на розтяг: від U-подібних до лінійного зростання, спадання, або навіть незначної зміни зі збільшенням кута нахилу. Механізм руйнування при цьому також трансформується і може проявлятися як чистий відрив уздовж

шаруватості, розрив безпосередньо крізь міцний масив (пісковик), або як змішане розтягувально-зсувне руйнування, яким керують саме слабкі прошарки (Shu et al., 2025).

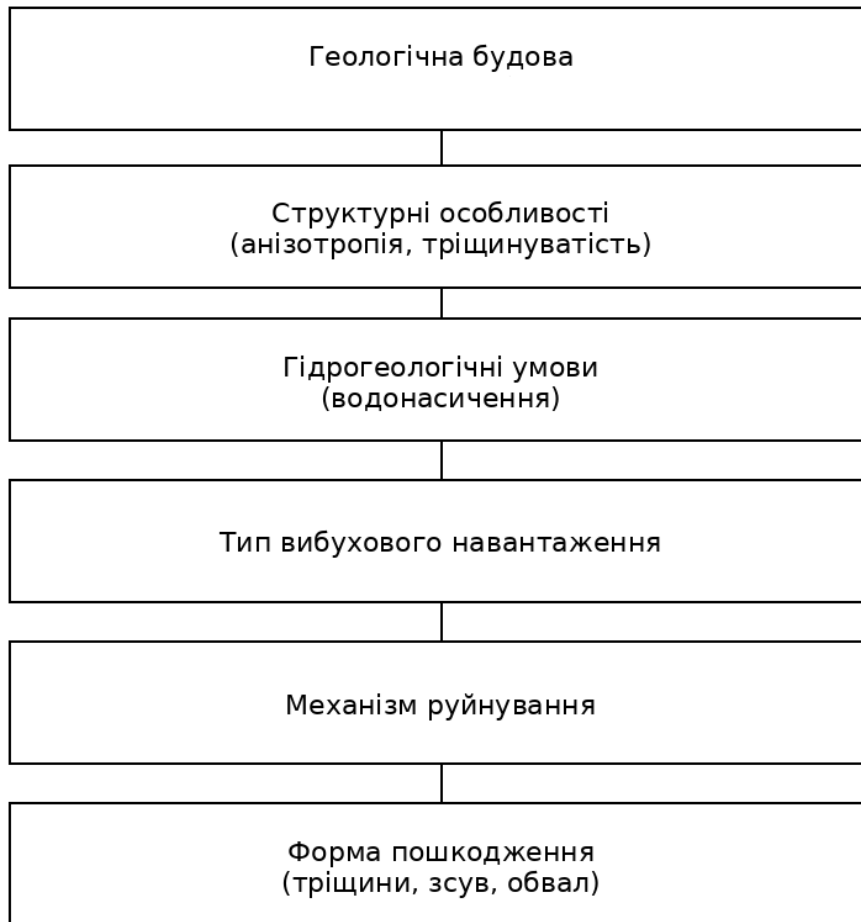


Рисунок 1: Схема формування нестійкості флішових масивів під дією вибуху як чинника надзвичайних ситуацій (розроблено авторами)

4.6. Зони порушення масиву та сейсмічний ефект

Аналіз впливу вибуху на стійкість навколишньої породи вимагає чіткого розуміння механізмів формування зони пошкодження навколо виробки. Традиційно ця зона поділяється на зону сильного локального подрібнення безпосередньо біля заряду, зону тріщиноутворення та зону пружних вібрацій (Li et al., 2025; Du et al., 2025). У флішових товщах ці процеси значно ускладнюються наявністю шаруватості, що кардинально змінює поширення хвиль та геометрію руйнування.

На відміну від гомогенних та ізотропних середовищ, де зона пошкодження розвивається відносно симетрично, у шаруватих масивах флішу спостерігається яскраво виражене асиметричне розширення тріщин (Shu et al., 2025). Результати чисельного моделювання та натурних спостережень доводять, що поверхні нашарування, маючи значно меншу міцність і жорсткість (зокрема, контакти між пісковиком і сланцем), діють одночасно як бар'єри для проходження хвиль напружень і як магістральні канали для витоку вибухових газів (Rong et al., 2024; Karimi et al., 2025). Коли вибухова хвиля стиску досягає площини розшарування (наприклад, слабого контакту між пісковиком та сланцем), ця межа діє як своєрідний бар'єр, що перешкоджає прямому проходженню енергії (Rong et al., 2024). Через наявність відкритого простору або слабого заповнювача хвиля відбивається від площини у вигляді хвилі розтягу (Rong et al., 2024). Оскільки гірські породи (особливо шаруваті) значно слабкіші на розтяг, ніж на стиск, це призводить до передчасного відривного руйнування безпосередньо на поверхні контакту і

генерує так звані «крилоподібні» тріщини на кінцях існуючих дефектів (Rong et al., 2024). Після проходження початкової хвилі напружень у ці мікротріщини прориваються вибухові газу (квазістатична дія вибуху), які діють як клин і додатково розширюють розломи вздовж найслабших площин (Zhang et al., 2025; Du et al., 2025).

Таким чином, існуючі тріщини та площини шаруватості слугують «шляхами найменшого спротиву» для дисипації вибухової енергії (Karimi et al., 2025). Залежно від кута падіння шарів відносно напрямку навантаження, механізм розкриття кардинально змінюється (Shu et al., 2025). Дослідження показують, що при критичному куті нахилу шарів близько площина шаруватості ефективно блокує перетин магістральної вибухової тріщини крізь міцний блок, змушуючи її відхилитися та преференційно поширюватися паралельно до простягання площин нашарування (Rong et al., 2024). Це супроводжується утворенням великої кількості вторинних тріщин і призводить до того, що радіус зони порушення максимально витягується вздовж слабких прошарків, утворюючи найбільшу площу пошкодження саме при (Rong et al., 2024).

