

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.1.252279>
УДК 551.2+551.3

О.Б. КЛИМЧУК

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна
E-mail: klimchouk.2020@gmail.com

НАСКРІЗНІ ФЛЮІДОПРОВІДНІ СТРУКТУРИ: КОНЦЕПТУАЛІЗАЦІЯ, ТЕРМІНОЛОГІЯ, ТИПИ, ВЛАСТИВОСТІ ТА РОЛЬ У ФЛЮІДООБМІНІ

Виконано глобальне узагальнення та аналіз даних про наскрізні флюїдопровідні структури, розглянуті проблемні питання пов'язаних з ними понять та термінології, запропонована їх типізація за різними ознаками та визначена їх роль у флюїдообміні, літогенезі та еволюції осадових басейнів. Такі структури мають практично повсюдне поширення і є інтегральною частиною дренажної системи верхньої кори, хоча інтенсивність їх розповсюдження та вплив на флюїдообмін широко варіюють та різко зростають у певних геологічних та геодинамічних обстановках. У локальному та субрегіональному масштабах наскрізні структури та пов'язані з ними явища демонструють нерівномірне по площі, кластерне поширення.

Ключова роль наскрізних структур у флюїдообміні, включно з міграцією вуглеводнів і забруднювачів, визначається їх перетинаючим і наскрізним характером по відношенню до шаруватих неоднорідностей, у тому числі до ізолюючих інтервалів, та зазвичай набагато вищою проникністю у порівнянні з вміщуючими породами. Наскрізний по вертикалі характер структур та локалізований вздовж них вертикальний флюїдообмін через латеральні літологічні та гідродинамічні межі викликає формування термальних і геохімічних аномалій та порушення рівноважного стану системи «вода—порода», супроводжується взаємодією каналових флюїдів з вміщуючими породами та пластовими водами і різними перетвореннями самих наскрізних каналів та порід, що їх вміщують. Цим визначається провідна роль наскрізних структур у накладеному літогенезі та рудній мінералізації.

Флюїдопровідна здатність наскрізних структур є мінливою у часі, бо залежить від їх походження, стадійності їх формування та вторинних змін. У зв'язку з цим порівняння такої здатності між морфогенетичними видами наскрізних структур є загалом утрудненим, хоча найбільш ефективними у цьому відношенні є структури карстового походження. Для структур флюїдодинамічного типу найбільші проникність та інтенсивність флюїдних потоків по каналах характерні для періодів їх формування та безпосередньо після них, а також у періоди активізації, що зазвичай пов'язані з тектонічними подіями.

Ключові слова: наскрізні флюїдопровідні структури; флюїдообмін; типологія наскрізних структур; накладений літогенез.

Цитування: Климчук О.Б. Наскрізні флюїдопровідні структури: концептуалізація, термінологія, типи, властивості та роль у флюїдообміні. *Геологічний журнал*. 2022. № 1 (378). С. 24—49. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.1.252279>

Citation: Klimchouk O.B. 2022. Throughgoing fluid-conducting structures: conceptualization, terminology, types, properties, and the role in fluid circulation. *Geologičnij žurnal*, 1 (378): 24-49. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2022.1.252279>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2022. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

1. Вступ

Варiацiї проникностi порiд, що складають верхню кору, охоплюють щонайменше 15 порядкiв (Ingebritsen, Sanford, 2006; Ingebritsen, Appold, 2012) (рис. 1). Порова проникнiсть (проникнiсть матрицi) бiльшостi дiагенетично зрiлих скельних порiд є вельми або дуже низькою. Особливу роль у флюїдообмiнi вiдiграють структури аномально високої по вiдношенню до матрицi проникностi — порушення суцiльностi порiд (трiщини, розломи) i геологiчнi тiла iнших типiв. Проникнiсть трiщин зазвичай на 2—5 порядкiв перевищує порову проникнiсть, а у крупних трiщин та систем карстових порожнин (каналiв) проникнiсть є ще на 1—2 порядки бiльш вищою (див. таблицю). За оцiнками роботи (Worthington, Ford, Beddows, 2000), каналова проникнiсть забезпечує переважну частку (вiд 94 до 99,7 %) пiдземного стоку у карбонатних породах рiзного вiку та з рiзними характеристиками порової та трiщинної порожнинностi. Таким чином, структури

аномально високої проникностi, особливо такi, що мають наскрiзний характер по вiдношенню до лiтостратиграфiї товщ, визначають архiтектуру проникностi гiрськопорodних мас та вiдiграють роль каналiв переважного флюїдообмiну, що зумовлює гiдрогеологiчнi аномалiї та рiзноманiтнi епiгенетичнi процеси в осадових басейнах.

Стратиформнi структури високої проникностi матрицi (вiдкрита пористiсть) та/або мереж трiщин забезпечують латеральний рух пiдземних вод, гiдродинамiчнi i гiдрохiмiчнi параметри яких визначають фон для вiдповiдних горизонтiв. Вертикальна взаємодiя водних флюїдних систем рiзних рангiв (водоносних горизонтiв i комплексiв, гiдродинамiчних зон) може здiйснюватися через матрицю слабопроникних роздiльних шарiв i товщ, але головну роль в цьому вiдiграють субвертикальнi, перетинаючi нормальне нашарування високопроникнi структури-канали.

Значення наскрiзних субвертикальних структур високої проникностi для флюїдообмiну i

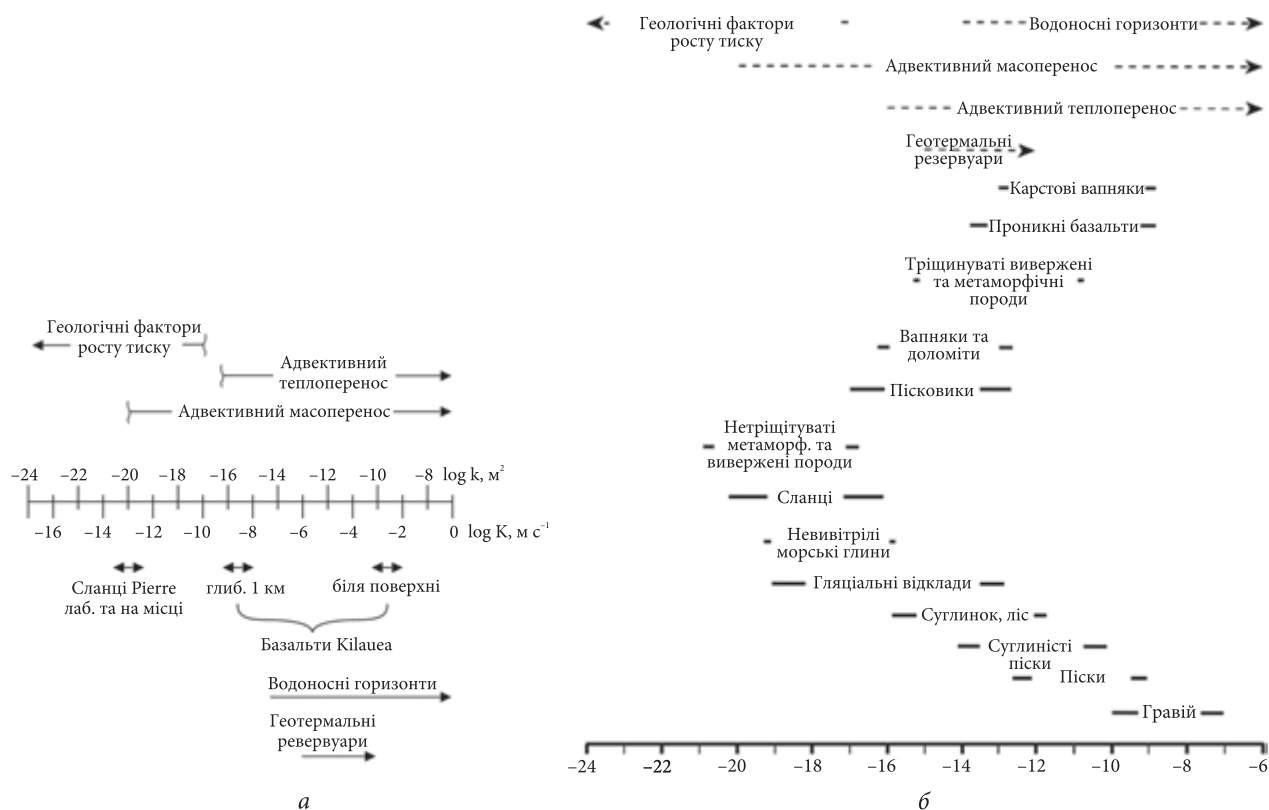


Рис. 1. Варiацiї проникностi, яка спостерiгається в рiзних геологiчних середовищах: а — за (Ingebritsen, Sanford, 2006); б — за (Ingebritsen, Appold, 2012)

Fig. 1. Variations in permeability observed in different geological environments: a — from (Ingebritsen, Sanford, 2006); b — from (Ingebritsen, Appold, 2012)

пов'язаних з ним геологічних явищ і процесів в цілому добре усвідомлено і розглядається в багатьох роботах (Лукин, 2004, 2014; Cartwright et al., 2007; Шестопалов и др., 2018 та ін.). Гідрогеологія осадових товщ багато в чому визначається розподілом, безперервністю і цілісністю слабкопроникних інтервалів (роздільних шарів і товщ) та наявністю наскрізних каналів переважної фільтрації. Виражена флюїдообмінна функція таких каналів впливає на численні геологічні процеси, включаючи літогенез, міграцію вуглеводнів і забруднювачів, мінералізацію і формування рудних тіл тощо. Проте залишаються недостатньо розробленими і часто суперечливими важливі питання номенклатури і термінології таких структур, їх морфологічної та генетичної класифікації, просторового розподілу, флюїдообмінної ролі структур різних типів та їх значення у формуванні гідрогеологічних аномалій.