Внаслідок такої спрямованої дії вибуху асиметрія деформацій навколишньої породи стає надзвичайною (Shu et al., 2025). Глибина зони руйнування у напрямку, перпендикулярному до шаруватості, може бути суттєво більшою, ніж у паралельному (Shu et al., 2025). Пластична зона руйнування набуває характерного діагонального стрічкоподібного розподілу, що простягається вздовж площин нашарування (Shu et al., 2025). Це спричиняє суттєві проблеми зі стійкістю: масивні вивали та зсувне ковзання блоків концентруються в місцях, де площини шаруватості дотичні до профілю тунелю чи схилу (Yan & Liu, 2025), (Du et al., 2025). Найбільша концентрація девіаторних напружень і пластичних деформацій, що призводять до екструзії (витискання) та зрізу, спостерігається на бічних стінках виробки, а також у зонах п'яти та плеча склепіння (Shu et al., 2025; Du et al., 2025). Відповідно, саме стабілізація бічних стінок та зон перетину шаруватості з контуром є критичним фактором безпеки при проведенні вибухових робіт у шаруватому масиві (Yan & Liu, 2025).

Для оцінки сейсмічного впливу вибуху на навколишній масив і наземні конструкції найчастіше використовується показник пікової швидкості коливань частинок (Li et al., 2025). Встановлено емпіричні та аналітичні залежності, за якими згасання динамічної хвилі напружень і швидкості коливань у навколишній породі має ступенево-експоненціальний характер залежно від масштабованої відстані до джерела вибуху (Sun et al., 2025; Li et al., 2025). Однак у фліші швидкість згасання сейсмічного ефекту є анізотропною і сильно залежить від структури масиву. Природна мережа тріщин та поверхні розшарування діють як екрани: вони перешкоджають рівномірному поширенню сейсмічної хвилі, викликаючи її розсіювання та відбиття, що призводить до нерівномірного розподілу швидкостей коливань (PPV) та втрати вибухової енергії на тертя в слабких сланцевих прошарках (Karimi et al., 2025). Разом з тим, на величину PPV та інтенсивність сейсмічного згасання суттєво впливає рівень природних напружень. Дослідження доводять, що зі збільшенням глибини залягання (зростанням in-situ напружень) здатність породи протистояти розширенню динамічних тріщин збільшується. Високий всебічний тиск ущільнює масив, внаслідок чого спостерігається більш швидке згасання пікових швидкостей коливань (PPV) та зменшення загального радіуса зони пошкодження (EDZ), перетворюючи характер руйнування з відривного на переважно зсувний (Li et al., 2025).

4.7. Стійкість та підтримку схилу після вибуху

Оцінка стабільності флішових масивів після вибуху вимагає обов'язкового врахування динамічних навантажень, які генеруються проходженням сейсмічних хвиль. Вибухові прискорення спричиняють короточасне, але критичне зниження опірності на контактах між шарами пісковика та сланцю, що призводить до різкого падіння динамічного фактора безпеки навколишнього масиву. Результати аналізу стійкості схилів показують, що під впливом динамічних прискорень (наприклад, 0,17 g, що імітують сейсмічний або вибуховий вплив)

стабільність блоків у фліші знижується на 15–30% залежно від умов (зокрема від орієнтації шарів). Наприклад, для деяких потенційних клинів спостерігалось падіння FoS з цілком безпечного показника 1,48 (у статиці) до критичного 1,04 (у динаміці), або з 1,82 до 1,20 (Khaleel et al., 2024).

Таке динамічне “розгойдування” призводить до того, що ослаблені вибухом поверхні нашарування стають площинами ковзання, викликаючи локальні вивали породи у зонах склепіння тунелів та на укосах (Casale et al., 2025). З огляду на це, на відкритих гірничих роботах та інженерних схилах для ліквідації залишкової нестабільності після вибуху необхідним є додаткове ручне обортування (scaling) за допомогою промислових альпіністів, а також укріплення схилів анкерами та тросовими сітками (Casale et al., 2025).

Сучасний досвід підземного будівництва у складних флішових умовах доводить високу ефективність застосування комбінованого піддатливого кріплення, основу якого складають армовані ребра з набризк-бетону у поєднанні з радіальними анкерами (Terron-Almenara et al., 2023). Ця технологія передбачає наступну послідовність:

Нанесення шару фібробетону (Sfr, зазвичай близько 150 мм) на свіжовідслонену вибухом поверхню. Це дозволяє “запечатати” масив, запобігаючи процесам швидкого розмокання (slaking) та ерозії чутливих глинистих сланців і алевролітів під впливом вологи та повітря (Marinos, 2014; Wei & Khayat, 2025).

Встановлення армованих ребер з торкрет-бетону (наприклад, з кроком 0.75–1.5 м), які армуються сталевими стрижнями, разом із встановленням глибоких радіальних анкерів та випереджального кріплення у склепінні (Jakubowski & Phan, 2024; Nøien, 2025). Дослідження підтверджують, що система армованих ребер з торкрет-бетону володіє достатньою гнучкістю, аби адаптуватися до асиметричних деформацій флішу (коли навантаження нерівномірно передається від міцних та слабких шарів), і при цьому забезпечує високу несучу здатність проти зсувних та згинальних зусиль (Terron-Almenara et al., 2023). Крім того, комбінація сталевих арок, анкерування та набризк-бетону допомагає ефективно контролювати розкриття тріщин, індукованих вибухом, зшиваючи пошкоджену зону масиву та перетворюючи її на частину загальної силової оболонки, що суттєво підвищує стійкість виробки навіть за умов високого гірського тиску (Terron-Almenara et al., 2023).