Метою нашого дослідження, одним із результатів якого є ця стаття, є розробка цих питань на основі аналізу і синтезу міжнародної літератури і даних власних досліджень в різних типових регіонах світу. Задачею цієї статті є критичний огляд та розробка проблем но-

менклатури, термінології та типізації за різними ознаками наскрізних флюїдопровідних структур, аналіз та узагальнення уявлень щодо їх властивостей, механізмів утворення та ролі у флюїдообміні та літогенезі. У другій статті цього циклу (подана до розгляду у Геологічний журнал) представлена морфогенетична класифікація наскрізних флюїдопровідних структур та детальна характеристика виділених типів.

2. Концептуалізація структур та питання термінології

Як найбільш загальний термін для структур, що розглядаються, ми використовуємо термін «наскрізні флюїдопровідні структури» (НФ-структури; *throughgoing fluid-conducting structures* — TF-structures), які визначаються тут як *дискордантні до нормального напластування осадових порід (поперечні, субвертикальні) розривні деформації та інші геологічні тіла, що перетинають пластові тіла різних рангів (шари, пачки, формації) або більші інтервали земної кори та зумовлюють (у минулому чи теперішньому) аномально високу вертикальну проникність і локалізацію флюїдних потоків.*

Пористість і проникність типових тріщинно-карстових колекторів, за (Worthington, Ford, Beddows, 2000) Porosity and permeability of typical fracture-conduit aquifers from (Worthington, Ford, Beddows, 2000)

Породи, район	Пори (матриця)		Тріщини		Канали	
	Пористість (частка у загальній пористості), %	K_m , м/с (частка стоку, %)*	Порожнинність (частка у загальній порожнинності), %	K_t , м/с (частка стоку, %)*	Пустотність (частка у загальній пустотності), %	K_c , м/с (частка стоку, %)*
Доломіти, Онтаріо (Канада), нижній палеозой	6,6 (99,7)	1×10^{-10} (0,000003)	0,02 (0,3)	1×10^{-5} (3)	0,003 (0,05)	3×10^{-4} (97)
Вапняки, Кентуккі (США), верхній палеозой	2,4 (96,4)	2×10^{-11} (0)	0,03 (1,2)	1×10^{-5} (0,3)	0,06 (2,4)	3×10^{-3} (99,7)
Крейда, Англія, мезозой	30 (99,9)	1×10^{-8} (0,02)	0,01 (0,03)	4×10^{-6} (6)	0,02 (0,07)	6×10^{-5} (94)
Вапняки, Юкатан (Мексика), еоцен—плейстоцен	17 (96,6)	7×10^{-5} (0,02)	0,1 (0,6)	1×10^{-3} (0,2)	0,5 (2,8)	4×10^{-1} (99,7)

* Внесок кожного виду порожнинності у підземний сток розраховано за формулою: $F_m = K_m / (K_m + K_t + K_c)$, де F — частка стоку; K — коефіцієнти фільтрації різних середовищ, позначені індексами m (матриця), t (тріщини) і c (канали).

* Contribution to flux of particular porosity type was calculated with the following equation: $F_m = K_m / (K_m + K_t + K_c)$, where F — fraction of flux; K — permeability coefficients for various media, indicated by indexes m (matrix), t (fractures) and c (conduits).

Як зазначав О.Ю. Лукин (Лукин, 2004), проблема субвертикальних геологічних тіл аж ніяк не є новою, оскільки вони є традиційним об'єктом інтересу в рудній геології (штокверки, рудні стовпи тощо) та вулканологів (вертикальні концентричні структури, магнемапровідні канали тощо). До цього слід додати інтерес седиментологів до наскрізних тіл-інжектитів ремобілізованих кластичних породних мас (Hurst et al., 2003a; Braccini et al., 2009; Wheatley et al., 2016) та фахівців різних дисциплін до труб брекчій. Крім того, наскрізні поперечні геологічні тіла зазвичай є продуктом флюїдного перетворення розломів та розломних зон, які є об'єктами постійної уваги у тектоніці та структурній геології.

Однак інтерес до НФ-структур різко посилюється в останні десятиліття у зв'язку, поперше, із зростанням кількості та якості тривимірних сейсмічних даних, за якими такі структури масово виявляються у багатьох регіонах, по-друге — із усвідомленням їх значення як основних елементів дренажної системи осадового чохла, що відіграють найважливішу роль у міграції флюїдів (Лукин, 2004; Шестопалов и др., 2018) і, відповідно, в еволюції осадових басейнів та літогенезі (Лукин, 2004, 2014; Беленицкая, 2011; Andersen, 2012 та ін.), формуванні флюїдогенних родовищ (в тому числі вуглеводнів і металів), використанні геотермальної енергії, оцінці ризиків витоків при геологічному похованні радіоактивних відходів, CO₂ та інших матеріалів (Cartwright et al., 2007; Hurst, Cartwright, 2007; Cartwright, Santamarina, 2015).

НФ-структури є структурно-речовинними геологічними об'єктами, що утворюють геологічні неоднорідності. Разом з тим у міжнародній літературі використовується ряд термінів, що позначають концептуальні категорії-образи НФ-структур, які виділяються опосередкованими засобами ідентифікації або за деякими ознаками геологічних середовищ. Хоча такі структури можуть відображати реальні геологічні об'єкти чи їх сукупності, вони не мають однозначної відповідності конкретним структурно-речовинним і генетичним різновидам НФ-структур.

До таких концептуальних образів НФ-структур належать «фільтруючі термогідроколони» Г.Л. Поспелова (Поспелов, 1962), що описують гідротермальні системи над магматичними

інтрузивами, і «труби холодної дегазації» П.М. Кропоткіна (Кропоткин, 1986), що визначаються як субвертикальні зони крізьчохольного масштабу, які обмежують сукупності вуглеводневих покладів, різних газопроявів і слідів міграції високонапірних термальних відновлених флюїдів. Такі сукупності пов'язуються із висхідною міграцією флюїдів, наскрізні шляхи якої визначаються структурно-речовинними НФ-структурами різного походження та морфології.

О.Ю. Лукин (Лукин, 2004) виділяє *крізьформаційні флюїдопровідні системи* (далі — КФ-системи) як сукупність флюїдопровідних шляхів труб дегазації П.М. Кропоткіна (Кропоткин, 1986), підкреслюючи роль цих систем як функціональної основи труб дегазації. Ми розглядаємо НФ-структури як елементи КФ-систем О.Ю. Лукіна, що складають структурно-речовинну основу останніх та виділяються на підставі відповідних характеристик, функціональної єдності та єдності джерела флюїдів. Таким чином, ми фокусуємо увагу на морфологічному, речовинному та генетичному аспектах. КФ-системи можуть включати різноманітні за походженням і морфологією НФ-структури, але крім них — і латеральні елементи (пласти, стратиформні тріщинно-каналові системи, площини напластування та конкордантних розривів), які забезпечують латеральний гідравлічний зв'язок між різноінтервальними та зміщеними в плані відносно одного елементарними НФ-структурами.

Великі НФ-структури визначаються сейсмічними дослідженнями як зони зменшення сейсмічної амплітуди або втрати сейсмічної інформачії (Мамедов, Гулиев, 2003; Carthwright, Santamarina, 2015; Dentzer et al., 2018). Основний масив даних про них останні десятиліття формується за результатами досліджень в морських акваторіях, але подібні структури також широко виявляються і на суходолі. Саме структури, визначені за сейсмічними даними, розглядаються в сучасних узагальнюючих роботах, де вони інтерпретуються як «форми флюїдного потоку» (Andersen, 2012) або «труби витоків флюїдів» (Carthwright, Santamarina, 2015). Цими термінами наголошується на флюїдопровідній функції таких НФ-структур, але щодо структурно-речовинних характеристик та механізмів формування спостерігаються не-

визначеність та суперечливі інтерпретації, які аналізовані нижче у розд. 4.

Термін «*форми флюїдного потоку*» (fluid flow features) визначається як аномалії, утворені в ході минулого або теперішнього току флюїдів (нафти, газу, розсолів, підземних вод та магматичних флюїдів) від джерела у глибині до морського дна чи земної поверхні (Andersen, 2012). В іншому місці цитованої роботи цей термін охоплює «*будь-які явища, що сейсмічно визначаються, пов'язані з потоком флюїдів, що утворюють широке коло геологічних структур, більшість з яких спостерігається у зв'язку з каналовими системами вуглеводнів*» (Andersen, 2012, с. 92) (пер. наш. — О.К.). При цьому розглядаються саме наскрізні структури та пов'язані з ними форми (покмарки, грязьові вулкани, каміни, труби, структури інжектівних осадів, сипи) та діагенетичні явища. Хоча наведене вище визначення може включати і стратиформні структури, наприклад переважно латеральні каналові системи епігенного карсту, горизонти брекчій тощо.

У роботі (Carthwright, Santamarina, 2015) подібні структури називаються «*труби витоку флюїдів*» (fluid escape pipes) і визначаються як локалізовані вертикальні та субвертикальні шляхи фокусованої евакуації флюїдів з деякого розташованого нижче джерела живлення, що розпізнаються за сейсмічними даними як стовпчасті зони порушеного відображення та швидкісних аномалій. Таким чином, структури виділяються на основі флюїдопровідної функції та сейсмічних атрибутів безвідносно до їх походження. J. Karstens із співавторами (Karstens et al., 2019) розрізняють «*сейсмічні труби*» (seismic pipes) та «*сейсмічні каміни*» (seismic chimneys), але вони також часто використовуються як синоніми. Перші, зазвичай менших поперечних розмірів, переважно інтерпретуються як структури витоку (прориву) флюїдів; другі, з поперечниками до кількох кілометрів і з необов'язково вертикальними межами та з округлою формою у перерізі — як наскрізні області газонасичення тріщинно-порового середовища. Обидва типи структур розглядаються як провідники флюїдів та тисків між різними резервуарами у розрізі товщ.

Таким чином, поняття «*форми флюїдного потоку*» (Andersen, 2012) або «*труби витоку*

флюїдів» (Carthwright, Santamarina, 2015) відповідають концепціям-образам НФ-структур чи їх сукупностей, які можуть бути різноманітними за структурно-речовинними характеристиками, генезою та морфологією.

Функціональний аспект НФ-структур у нашому визначенні (див. вище) підкреслюється визначником «флюїдопровідні», який вказує на минулу чи сучасну роль таких структур як каналів переважного (локалізованого) флюїдообміну. За їх флюїдопровідною функцією НФ-структури можуть бути класифіковані на активні, реліктові, активовані та відмерлі. *Активні* НФ-структури зберігають функцію флюїдопровідників з моменту формування. *Реліктові* НФ-структури були активними каналами переважного флюїдообміну у минулому, але втратили цю функціональність внаслідок радикальної зміни умов (наприклад, втрати джерела живлення або виведення в іншу гідродинамічну зону), зберігаючи при цьому підвищену проникність. *Активовані* НФ-структури — це реліктові структури, що відновили функцію флюїдопроводу на деякому етапі в результаті подальшої зміни умов. Нарешті, *відмерлі* НФ-структури повністю втратили флюїдопровідну функцію в результаті заповнення літифікованим матеріалом і радикального зменшення проникності. Такими можуть бути магматичні дайки, діатреми, рудні стовпи, штокверки, щільно зцементовані інжектити ремобілізованих породних мас та трубки брекчій.

Багато НФ-структур є полігенетичними, утвореними за участю різних процесів та механізмів. Серед структур варто розрізняти *первинні*, в яких наявні властивості, створені одним визначеним процесом (наприклад, тектонічним розривом чи гідророзривом), і *вторинні*, властивості яких зумовлені певними значними перетвореннями первинних структур. Процеси утворення вторинних структур різноманітні, при провідній ролі флюїдогенних (метасоматоз, розчинення, флюїдизація та ін.). При визначенні генези вторинних НФ-структур слід враховувати домінуючу роль певних накладених процесів та механізмів у формуванні основних властивостей структур, а також виділяти ініціюючі (тригерні) та наведені процеси.

3. Ідентифікація НФ-структур

3.1. Сейсмічні методи

Великі НФ-структури виявляються сейсмічними дослідженнями як субвертикальні зони зменшення сейсмічної амплітуди, порушених відображень або втрати сейсмічної інформації, що перетинають шарувату товщу (Hurst et al., 2003a; Løseth et al., 2009; Carthwright, Santamarina, 2015; Dentzer et al., 2018) (рис. 2). Звичайними є висхідні або низхідні вигини та виклинювання шаруватих відображень поблизу структур, що переходять в області складних деформацій, ослаблених відображень або зростання амплітуди. Амплітудні аномалії зазвичай розподілені усередині або поблизу сейсмічних труб (Carthwright, Santamarina, 2015).

Вертикальні структури, що спостерігаються на сейсмічних розрізах, можуть бути сейсмічними артефактами (Carthwright, Santamarina, 2015; Karstens et al., 2019). Найпоширенішим випадком є висхідні вигини сейсмічних відбитків, що спостерігаються під долинами на вищезалігаючій поверхні (Karstens et al., 2019). Проблеми інтерпретації сейсмічних зображень поперечних структур є особливо суттєвими коли є латеральні та вертикальні аномалії сейсмічної швидкості (що веде до суттєвої невизначеності інтерпретації дійсної будови труб) з численними потенційними артефактами, які ускладнюють сейсмічне зображення (Cartwright, Santamarina, 2015). Образи реальних структур та сейсмічні артефакти можуть відрізнитися спеціальним аналізом (Karstens et al., 2019). Так, у цитованій роботі 108 з 564 аномалій визначені як сейсмічні артефакти та 456 як поперечні флюїдні канали.

Латеральні межі сейсмічних НФ-структур виявляються за горизонтальними або паралельними шаруватості зрізами атрибутів. Найчіткіші межі спостерігаються на зрізах атрибутів когерентності (див. рис. 2, б).

Внутрішня будова сейсмічно визначених структур зазвичай не виявляється через їх незначні поперечні розміри (бо зміни швидкості на короткому віддаленні перешкоджають правильній оцінці швидкості і, як наслідок, виявленню внутрішніх структур у колоні) та вертикальність (бо вона генерує заломлення) (Løseth et al., 2011). Мінімальні розміри вертикальних структур, визначених за даними сучасних сей-

смічних досліджень, становлять кілька десятків метрів за висотою і в поперечнику. НФ-структури менших розмірів, які можуть бути ефективними каналами флюїдообміну та які, вочевидь, значно більш поширені, за сейсмічними даними не виявляються.

Основною проблемою сейсмічної ідентифікації НФ-структур є невизначеності та протиріччя в інтерпретації їх речовинного складу та походження. Невизначеності також характерні для дійсної будови та геометрії сейсмічних структур через присутність латеральних та вертикальних аномалій сейсмічної швидкості та різноманітних потенційних артефактів у відображеннях (Cartwright, Santamarina, 2015). Ці проблеми задовільно вирішуються у випадках, коли інтерпретація верифікована даними буріння або наявні безсумнівні аналоги у тому ж регіоні сейсмічних структур, що однозначно трактуються, наприклад тіла-інжектири ремобілізованих кластичних породних мас (грязьові вулкани, піщані інжектири та ін.). У багатьох випадках такі дані відсутні, а поперечні сейсмічні структури трактуються лише за функціональною ознакою (форми флюїдного потоку, труби витоку флюїдів) або різноманітно та часто суперечливо (див. розд. 4).

3.2. Дані буріння

Субвертикальні структури рідко перетинаються свердловинами і тим більше рідко розбурюються по вертикалі. Навіть при цільовому розташуванні свердловини (заснованому на геофізичних дослідженнях) дані буріння та пов'язані методи дають обмежену та фрагментарну інформацію про основні характеристики НФ-структур, яка, проте, є дуже важливою, оскільки дозволяє встановити їх речовинний склад та верифікацію лігостратиграфії вміщуючих товщ.