Обговорення

Отримані результати огляду дають змогу узагальнити сучасний стан досліджень стійкості флішових масивів до динамічних навантажень та сформулювати цілісне уявлення про механізми їх руйнування. Позитивним аспектом проведеного дослідження є систематизація розрізнених літературних даних щодо впливу анізотропії, гетерогенності та структурної порушеності на механічну поведінку флішу. Окрему цінність становить узагальнення підходів до оцінки міцності та аналіз сучасних чисельних методів моделювання, що дозволяє сформулювати науково обґрунтовану базу для подальших прикладних досліджень.

Важливо також відзначити, що отримані узагальнення мають прикладне значення для задач оцінки стійкості масивів у складних геологічних умовах, оскільки дозволяють ідентифікувати ключові фактори, що контролюють руйнування: співвідношення шарів, ступінь тектонічної порушеності, орієнтація шаруватості та водонасичення.

Разом з тим, результати огляду потребують обережної інтерпретації в контексті даного дослідження. Переважна більшість проаналізованих робіт присвячена промисловим вибухам (буропідривні роботи), тоді як актуальним завданням цивільного захисту є аналіз впливу вибухів іншої природи – спричинених ракетними ударами та безпілотними літальними апаратами. Ця відмінність не є критичною з точки зору загальних закономірностей руйнування, однак вимагає врахування певних обмежень. Зокрема, промислові вибухи характеризуються керованим розподілом енергії та заданою геометрією підриву, тоді як

вибухи воєнного походження мають більш локалізований та імпульсний характер. Це може впливати на інтенсивність пошкодження, форму зон руйнування та механізми ініціації тріщин. Водночас слід підкреслити, що на сьогодні у відкритих джерелах відсутні систематизовані натурні дослідження впливу бойових вибухів на стійкість флішових масивів. У зв'язку з цим використання результатів, отриманих для промислових вибухів, є виправданим на поточному етапі розвитку досліджень і дозволяє сформуванню базові уявлення про поведінку таких систем під динамічним навантаженням.

Таким чином, результати даного огляду можуть бути використані для попередньої оцінки стійкості флішових масивів у умовах вибухового впливу воєнного характеру, однак із урахуванням певних обмежень та невизначеності.

З практичної точки зору це означає, що при оцінці небезпеки у системі цивільного захисту доцільно застосовувати обережний (консервативний) підхід, враховуючи можливе відхилення реальних процесів від прогнозованих. Зокрема, результати можуть бути використані для якісного зонування територій, ідентифікації потенційно нестійких ділянок та попередньої оцінки ризиків для об'єктів критичної інфраструктури.

Виявлені обмеження водночас визначають і напрями подальших досліджень.

По-перше, актуальним є проведення натурних та напівнатурних досліджень впливу вибухів воєнного походження на геологічні масиви, зокрема флішові товщі.

По-друге, необхідною є адаптація існуючих геомеханічних моделей до умов імпульсного навантаження з урахуванням особливостей бойових вибухів.

По-третє, доцільним є накопичення емпіричних даних щодо реальних випадків ураження для подальшої валідації моделей.

Окремо варто відзначити необхідність міждисциплінарного підходу, який поєднує цивільний захист, геологію, механіку руйнування, чисельне моделювання та інженерну геофізику. Лише така інтеграція дозволить сформуванню цілісної концепції поведінки флішових масивів під дією вибуху та його вплив на стійкість об'єктів критичної інфраструктури.

Таким чином, подальший розвиток досліджень має бути спрямований на підвищення фізичної адекватності моделей, розширення емпіричної бази та інтеграцію новітніх аналітичних інструментів, що в сукупності дозволить підвищити надійність оцінки стійкості флішових масивів до вибухового впливу. Незважаючи на наявні обмеження, проведений огляд формує важливу наукову основу для оцінки стійкості флішових масивів у нових умовах та може розглядатися як перший етап у напрямі розроблення спеціалізованих підходів для задач цивільного захисту.

Висновки

У результаті проведеного огляду літературних джерел систематизовано сучасні уявлення про генезу, поширення та геомеханічну поведінку флішових масивів під дією динамічних навантажень. Показано, що ключовими факторами, які визначають стійкість таких масивів, є їх гетерогенна будова, анізотропія, співвідношення міцних і слабких шарів, ступінь тектонічної порушеності та водонасичення. Встановлено, що існуючі підходи до оцінки міцності (зокрема GSI та його модифікації) дозволяють отримувати узагальнені характеристики флішових масивів, однак потребують обережного застосування в умовах динамічних впливів.

З позицій цивільного захисту принципово важливим є те, що наявна наукова база сформована переважно на основі досліджень промислових вибухів. Це обмежує точність прямого перенесення отриманих закономірностей на випадки вибухів воєнного походження (ракетні удари, БПЛА), які відрізняються імпульсним характером та локалізацією енергетичного впливу. Водночас відсутність систематизованих натурних досліджень впливу бойових вибухів на флішові масиви зумовлює необхідність використання наявних результатів як базових орієнтирів. У цьому контексті узагальнені закономірності руйнування можуть

застосовуватися для попередньої (якісної) оцінки стійкості масивів і прогнозування потенційно небезпечних процесів.

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані для:

ідентифікації ділянок підвищеної небезпеки в районах можливих вибухових впливів; попереднього зонування територій за рівнем ризику виникнення зсувів, обвалів та інших вторинних процесів;

підтримки прийняття управлінських рішень у системі цивільного захисту щодо обмеження доступу, евакуації населення та пріоритетизації аварійно-відновлювальних робіт.