3.3. Дослідження на відслоненнях та прямим проникненням

Численні НФ-структури виявляються в природних відслоненнях і відкритих виробках, а також у вигляді особливих форм рельєфу (наприклад, деякі типи щілиноподібних каньйонів) і карстових порожнин, доступних для прямого проникнення. Разом з тим вони далеко не завжди сприймаються як НФ-структури,

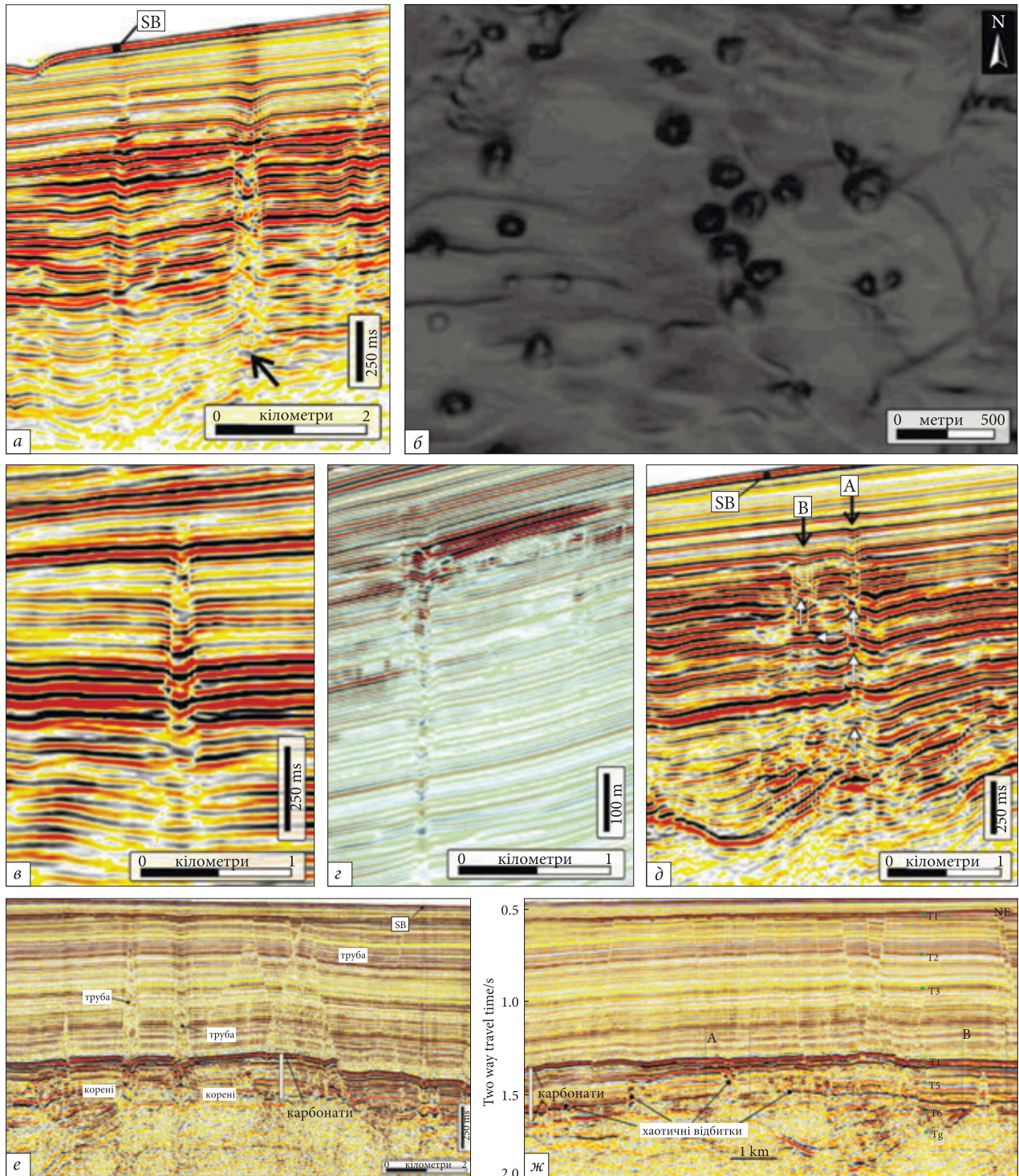


Рис. 2. Сейсмічні образи труб витоків флюїдів (*a–д* — за (Carthwright, Santamarina, 2015); *е та ж* — за (Sun et al., 2013): *a* — вертикальний сейсмічний профіль через серію труб на узбережжі Намібії; *б* — зріз агрибутів когерентності впоперек групи труб у цьому ж регіоні, що демонструє їх округлі форми у плані з діаметрами 100—300 м; *в* — вертикальний сейсмічний профіль через трубу біля узбережжя Намібії; *г* — вертикальний сейсмічний профіль через трубу біля узбережжя Мавританії; *д* — вертикальний сейсмічний профіль біля узбережжя Намібії, що показує біфуркацію труб по розрізу; *е* — сейсмічний профіль у Південно-Китайському морі, що показує трубні структури (труби брекчій) з корінням (зони хаотичних відображень) у підстилаючій карбонатній товщі; *ж* — сейсмічний профіль у Південно-Китайському морі, що показує інтервал розвитку провальних структур (зону хаотичних відбитків) у карбонатній товщі без вищерозташованих трубних структур (див. прямокутники А і В). SB — дно моря; А та В — біфуркація труб уверх

а часто описуються лише в контекстi спеціалізованих досліджень (седиментологічних, геоморфологічних, спелеологічних тощо) або помилково трактуються як результат приповерхневої денудації чи гравітаційного відсідання по тектонічних напрямних. Безпосереднє вивчення експонованих, ексгумованих або доступних для прямого проникнення НФ-структур є вкрай важливим, оскільки воно здатне давати детальну інформацію про їх морфологію, речовинний склад заповнювача, взаємовідношення з вміщувачими товщами тощо, на основі чого можна будувати адекватні моделі їх формування та еволюції.

Доступні для прямого обстеження НФ-структури різноманітні за морфологією та походженням (рис. 3, 4). Найпоширенішими є великі тектонічні тріщини (тріщини гравітаційного відсідання тут не розглядаються), тріщинні коридори, ексгумовані труби та дайки, вивчені цементованими брекчіями та іншими кластичними матеріалами, щілинні каньйони, рифто- та трубоподібні вертикальні канали у карстових порожнинах.

3.4. Термальні та гiдрохiмiчні аномалії

Активні НФ-структури характеризуються специфічним складом водних флюїдів, високими витратами і показниками тепломасопереносу, чим створюють виражені термальні та гiдрохiмiчні аномалії у товщах і водоносних горизонтах і комплексах, що перетинаються (Frumkin, Gvirtzman, 2006; Goldscheider et al., 2010; Dentzer et al., 2018). Аналіз геологічних даних райо-

Fig. 2. Seismic images of fluid escape pipes (*a-d* — from (Carthwright, Santamarina, 2015); *e* and *ж* — from (Sun et al., 2013): *a* — vertical seismic profile through a series of pipes offshore Namibia; *b* — a section of coherence attributes across a group of pipes in the same region, showing their rounded shapes in plan with diameters of 100-300 m; *v* — vertical seismic profile through a pipe off the coast of Namibia; *z* — a seismic profile through a pipe offshore Mauritania; *d* — vertical seismic profile offshore Namibia, showing the bifurcation of pipes; *e* — seismic profile in the South China Sea showing pipe structures (breccia pipes) with roots (chaotic reflection zones) in the underlying carbonate strata; *ж* — a seismic profile in the South China Sea showing the interval of collapse structures development (chaotic reflection zones) in the carbonate strata without related pipe structures above (see rectangles A and B); SB — the bottom of the sea; A and B — upwards bifurcating pipes

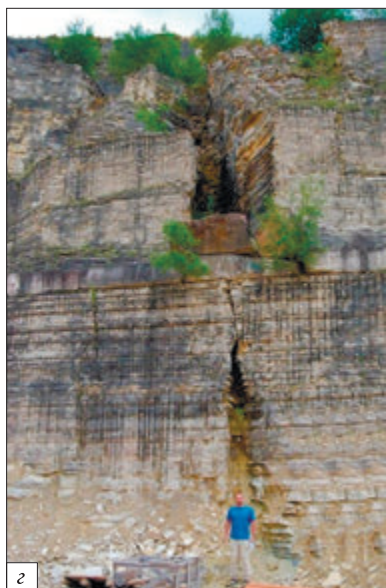
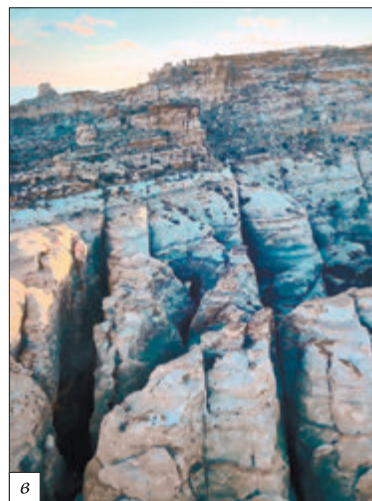
нів таких аномалій зазвичай вказує на їх зв'язок із тектонічними структурами, ідентифікованими іншими методами. Позитивні термальні аномалії в породах чохла, які можуть досягати кількох десятків °C (Yang et al., 2004; Dentzer et al., 2018), практично завжди позначають висхідний потік флюїдів від глибших резервуарів. Гiдрохiмiчні аномалії, пов'язані з висхідними потоками по НФ-структурах, характеризуються присутністю компонентів іонного складу та газів глибинного тiєю чи іншою мірою походження.

4. Типи та походження НФ-структур

4.1. Проблема генетичної типізації НФ-структур

Генетична типізація НФ-структур є складною проблемою насамперед через багатоаспектність поняття про походження. У широкому значенні походження охоплює зародження явища та його еволюцію до спостережуваного стану. Стосовно НФ-структур воно включає щонайменше такі аспекти: механізми утворення початкових неоднорідностей (деформацій) та фактори їх запуску («ініціюючі» фактори), процеси прогресивного розвитку та перетворення структур, процеси їх заповнення та фосилізації. Механізми (процеси) утворення структур можуть бути дискретними, уривчастими або тривалими. Крім того, генетична інтерпретація повинна включати функціональний (флюїдний режим) та морфологічний (морфогенетичний) аспекти, а також здійснюватись у контексті локальних/регіональних геологічних умов та геодинамічних історій.

Деякі концепції та терміни, що стосуються механізмів виникнення та розвитку структур, мають різне тлумачення та застосування у міжнародній та російськомовній літературі або у різних галузях знання. Наприклад, поняття «флюїдизація» (*fluidization*) у російськомовній геологічній літературі зазвичай використовується стосовно магматичних і вулканічних процесів (Геологический..., 1973), як і термін «флюїдизати» (породи, що формуються у процесі еволюції так званих флюїдно-експлозивних систем) (Махлаев, Голубева, 2001). У міжнародній літературі, слідом за роботою (Reinolds, 1954), термін *fluidization* широко ви-



користується стосовно осадових кластичних порід у значенні, аналогічному тому, яке прийнято в технологіях, — процес, при якому флюїд, що рухається (як правило, знизу вгору), проникає через породу (як правило, слабкозцементовану), долаючи сили зчеплення частинок, захоплюючи їх за собою. У третьому виданні Геологічного словника (Геологический ..., 2010-2012) терміну «флюїдизація» вже дано подібне трактування, якого ми дотримуємося,

- ◀ **Рис. 3.** Приклади НФ-структур у відслоненнях, формах рельєфу та карстових порожнинах: *a* — закарстовані тріщини-рифти у вапняках формації Waterways, кар'єрі Хаммерстоун Альберта, Канада (фото з (Broughton, 2021)); *b* — рифтоподібні канали у ранньопротерозойських кварцитах формації Black Reef, верхів'я каньйону Блейд, західний Трансвааль, Південна Африка (фото з Google Earth); *c* — закарстовані тріщини-рифти у пісковиках формації Entrada, Національний парк Arches, плато Колорадо, Юта, США (снэпшот з відео на YouTube: Best of Moab, Keep Your Daydreams); *d* — рифтоподібний карстовий канал у кар'єрі верхньоюрських (Малм) вапняків, Франконський Альб, Німеччина, за (Homuth et al., 2011); *e* — щілиноподібний каньйон у пісковиках формації Navaho, Каньйонланд, Юта, США; *f* — щілиноподібний каньйон у пісковиках, гори Джангланг, провінція Чжэцзян, Китай; *g* — каньйон по рифтоподібному каналу в ордовікських пісковиках, гори Гужанг, провінція Хунан, Китай; *h* — щілиноподібний каньйон у пізньокембрійських пісковиках району Петра, Іорданія (фото з інтернету); *i* — щілиноподібний каньйон (каньйон Пагода) у триасових пісковиках Сіднейського басейну, Австралія (фото David Noble)

Fig. 3. Examples of TF-structures in outcrops, landforms and karst cavities; *a* — karstic rifts in the Waterways Formation, exposed in the Hammerstone Quarry, Alberta, Canada (photo from (Broughton, 2021)); *b* — rift-like conduits in the Early Proterozoic quartzites of the Black Reef Formation, Blade Canyon Upper Area, Western Transvaal, South Africa (photo from Google Earth); *c* — widened fissures-rifts in Entrada sandstones, Arches National Park, Colorado Plateau, Utah, USA (snapshot from YouTube video: Best of Moab, Keep Your Daydreams); *d* — rift-like karst conduit in the Upper Jurassic (Malm) limestone quarry, Franconian Alb, Germany (photo from (Homuth et al., 2011)); *e* — slit-like canyon in the sandstones of the Navaho Formation, Canyonland, Utah, USA; *f* — slit-like canyon in sandstones, Zhangland Mountains, Zhejiang Province, China; *g* — canyon along the rift-like conduit in the Ordovician sandstones, Guzhang Mountains, Hunan Province, China; *h* — slit-like canyon in the Late Cambrian sandstones of the Petra district, Jordan (photo from the Internet); *i* — slot-like canyon (Pagoda Canyon) in the Triassic sandstones of the Sydney Basin, Australia (photo by David Noble)

хоча в російськомовній літературі в такому сенсі використовується термін «псевдозрідження» (Махлаев, Голубева, 2001).

Генетичні інтерпретації поперечних сейсмічних структур різноманітні та часто суперечливі. Ці структури трактуються як структури гідророзриву (Løseth et al., 2011; Cartwright et al., 2007), флюїдизації (Lowe, 1975), капілярної (Liu, Flemings, 2006) або експлозивної (Karstens et al., 2019) інвазії газів, піщані інжектити (Hurst et al., 2003a; Chan et al., 2007), канали грязьових вулканів (Мамедов, Гулиев, 2003), провальні-просадочні труби над порожнинами і зонами розущільнення (Whittaker, Reddish, 1989; Cartwright, Santamatina, 2015), канали витоку при диференційованому конседиментаційному ущільненні опадів (Cartwright, Santamatina, 2015), магматичні та соляні інтрузії.

У контексті аналізу за сейсмічними даними структур витоку флюїдів через «ізолятори» (слабопроникні шари та товщі) J. Cartwright із співавторами (Cartwright et al., 2007) розрізняють три групи: розломи, інтрузії та труби. У групі «інтрузії» виділено піщані, грязьові, соляні та магматичні. У групі «труби» виокремлені труби розчинення, гідротермальні, продування (blowout), просочування. Ці категорії частково перетинаються, а в деяких діють механізми, відмінні від заявлених у назві. Наприклад, як труби розчинення розглядаються труби брекчій, утворені гравітаційним обваленням порожнин розчинення. Хоча розчинення (розвиток карстових порожнин) тут діє як спусковий фактор, самі структури утворюються при провідній ролі гравітаційного обвалення. Справжні труби розчинення (вертикальні канали-шахти) можуть утворюватися гідротермальними флюїдами і відповідати категорії гідротермальних труб.