Разом з тим, результати слід застосовувати з урахуванням невизначеностей, що обумовлює доцільність використання консервативних підходів до оцінки небезпеки.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на отримання емпіричних даних щодо впливу вибухів воєнного походження, адаптацію геомеханічних моделей до імпульсних навантажень та інтеграцію геологічних і інженерних підходів у задачах оцінки ризиків для цивільного захисту. Перспективним є впровадження алгоритмів машинного навчання для аналізу великих масивів даних натурних вимірювань пікової швидкості коливань у поєднанні з методами цифрової обробки зображень для оцінки реальної фрагментації у реальному часі. Особливої уваги потребує вивчення впливу циклічного водонасичення на динамічну стійкість схилів, оскільки швидка деградація слабких шарів після вибухового впливу створює ризики відтермінованих зсувів, які наразі важко піддаються кількісному прогнозуванню. Подальша розробка комбінованих систем захисного кріплення має базуватися на глибшому розумінні асиметричного розподілу девіаторних напружень масивів порід, що дасть змогу оптимізувати параметри анкерування та набризк-бетонування в екстремальних геотехнічних умовах флішових Карпат та інших складчастих поясів світу.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Casale, M., Dino, G. A., Oggeri, C. (2025). Blasting of Unstable Rock Elements on Steep Slopes. *Applied Sciences*, 15(2), 712. <https://doi.org/10.3390/app15020712>.
2. César de Souza, J., Santos da Silva, A. C., & Silva Rocha, S. (2018). Analysis of blasting rocks prediction and rock fragmentation results using Split-Desktop software. *Tecnologia in Metalurgia, Materiais e Mineração*, 15(1), 22–30. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1234>.
3. Chigbu, U. E., Atiku, S. O., Du Plessis, C. C. (2023). The science of literature reviews: Searching, identifying, selecting, and synthesising. *Publications*, 11(1), 2. <https://doi.org/10.3390/publications11010002>.
4. Del Fabbro, M., Paronuzzi, P., Bolla, A. (2024). Geotechnical characterisation of flysch-derived colluvial soils from a pre-alpine slope affected by recurrent landslides. *Geosciences*, 14(5), 115. <https://doi.org/10.3390/geosciences14050115>.
5. Du, H., Huang, X., Wang, H., Wan, Y., Huang, S., Li, W. (2025). Numerical investigation on damage characteristics of surrounding rocks in the deep underground tunnel subjected to full-face smooth blasting. *Scientific Reports*, 15(1), 14659. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98544-5>.

6. Dunkl, I., Antolín, B., Wemmer, K., Rantitsch, G., Kienast, M., Montomoli, C., Ding, L., Carosi, R., Appel, E., El Bay, R., Xu, Q., von Eynatten, H. (2011). Metamorphic evolution of the Tethyan Himalayan flysch in SE Tibet. In R. Gloaguen & L. Ratschbacher (Eds.), *Growth and Collapse of the Tibetan Plateau* (Geological Society, London, Special Publications, 353, pp. 45–69).
7. Golijanin, A, Malbašić, V. (2019) Geotechnical Terrain Models and Types of Instabilities in the Durmitor Flysch Complex. *RMZ – Materiali in Geokolje*. 66. 1-12. <https://doi.org/10.2478/rmzmag-2018-0021>.
8. Gong, B., Zhao, T., Thusyanthan, I., Tang, C. A., Zhou, G. G. (2025). Integrating RFA and DEM in adaptive RFA modeling of rock fracturing process. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(2), 2569-2587. <https://doi.org/10.17633/rd.brunel.25239508>.
9. Høien, A. H. (2025). A critical view on the recommendation of ribs of reinforced sprayed concrete support in the Q-system. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(10), 11541-11551. A. H. (2025). A critical view on the recommendation of ribs of reinforced sprayed concrete support in the Q-system. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(10), 11541-11551. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04134-8>.
10. Jakubowski, J., Phan, T. A. (2024). Distinct element simulation of rock mass deformation near tunnels in complex geological conditions, guided by statistical experimental design. *Archives of Mining Sciences*, 685-709. <https://doi.org/10.24425/ams.2024.152580>.
11. James, K. H. (2005). Palaeocene to middle Eocene flysch-wildflysch deposits of the Caribbean area: a chronological compilation of literature reports, implications for tectonic history and recommendations for further investigation. *Caribbean Journal of Earth Science*, 39, 29-46.
12. Kang, K., Huang, S., Liu, W., Cheng, H., Fomenko, I., Zhou, Y. (2022). Sandstone slope stability analysis under wetting-drying cycles based on generalized Hoek-Brown failure criterion. *Frontiers in Earth Science*, 10, 838862. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.838862>.
13. Karimi, O., Fillion, M.-H., Dirige, P. (2025). A Methodology for Assessing the Impact of In Situ Fractures on the Intensity of Blast-Induced Damage. *Mining*, 5(1), 7. <https://doi.org/10.3390/mining5010007>.
14. Kaspar, M., Latal, C., Pittino, G., Reinprecht, V. (2025). Degradation and decay of rocks: Linking wetting–drying and slake durability tests for climate-sensitive maintenance. *Geotechnics*, 5, 84. <https://doi.org/10.3390/geotechnics5040084>.
15. Khaleel, M. M., Ahmed, M. J., & Jacob, K. (2024). Stability assessment of high cliff slopes in carbonate rocks – A case study, Kingdom of Saudi Arabia. In M. S. Kovacevic, L. Libric, M. Bacic (Eds.), *Engineering Geology and Geotechnics: Building for the Future – Book of Extended Abstracts – 4th European Regional Conference of IAEG*. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering.
16. Kłopotowska, A. (2018). Ultrasonic constraint of the microfracture anisotropy of flysch rocks from the Podhale Synclinorium (Poland). *International Journal of Earth Sciences*, 107, 1941–1953. <https://doi.org/10.1007/s00531-017-1579-1>.
17. Lazaruk, Y., Krupskiy, Y., Andrejchuk, M., Bodlak, P., Shlapinskyi, V., Bodlak, V., Karabyn, V. (2023). Prospects for determination of hydrocarbon deposits in a platform autochthone under thrust of the Pokuttya-Bukovyna Carpathians. *Petroleum and Coal*, 65(1), 153-163.
18. Li, Q., Zhu, Z., Li, S., Wang, C., Li, S., Li, C. (2025). Effect of empty-hole on the rock blasting under in-situ stress. *Computers and Geotechnics*, 185, 107290. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107290>.
19. Li, T., Chen, M., Guo, B., Song, L., Fan, B., Cui, S. (2024). Study on fragmentation characteristics of rock mass in bench blasting with different coupling media. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1445990. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1445990>.