Найчастіше утворення сейсмічних труб апріорі пов'язується з флюїдизацією (у значенні за роботою (Reinolds, 1954)) та аномально високими тисками (АВТ) у горизонтах-«джерелах» і гідророзривами у перекриваючих товщах, проте обґрунтування дії саме цих механізмів зазвичай відсутнє. Такий тренд у генетичній інтерпретації сейсмічних труб пояснюється переважанням даних по морських акваторіях і товщах із відносно молодими, імовірно, слабоконсолідованими осадами (що, втім, рідко конкретизується в публікаціях),

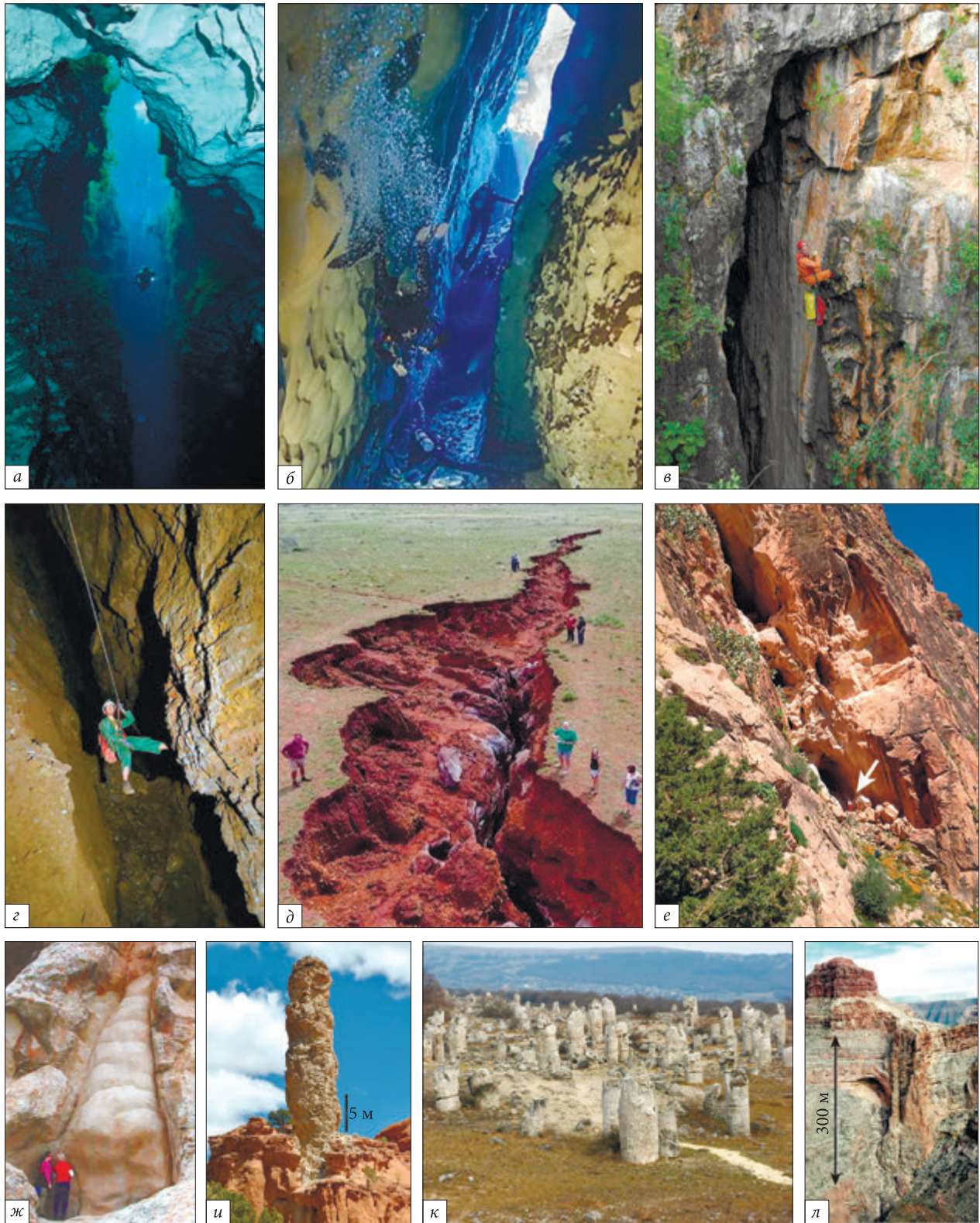


Рис. 4. Приклади НФ-структур у відслоненнях, формах рельєфу та карстових порожнинах: а — рифтовий канал печери Кафедрал у ранньоміоценових вапняках, південна Австралія (фото savingnews.com); б — рифтовий канал печери Девіс Хоул, Невада, США (фото Brett Seymour); в — рифтовий канал печери Драгон Бриз у неопротерозойських доломітах, Намібія (фото Namibian ground water systems); г — рифтовий канал печери Армагеддон у архейських доломітах, глибиною до 260 м і довжиною понад 2 км, Південна Африка (фото Joseph Tucker); д — рифгоподібний канал у архейських доломітах, що розкрився у січні 2017 р., Південна Африка (фо-

Але поширення цього трактування на широкий спектр структур у рiзних континентальних геологiчних обстановках, яке часто спостерiгається, вочевидь не виправдано та у багатьох випадках суперечить характеристикам структур.

4.2. Властивостi НФ-структур, суттєвi для генетичної iнтерпретацiї

4.2.1. Розповсюдження

Надзвичайно широке розповсюдження НФ-структур рiзних розмiрних рангiв в осадовому чохлi було лише нещодавно встановлено завдяки розвитку та розширенню площ сейсмiчних дослiджень. Однак структури, що сейс-

то Henk van Hunks); *e* — рифтовий канал печери Азра-3 у юрських вапняках, Марокко (фото з (Audra, 2015)), стрiлкою позначена фiгура людини для масштабу); *ж* — канал, заповнений iнжектитом-пiсковиком, елемент гiдротермального каналового комплексу у ранньоюрських пiсковиках басейну Каро, Пiвденна Африка (фото з (Jamtveit et al., 2004)); *и* — вiдпрепарована трубоподiбна пiсковикова iнтрюзiя у пiсковиках Ентрада, басейн Кодакром, Юта, США (фото з (Ross et al., 2014)); *к* — вiдпрепарованi денудацiєю трубоподiбнi тiла карбонатного матерiалу у ранньоеоценових пiсках у районi Варни, Болгарiя (фото з (De Boever et al., 2006)); *л* — труба брекчiй у карбонних вапняках Redwall каньйона Колорадо, США (фото з (Wenrich, Sutpin, 1988))

Fig. 4. Examples of TF-structures in outcrops, landforms and karst caves: *a* — rift-like channel of the Cathedral Cave in the Early Miocene limestones, South Australia (photo cavingnews.com); *b* — rift-like channel of Devils Hall Cave, Nevada, USA (photo by Brett Seymour); *v* — rift-like channel of Dragon Breeze cave in Neo-Proterozoic dolomites, Namibia (photo Namibian ground water systems); *z* — rift-like channel of the Armageddon Cave in the Archean Dolomites, up to 260 m deep and over 2 km long, South Africa (photo by Joseph Tucker); *d* — rift-like channel in the Archean Dolomites, opened in January 2017, South Africa (photo by Henk van Hunks); *e* — rift-like channel of Azra-3 cave in Jurassic limestones, Morocco (photo from (Audra, 2015)), an arrow indicates a human figure for scale); *ж* — channel filled with sandstone injection, an element of the hydrothermal channel complex in the Early Jurassic sandstones of the Karoo Basin, South Africa (photo from (Jamtveit et al., 2004)); *и* — exhumed tubular sand intrusion in Entrada sandstones, Kodakhrom Basin, Utah, USA (photo from (Ross et al., 2014)); *к* — exhumed tubular bodies of carbonate material in the Early Eocene sands near Varna, Bulgaria (photo from (De Boever et al., 2006)); *л* — breccia pipe in Carboniferous Redwall limestones in the Colorado Canyon, USA (photo from (Wenrich, Sutpin, 1988))

мично визначаються, по-перше, в основному залишаються «прихованими» у корпоративних матерiалах, по-друге, часто сприймаються як артефакти i не пiддаються подальшому аналізу та iнтерпретацiї (Cartwright, Santamarina, 2015). Поширення НФ-структур, якi не виявляються стандартними сейсмiчними методами, ймовiрно, багаторазово перевищує розповсюдження сейсмiчно визначених структур. Не буде перебільшенням твердження про те, що НФ-структури мають практично повсюдне поширення та є iнтегральною частиною дренажної системи верхньої частини кори. Хоча iнтенсивнiсть їх розвитку та вплив на флюїдообмiн можуть широко варiювати та рiзко зростати у певних геологiчних та геодинамiчних ситуацiях.

Аналіз лiтератури вказує на бiльш широке розповсюдження НФ-структур у тектонiчно активних обстановках, таких як конвергентнi окраїни, передгiрські прогини, провiнцiї зсуву, рифтовi зони, внутрiшньоплитнi зони тектонiчної активiзацiї. У таких регіонах спостерiгається зосередження явищ, пов'язаних з локалізованими флюїдними розвантаженнями, такими як гiдротермальнi системи, висхiднi розвантаження мiнералізованих глибинних вод i газiв, гiпогенний карст ендегенного типу, флюїдизати, кластичнi iнжектити, грязьовi вулкани, солянi iнтрюзiї, тафонi та сотовi структури (Беленицкая, 2011; Klimchouk, 2017a, b). У локальному та субрегіональному масштабах характерним для НФ-структур та пов'язаних з ними явищ є нерiвномiрне по площi, кластерне поширення (Klimchouk, 2007, 2017a; Cartwright, Santamarina, 2015).