20. Malaj, A., Rusi, I., Meço, A., Faca, D., Allkja, S. (2017). The characterization of flysch rock in Albania with field and laboratory testing. *Procedia Engineering*, 191, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.160>.
21. Marinos, P., Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60(2), 85–92. <https://doi.org/10.1007/s100640000090>.
22. Marinos, V. (2014). Tunnel behaviour and support associated with the weak rock masses of flysch. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(3), 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.04.003>.
23. Miall, A. D. (1984). Flysch and molasse: the elusive models. In *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 54 (3-4), 281-291.
24. Mohammed, F. O., Al-Jawadi, A. S., Jaafar, I. M., Davie, C. (2025). The quantification of the Geological Strength Index (GSI): A review. *Iraqi National Journal of Earth Science*, 25(2), 253–267. <https://doi.org/10.33899/earth.2024.145397.1196>.
25. Moomivand, H., Soltanlinejad, S., Allahverdzadeh, H. (2026). Development of a new method for evaluating the geological strength index (GSI) by applying image analysis to in-situ rock mass. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 85(3), 158. <https://doi.org/10.1007/s10064-026-04778-6>.
26. Mutti, E., Bernoulli, D., Lucchi, F. R., Tinterri, R. (2009). Turbidites and turbidity currents from Alpine ‘flysch’ to the exploration of continental margins. *Sedimentology*, 56(1), 267-318.
27. Ogata, K., Festa, A., Pini, G. A., Pogacnik, Z. (2021). Mélanges in flysch-type formations: reviewing geological constraints for a better understanding of complex formations with block-in-matrix fabric. *Engineering Geology*, 293, 106289.
28. Pepe, G., Piazza, M., Cevasco, A. (2015). Geomechanical characterization of a highly heterogeneous flysch rock mass by means of the GSI method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(2), 465–477. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0642-4>
29. Rong, H., Li, N., Cao, C., Wang, Y., Li, J., Li, M. (2024). Numerical simulation of rock blasting under different in-situ stresses and joint conditions. *Plos one*, 19(4), e0299258. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299258>.
30. Sarkis-Onofre, R., Catalá-López, F., Aromataris, E., Lockwood, C. (2021). How to properly use the PRISMA Statement. *Systematic reviews*, 10(1), 117. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01671-z>.
31. Saroglou, H. (2013). Engineering behaviour of anisotropic and heterogeneous layered rocks. In Wu & Qi (Eds.), *Global View of Engineering Geology and the Environment* (pp. 215-234). Taylor & Francis Group, London.
32. Saroglou, H., Steiakakis, C. (2010). Prediction of strength of anisotropic and layered flysch-type rocks. In *Proceedings of 6th Hellenic conference on geotechnical engineering* (Vol. 2, pp. 243-249).
33. Sclater, J. G., Royden, L., Horvath, F., Burchfiel, B. C., Semken, S., Stegena, L. (1980). The formation of the intra-Carpathian basins as determined from subsidence data. *Earth and Planetary Science Letters*, 51(1), 139-162.
34. Shainoha I., Karabyn V. (2021). Peculiarities of Stratigraphic Distribution and Paleocology of Jurassic Bivalve Mollusks of the Pre-Carpathian Foredeep. *Journ. Geol. Geograph. Geology*, 30(4), 718–728. <https://doi.org/10.15421/112166>.
35. Shu, X., Zhu, Z., Qu, S., He, L., Zeng, H., Zhang, C., Tian, Y. (2025). Anisotropic characteristics and deformation behaviors of layered rocks surrounding tunnel: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(12), 8198–8223. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.03.009>.