4.2.2. Морфологiя та розмiри

НФ-структури за визначенням є вертикальними чи субвертикальними. За морфологiєю серед них розрiзняються двi основнi групи: 1 — *трубнi*, округлi або овальнi та з порiвнянними розмiрами у горизонтальному перерiзi на рiзних рiвнях; 2 — *лiнійнi* (трiщино- та рифтоподiбнi), витягнутi по простяганню та за висотою при бiльш-менш сталiй ширинi, малiй у порiвняннi з поперечними розмiрами. Вирiзняються також структури *конусоподiбнi* (перевернутий конус) та *складної морфологiї* — мiнливої за висотою та по простяганню або з мно-

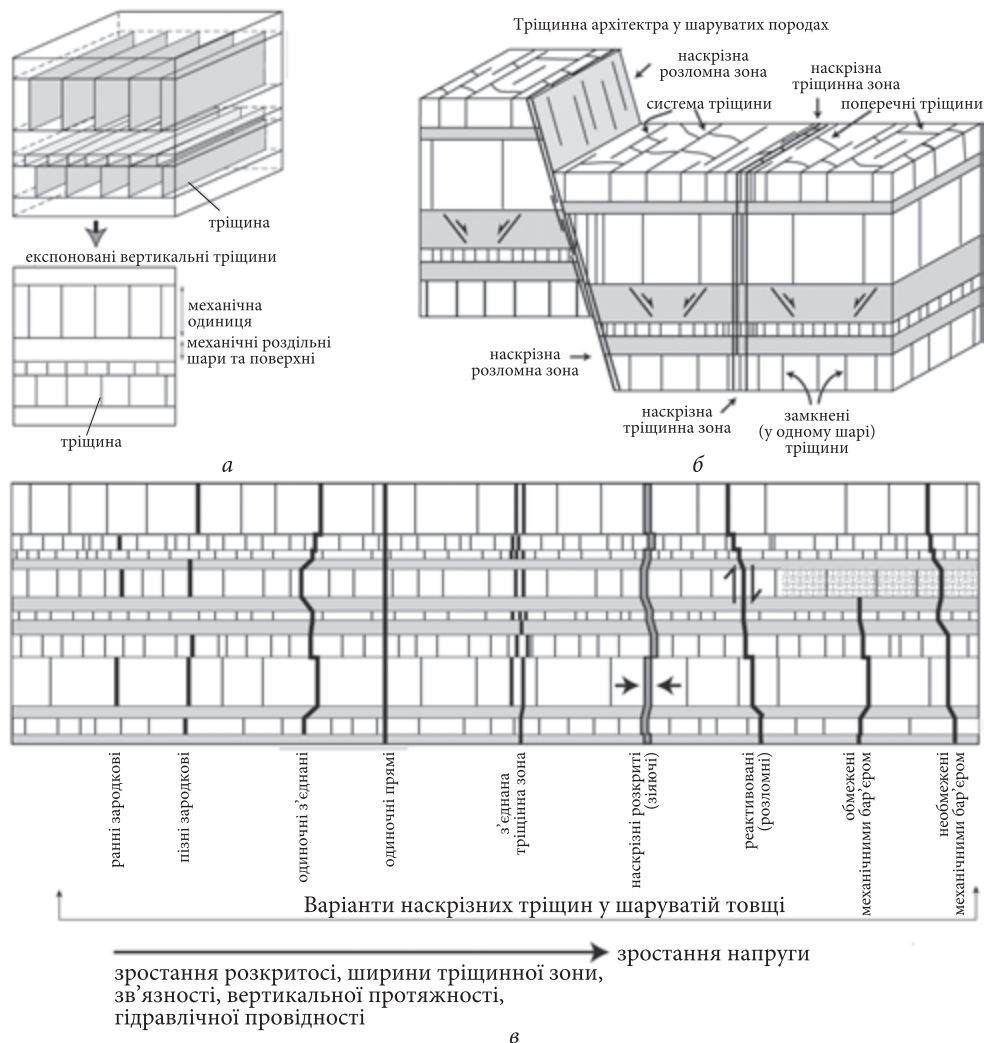


Рис. 5. Концептуальна ілюстрація механічної та тріщинної стратиграфії (а — за (Cooke et al., 2006) та номенклатура наскрізних тріщин (б, в — за (Gross, Eyal, 2007))

Fig. 5. Conceptual illustration of mechanical and fracture stratigraphy (a — form (Cooke et al., 2006) and nomenclature of throughgoing fractures (б, в — form (Gross, Eyal, 2007))

жинними пов'язаними елементами.

За розмірами НФ-структури варіюють у дуже широких діапазонах. Переважна більшість НФ-структур має висоту від кількох десятків метрів до близько 500 м. Однак деякі структури досягають висоти 2000 м (Moss, Cartwright, 2010), канали грязьових вулканів — 5000 м (Korf, 2002) і навіть понад 10 км (Мамедов, Гуліев, 2003), а крізькорові розломи та розломні зони — 15 км та навіть більших вертикальних розмірів. Поперечні розміри НФ-структур зазвичай знаходяться в межах від кількох метрів до перших сотень метрів, але можуть сягати 500 м (Cartwright, Santamarina, 2015) і навіть кількох кілометрів (Мамедов, Гуліев, 2003). Відношення висоти до діаметра у сейсмічно

визначених трубних структур варіює від 0,8 до 20 (Cartwright, Santamarina, 2015), але у субсейсмічних структур може досягати 50 і більше.

4.2.3. Стратиграфічне положення, положення кореневих зон та верхніх замикань

Флюїдопровідна функція НФ-структур багато в чому визначається (крім проникності самих каналів та розподілом тиску) їх розміщенням у вертикальному розрізі, зокрема позицією нижніх («коренів») та верхніх закінчень. Цим визначаються взаємовідношення з флюїдоносними та слабопроникними інтервалами, а отже, умови живлення та розвантаження на закінченнях та умови перетікання між горизонтами

та комплексами, що пересiкаються, а також склад мiгруючих флюїдiв.

Положення в розрiзi найбільш поширених тектоногенних (первинно — розривних) НФ-структур, а також вторинних структур, розвинених за розривними «напрямними», залежить вiд геодинамiчної еволюцiї рeгiону та розподiлу напруг у рiзні перiоди, але в основному контролюється *механiчною стратиграфiєю* (mechanical stratigraphy). Цi фактори спiльно визначають *трiщинну стратиграфiю* (Corbett et al., 1987; Gross et al., 1997; Underwood et al., 2003; Cooke et al., 2006; Laubach et al., 2009). Механiчна стратиграфiя є наслiдком вiдмiнностей у складi, структурах i текстурах порiд шаруватих товщ i подiляє останнi на одиницi за механiчними властивостями, товщиною та властивостями границь. Трiщинна стратиграфiя подiрoздiляє товщi за розподiлом трiщин у розрiзi та їх атрибутами, залежить вiд механiчної стратиграфiї, але також i вiд iсторiї навантажень та напруг. Тому поняття та подiрoздiли механiчної та трiщинної стратиграфiї не цiлком збiгаються (Laubach et al., 2009). Одиниця механiчної стратиграфiї представляє один або кiлька шарiв, механiчнi властивостi яких подiбнi та вiдрiзняються вiд сумiжних одиниць. Одиниця трiщинної стратиграфiї представляє один або кiлька шарiв, якi характеризуються подiбними параметрами трiщинуватостi, що вiдрiзняються вiд сумiжних шарiв (рис. 5). Хоча механiчна та трiщинна стратифiкацiї виявляються найбільш яскраво у розподiлi звичайної, переважно внутрiшньопластової, трiщинуватостi, вони також часто контролюють розподiл у розрiзi наскрiзних розривiв (Gross, Eyal, 2007) та розломiв (Ferill et al., 2017), а також сегментiв останнiх. Таким чином, при виявленнi закономірностей розподiлу тектоногенних НФ-структур рiзного вертикального розмаху, а також вторинних структур за тектонiчними «напрямними» слiд використовувати принципи та пiдходи механiчної та трiщинної стратиграфiї. Оскiльки розподiл внутрiшньопластових трiщин по товщах багато в чому визначає гiдростратиграфiю рeгiонiв, а розподiл наскрiзних розривiв — вертикальний водообмiн, трiщинна стратиграфiя вiдiграє важливу роль у гiдрогeологiї рeгiонiв.