36. Singh, J., Pradhan, S. P., Vishal, V., Singh, M. (2023). Characterization of a fractured rock mass using geological strength index: A discrete fracture network approach. *Transportation Geotechnics*, 40, 100984. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100984>.
37. Sun, B., Yang, X., Chu, H., Chen, F., Wang, J., Guo, P., Cheng, Z. (2025). Evolution law of surrounding rock stress field for ultra-deep shaft development blasting. *Scientific Reports*, 15(1), 5342. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-88722-w>.
38. Terron-Almenara, J., & Panthi, K. K. (2025). Analysis of Plastic Deformations for Tunnel Support Design in Weak Flysch Rock Mass of a Hydropower Tunnel in Central Albania: J. Terron-Almenara, K. Kanta Panthi. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(7), 8111-8143. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-04545-1>.
39. Terron-Almenara, J., Holter, K.G., & Høien, A.H. (2023). A hybrid methodology of rock support design for poor ground conditions in hard rock tunnelling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56, 4061–4088. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03273-8>.
40. Thomas, M. F. H., Bodin, S., Redfern, J., Irving, D. H. B. (2010). A constrained African craton source for the Cenozoic Numidian Flysch: implications for the palaeogeography of the western Mediterranean basin. *Earth-Science Reviews*, 101(1-2), 1-23.
41. Tziallas, G. P., Saroglou, H., & Tsiambaos, G. (2013). Determination of mechanical properties of flysch using laboratory methods. *Engineering Geology*, 166, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.09.002>.
42. Wei, J., & Khayat, K. H. (2025). Effect of shrinkage-mitigating materials, fiber type, and repair thickness on flexural behavior of beams repaired with fiber-reinforced self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Composites*, 156, 105868. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105868>.
43. Yan, S., Liu, Q. (2025). Research on mechanical response of flysch tunnel construction and plastic damage mechanism of surrounding rock. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6514374/v1>.
44. Ye, H., Yu, M., Shi, B., Yu, Y., Shang, F., Dong, Y., ... & Wang, Q. (2025). Optimization of borehole diameter to improve rock fragmentation in open-pit limestone mine bench blasting. *Scientific Reports*, 15(1), 23110. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07898-3>.
45. Yilmaz, O. (2023). Rock factor prediction in the Kuz–Ram model and burden estimation by mean fragment size. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 33, 100415.
46. Zhang, H., Xing, X., Du, Y., Li, T., & Yu, J. (2025). An approach of rock blasting simulation of equivalent blasting dynamic-static action. *Underground Space*, 23, 68-88. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2025.01.004>.
47. Білоніжка, Р., Генералова, Л., Шваєвський, О. (2010). Деякі аспекти геологічної будови і мінерального складу флішової формації в басейні р. Бодрак (Крим). *Вісник Львівського Університету. Серія геологічна*, (24).
48. Бондарева, Л., Беган, В. (2025). Особливості будови карпатського флішу та сучасні методи оцінки його фізико-механічних властивостей. *Основи та фундаменти*, 50, 21–31. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.50.2025.21-31>.
49. Гнилко, О. М. (2011). Тектонічне районування Карпат у світлі терейнової тектоніки. *Геодинаміка* 1(10). 47-57
50. Деревська, К., Бубняк, І., Субботін, А., Шевчук, О., & Бельський, В. (2009). Післяседиментаційні перетворення крейдово-палеогенових відкладів Флішових Карпат. *Мінералогічний збірник*, (1), 95-104.
51. Класифікатор надзвичайних ситуацій. ДК 019:2010. Інтернет джерело. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va457609-10#Text> (дата звернення 06.04.2026)
52. Попп, І., Гавришків, Г., Гаєвська, Ю., Мороз, П., Шаповалов, М. (2023). Еволюція умов седиментогенезу в Карпатському флішовому басейні в крейді–палеогені. *Геологія і*

геохімія горючих копалин, (3–4), 86–104. <https://doi.org/10.15407/ggcm2023.191-192.086>.

53. Ступка, О. С. (2010). Формування флішу Карпат в еволюції Тетису – новий погляд на проблему. Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України. Геология и полезные ископаемые Мирового океана, (2), 51-62.

References

1. Casale, M., Dino, G. A., Oggeri, C. (2025). Blasting of Unstable Rock Elements on Steep Slopes. *Applied Sciences*, 15(2), 712. <https://doi.org/10.3390/app15020712>.
2. César de Souza, J., Santos da Silva, A. C., & Silva Rocha, S. (2018). Analysis of blasting rocks prediction and rock fragmentation results using Split-Desktop software. *Tecnologia in Metalurgia, Materiais e Mineração*, 15(1), 22–30. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1234>.
3. Chigbu, U. E., Atiku, S. O., Du Plessis, C. C. (2023). The science of literature reviews: Searching, identifying, selecting, and synthesising. *Publications*, 11(1), 2. <https://doi.org/10.3390/publications11010002>.
4. Del Fabbro, M., Paronuzzi, P., Bolla, A. (2024). Geotechnical characterisation of flysch-derived colluvial soils from a pre-alpine slope affected by recurrent landslides. *Geosciences*, 14(5), 115. <https://doi.org/10.3390/geosciences14050115>.
5. Du, H., Huang, X., Wang, H., Wan, Y., Huang, S., Li, W. (2025). Numerical investigation on damage characteristics of surrounding rocks in the deep underground tunnel subjected to full-face smooth blasting. *Scientific Reports*, 15(1), 14659. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98544-5>.
6. Dunkl, I., Antolín, B., Wemmer, K., Rantitsch, G., Kienast, M., Montomoli, C., Ding, L., Carosi, R., Appel, E., El Bay, R., Xu, Q., von Eynatten, H. (2011). Metamorphic evolution of the Tethyan Himalayan flysch in SE Tibet. In R. Gloaguen & L. Ratschbacher (Eds.), *Growth and Collapse of the Tibetan Plateau* (Geological Society, London, Special Publications, 353, pp. 45–69).
7. Golijanin, A, Malbašić, V. (2019) Geotechnical Terrain Models and Types of Instabilities in the Durmitor Flysch Complex. *RMZ – Materiali in Geokolje*. 66. 1-12. <https://doi.org/10.2478/rmzmag-2018-0021>.
8. Gong, B., Zhao, T., Thusyanthan, I., Tang, C. A., Zhou, G. G. (2025). Integrating RFA and DEM in adaptive RFA modeling of rock fracturing process. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(2), 2569-2587. <https://doi.org/10.17633/rd.brunel.25239508>.
9. Høien, A. H. (2025). A critical view on the recommendation of ribs of reinforced sprayed concrete support in the Q-system. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(10), 11541-11551. A. H. (2025). A critical view on the recommendation of ribs of reinforced sprayed concrete support in the Q-system. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(10), 11541-11551. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04134-8>.
10. Jakubowski, J., Phan, T. A. (2024). Distinct element simulation of rock mass deformation near tunnels in complex geological conditions, guided by statistical experimental design. *Archives of Mining Sciences*, 685-709. <https://doi.org/10.24425/ams.2024.152580>.
11. James, K. H. (2005). Palaeocene to middle Eocene flysch-wildflysch deposits of the Caribbean area: a chronological compilation of literature reports, implications for tectonic history and recommendations for further investigation. *Caribbean Journal of Earth Science*, 39, 29-46.
12. Kang, K., Huang, S., Liu, W., Cheng, H., Fomenko, I., Zhou, Y. (2022). Sandstone slope stability analysis under wetting-drying cycles based on generalized Hoek-Brown failure criterion. *Frontiers in Earth Science*, 10, 838862. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.838862>.

13. Karimi, O., Fillion, M.-H., Dirige, P. (2025). A Methodology for Assessing the Impact of In Situ Fractures on the Intensity of Blast-Induced Damage. *Mining*, 5(1), 7. <https://doi.org/10.3390/mining5010007>.
14. Kaspar, M., Latal, C., Pittino, G., Reinprecht, V. (2025). Degradation and decay of rocks: Linking wetting–drying and slake durability tests for climate-sensitive maintenance. *Geotechnics*, 5, 84. <https://doi.org/10.3390/geotechnics5040084>.
15. Khaleel, M. M., Ahmed, M. J., & Jacob, K. (2024). Stability assessment of high cliff slopes in carbonate rocks – A case study, Kingdom of Saudi Arabia. In M. S. Kovacevic, L. Libric, M. Bacic (Eds.), *Engineering Geology and Geotechnics: Building for the Future – Book of Extended Abstracts – 4th European Regional Conference of IAEG*. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering.
16. Kłopotowska, A. (2018). Ultrasonic constraint of the microfracture anisotropy of flysch rocks from the Podhale Synclinorium (Poland). *International Journal of Earth Sciences*, 107, 1941–1953. <https://doi.org/10.1007/s00531-017-1579-1>.
17. Lazaruk, Y., Krupskiy, Y., Andrejchuk, M., Bodlak, P., Shlapinskyi, V., Bodlak, V., Karabyn, V. (2023). Prospects for determination of hydrocarbon deposits in a platform autochthone under thrust of the Pokuttya-Bukovyna Carpathians. *Petroleum and Coal*, 65(1), 153-163.
18. Li, Q., Zhu, Z., Li, S., Wang, C., Li, S., Li, C. (2025). Effect of empty-hole on the rock blasting under in-situ stress. *Computers and Geotechnics*, 185, 107290. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107290>.
19. Li, T., Chen, M., Guo, B., Song, L., Fan, B., Cui, S. (2024). Study on fragmentation characteristics of rock mass in bench blasting with different coupling media. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1445990. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1445990>.
20. Malaj, A., Rusi, I., Meço, A., Faca, D., Allkja, S. (2017). The characterization of flysch rock in Albania with field and laboratory testing. *Procedia Engineering*, 191, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.160>.
21. Marinos, P., Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60(2), 85–92. <https://doi.org/10.1007/s100640000090>.
22. Marinos, V. (2014). Tunnel behaviour and support associated with the weak rock masses of flysch. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(3), 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.04.003>.
23. Miall, A. D. (1984). Flysch and molasse: the elusive models. In *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 54 (3-4), 281-291.
24. Mohammed, F. O., Al-Jawadi, A. S., Jaafar, I. M., Davie, C. (2025). The quantification of the Geological Strength Index (GSI): A review. *Iraqi National Journal of Earth Science*, 25(2), 253–267. <https://doi.org/10.33899/earth.2024.145397.1196>.
25. Moomivand, H., Soltanlinejad, S., Allahverdzadeh, H. (2026). Development of a new method for evaluating the geological strength index (GSI) by applying image analysis to in-situ rock mass. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 85(3), 158. <https://doi.org/10.1007/s10064-026-04778-6>.
26. Mutti, E., Bernoulli, D., Lucchi, F. R., Tinterri, R. (2009). Turbidites and turbidity currents from Alpine ‘flysch’ to the exploration of continental margins. *Sedimentology*, 56(1), 267-318.
27. Ogata, K., Festa, A., Pini, G. A., Pogacnik, Z. (2021). Mélanges in flysch-type formations: reviewing geological constraints for a better understanding of complex formations with block-in-matrix fabric. *Engineering Geology*, 293, 106289.
28. Pepe, G., Piazza, M., Cevasco, A. (2015). Geomechanical characterization of a highly heterogeneous flysch rock mass by means of the GSI method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(2), 465–477. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0642-4>

29. Rong, H., Li, N., Cao, C., Wang, Y., Li, J., Li, M. (2024). Numerical simulation of rock blasting under different in-situ stresses and joint conditions. *Plos one*, 19(4), e0299258. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299258>.
30. Sarkis-Onofre, R., Catalá-López, F., Aromataris, E., Lockwood, C. (2021). How to properly use the PRISMA Statement. *Systematic reviews*, 10(1), 117. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01671-z>.
31. Saroglou, H. (2013). Engineering behaviour of anisotropic and heterogeneous layered rocks. In Wu & Qi (Eds.), *Global View of Engineering Geology and the Environment* (pp. 215-234). Taylor & Francis Group, London.
32. Saroglou, H., Steiakakis, C. (2010). Prediction of strength of anisotropic and layered flysch-type rocks. In *Proceedings of 6th Hellenic conference on geotechnical engineering* (Vol. 2, pp. 243-249).
33. Sclater, J. G., Royden, L., Horvath, F., Burchfiel, B. C., Semken, S., Stegena, L. (1980). The formation of the intra-Carpathian basins as determined from subsidence data. *Earth and Planetary Science Letters*, 51(1), 139-162.
34. Shainoha I., Karabyn V. (2021). Peculiarities of Stratigraphic Distribution and Paleocology of Jurassic Bivalve Mollusks of the Pre-Carpathian Foredeep. *Journ. Geol. Geograph. Geology*, 30(4), 718–728. <https://doi.org/10.15421/112166>.
35. Shu, X., Zhu, Z., Qu, S., He, L., Zeng, H., Zhang, C., Tian, Y. (2025). Anisotropic characteristics and deformation behaviors of layered rocks surrounding tunnel: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(12), 8198–8223. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.03.009>.
36. Singh, J., Pradhan, S. P., Vishal, V., Singh, M. (2023). Characterization of a fractured rock mass using geological strength index: A discrete fracture network approach. *Transportation Geotechnics*, 40, 100984. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100984>.
37. Sun, B., Yang, X., Chu, H., Chen, F., Wang, J., Guo, P., Cheng, Z. (2025). Evolution law of surrounding rock stress field for ultra-deep shaft development blasting. *Scientific Reports*, 15(1), 5342. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-88722-w>.
38. Terron-Almenara, J., & Panthi, K. K. (2025). Analysis of Plastic Deformations for Tunnel Support Design in Weak Flysch Rock Mass of a Hydropower Tunnel in Central Albania: J. Terron-Almenara, K. Kanta Panthi. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(7), 8111-8143. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-04545-1>.
39. Terron-Almenara, J., Holter, K.G., & Høien, A.H. (2023). A hybrid methodology of rock support design for poor ground conditions in hard rock tunnelling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56, 4061–4088. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03273-8>.
40. Thomas, M. F. H., Bodin, S., Redfern, J., Irving, D. H. B. (2010). A constrained African craton source for the Cenozoic Numidian Flysch: implications for the palaeogeography of the western Mediterranean basin. *Earth-Science Reviews*, 101(1-2), 1-23.
41. Tziallas, G. P., Saroglou, H., & Tsiambaos, G. (2013). Determination of mechanical properties of flysch using laboratory methods. *Engineering Geology*, 166, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.09.002>.
42. Wei, J., & Khayat, K. H. (2025). Effect of shrinkage-mitigating materials, fiber type, and repair thickness on flexural behavior of beams repaired with fiber-reinforced self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Composites*, 156, 105868. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105868>.
43. Yan, S., Liu, Q. (2025). Research on mechanical response of flysch tunnel construction and plastic damage mechanism of surrounding rock. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6514374/v1>.

44. Ye, H., Yu, M., Shi, B., Yu, Y., Shang, F., Dong, Y., ... & Wang, Q. (2025). Optimization of borehole diameter to improve rock fragmentation in open-pit limestone mine bench blasting. *Scientific Reports*, 15(1), 23110. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07898-3>.
45. Yilmaz, O. (2023). Rock factor prediction in the Kuz–Ram model and burden estimation by mean fragment size. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 33, 100415.
46. Zhang, H., Xing, X., Du, Y., Li, T., & Yu, J. (2025). An approach of rock blasting simulation of equivalent blasting dynamic-static action. *Underground Space*, 23, 68-88. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2025.01.004>.
47. Bilonizhka, P., Generalova, L., & Shvaievskiy, O. (2010). Deiaki aspekty heolohichnoi budovy i mineralnoho skladu flishovoi formatsii v baseini r. Bodrak (Krym). *Visnyk Lvivskoho Universytetu. Serii heolohichna*, (24).
48. Bondareva, L., & Began, V. (2025). Osoblyvosti budovy karpatskoho flishu ta suchasni metody otsinky yoho fizyko-mekhanichnykh vlastyivostei. *Osnovy ta fundamenty*, 50, 21–31. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.50.2025.21-31>.
49. Hnylko, O. M. (2011). Tektonichne raionuvannya Karpat u svitli tereinovoï tektoniky. *Heodynamika*, 1(10), 47-57.
50. Derevska, K., Bubniak, I., Subbotin, A., Shevchuk, O., & Belskyi, V. (2009). Pisliasedymentatsiini peretvorennia kreidovo-paleohenovykh vidkladiv Flishovykh Karpat. *Mineralohichni zbirnyk*, (1), 95-104.
51. Klasyfikator nadzvychainykh sytuatsii. DK 019:2010. Internet dzherelo. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va457609-10#Text> (data zvernennia 06.04.2026).
52. Popp, I., Havryshkiv, H., Haievska, Yu., Moroz, P., & Shapovalov, M. (2023). Evoliutsiia umov sedimentohenezu v Karpatskomu flishovomu baseini v kreidi–paleoheni. *Heolohiia i heokhimiia horiuchykh kopalyn*, (3–4), 86–104. <https://doi.org/10.15407/ggcm2023.191-192.086>.
53. Stupka, O. S. (2010). Formuvannya flishu Karpat v evoliutsii Tetisu – novyi pohliad na problemu. *Instytut heolohii i heokhimiï horiuchykh kopalyn NAN Ukrainy. Heolohiia y poleznye yskoraemye Myrovoho okeana*, (2), 51-62.



This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.