Найважлившою характеристикою НФ-структур, пов'язаною з їх рoзмiрами та складнiстю

будови, є наскрiзне вiдношення до пластових структур рiзних рангiв. Крiзькоровi структури масштабiв рифтових зон (поясiв) та океанiчних зон спредингу тут розглядаються не як категорiя НФ-структур, а як областi переважного розвитку останнiх. Їх вклучення до номенклатури НФ-структур недоцiльно через мегамасштаби i складнiсть будови, яка визначається сукупнiстю НФ-структур менших масштабiв, що перетинають певнi iнтервали кори.

У функцiональному вiдношеннi рифтовi зни можна вiднести до СФ-систем О.Ю. Лукiна, хоча останнi визначалися автором (Лукин, 2004) як системи менших масштабiв, субординованi трубам дегазацiї П.М. Кропоткiна. Іншi геодинамiчно активнi пояси (активiзованi пасивнi окраїни, активнi окраїни, колiзiйні) також характеризуються мегамасштабами, але ще й не є сiчними (поперечними), проте вони генерують НФ-структури менших масштабiв i вiдiграють велику роль у мiграцiї флюїдiв.

Крiзькоровi розломи загалом вiдповiдають глибинним розломам, пересiкають земну кору, проникають у мантию та роздiляють кору на глиби. За даними сейсмічних дослiджень бiльшiсть глибинних розломiв затухають у верхах мантиї (тобто мають глибину до 70—100 км), але вирiзняються й такi, що сечуть астеносферу (до глибини 100—300 км) та досягають середньої мантиї (до глибини 400—700 км) (Хаин, 1973). Вони є зонами надходження глибинних флюїдiв до структур чохла, з чим пов'язана їх велика роль у флюїдообмiнi та накладеному лiтогенезi.

Крiзькоровi розломи є зазвичай складними структурами, будова яких у чохлi визначається сукупнiстю НФ-структур менших масштабiв i рiзного походження, якi переважно розглядаються у цiй статтi.

Крiзьчохольнi НФ-структури сiчуть весь осадовий чохол до фундаменту i зазвичай приуроченi до зон глибинних розломiв. На прикладi Пiвденно-Каспiйської западини такi структури розглядаються як великi, що характеризуються поперечними рoзмiрами 3—4 км та висотою вiд 8—10 до 20 км (Мамедов, Гулиев, 2003).

Крiзьформацiйнi НФ-структури перетинають значнi iнтервали чохла, що охоплюють одну або кiлька формацiї. Їм приблизно вiд-

повідують субвертикальні геологічні тіла середньої розмірної категорії, що характеризуються розмірами від десятків до сотень метрів у поперечнику та від перших сотень метрів до кілометра по вертикалі.

Крізьсвітні НФ-структури перетинають одну або кілька стратиграфічних світ і характеризуються типовими розмірами від кількох метрів у поперечнику та від кількох десятків до сотень метрів по вертикалі.

Крізьпластові НФ-структури перетинають один або кілька пластів і зазвичай відповідають елементарним великим тріщинам, порожнинам або іншим геологічним тілам з поперечними розмірами від дециметрів до декількох метрів і вертикальними розмірами від кількох метрів до перших сотень метрів. Внутрішньопластові структури не є наскрізними і тут не розглядаються.

Характер і положення кореневих зон та верхніх замикань, хоча нечасто визначаються сейсмічними дослідженнями або прямими спостереженнями, мають велике значення для інтерпретації походження та гідрогеологічної функції НФ-структур. Кореневі зони можуть асоціюватися з джерелом флюїдів, що дає додаткову інформацію про склад останніх та можливі процеси ініціювання та розвитку структур. Неглибоко розташовані кореневі зони в регіональних водоносних горизонтах та комплексах можуть вказувати на наявність АВТ та ймовірність флюїдодинамічних механізмів формування НФ-структур (Carthwright, Santamarina, 2015). Глибоке положення кореневих зон передбачає участь термальних глибинних флюїдів відповідного складу та глибинних механізмів формування тисків. Положення кореневих зон у межах карбонатних або евапоритових товщ вказує на ймовірність механізму формування НФ-структур обваленням великих карстових порожнин і висхідною міграцією порушеної зони. Прикладами можуть бути закладення коренів сотень труб брекчій на рівні карбонатних вапняків у районі Великого Каньйону на плато Колорадо (США) (Wenrich, Sutpin, 1988) або закладення коренів численних сейсмічних труб на рівні нижньоміоценової карбонатної товщі у масиві Донгша (найбільшому офшорному вуглеводневому родовищі Китаю) у Південно-Китайському морі (Sun et al., 2013) (див. рис. 2, е і ж).

Положення верхніх замикань зазвичай вказує на горизонт розсіювання тисків (при висхідних потоках) і наявність вищезалігаючого шару-ізолятора зі зниженою тріщинною або матриксною проникністю.

НФ-структури можуть бути відкритими на поверхню або морське дно — в останньому випадку вони часто вінчаються провальними шахтами, воронками-покмарками або конусами відкладів розвантаження. Вертикально накладені форми (покмарки або конуси відкладів) на вершині наскрізної структури свідчать про епізодичність її флюїдної активності (Carthwright, Santamarina, 2015). Проте увігнутість шарів у вищезалігаючій товщі може бути пов'язана і з провалью-просадочним просуванням структури. Наявність конусів, складених екструдованими осадами, вказує на функціонування «осадового» вулкану (грязьового або піщаного) та дію механізму флюїдизації.

4.2.4. Літостратиграфія вміщуючих товщ, що перетинаються

Будова і склад товщ, які перетинаються НФ-структурами, різноманітні і багато в чому визначають ймовірність тих чи інших механізмів розвитку структур. Більшість публікацій, що присвячені сейсмічним структурам, відносяться до морських акваторій, де такі товщі часто складені молодими слабкоконсолідованими осадами, для яких добре підходять зазвичай пропонувані флюїдопроривні механізми формування НФ-структур. Проте характерною проблемою багатьох публікацій є відсутність виразної літостратиграфічної характеристики розрізів, що обмежує можливості генетичного аналізу.

Механізми флюїдизації осадів кореневих зон і товщ, що перетинаються, нерідко пропонуються і для районів, де в розрізах присутні також консолідовані породи, наприклад пісковики, різноманітні сланці, вапняки, для яких прийнятність таких механізмів обмежена або сумнівна і вимагає спеціального обґрунтування. Навіть у разі явних структур флюїдодинамічного походження, наприклад каналів грязьових вулканів у переважно глинистих товщах, потрібне спеціальне обґрунтування механізмів їх проникнення через часто присутні у цих товщах окремі шари скельних порід.

4.2.5. Речовинний склад заповнення

НФ-структури можуть бути *впровадженими* (інтрузії), *заповненими* ремобілізованими (інжектити) або хімічними осадами та *порожністими* (не заповнені твердими або пухкими осадами). Для структур флюїдодинамічного походження передбачається безпосереднє впровадження стороннього матеріалу в товщу, що перетинається (соляні або магматичні інтрузії), або негайне чи подальше заповнення первинних флюїдорозривів і вторинних порожнистих каналів флюїдизованими кластичними осадами. У цих випадках речовинний склад наскрізних геологічних тіл визначається складом самих інтрузій чи залежить від складу мобілізованих осадів та режиму транспортування та осадження. Серед структур-інжектитів переважають піщані (пісковикові) та глинисті. Структури гідротермальних систем, пов'язаних із магматичними інтрузіями, часто заповнені рудними матеріалами.

НФ-структури первинного тектонічного походження зазвичай заповнюються частково або повністю мінеральними масами, відкладеними флюїдами, що мігрують по цих структурах. Склад мінералізуючих мас різноманітний залежно від складу мігруючих флюїдів, процесів взаємодії з вмщуючими породами і фізико-хімічних умов у відповідних інтервалах. Карстові структури розчинення також часто заповнюються хомогенними та кластичними осадами. Карстово-провальні структури заповнені брекчіями різного складу, який залежить від складу товщ, що перетинаються, та часто цементуються флюїдогенними мінеральними масами.

Вивчення матеріалів заповнювача, а також зон зміни порід навколо каналів НФ-структур надає важливу інформацію про їх походження та режим розвитку. Дослідження флюїдних включень та складу мінерального заповнювача, особливо мікрокомпонентів та ізотопного складу, дозволяє встановити походження флюїдів, їх температуру та інші фізико-хімічні умови, а також виявити етапи флюїдної тектонічної активності (Dublyansky et al., 2014; Craddock et al., 2021; Klimchouk et al., 2021; Spötl et al., 2021). Склад кластичного заповнювача інжектитів вказує на джерело та напрямок перенесення флюїдизованого матеріалу, а особливос-

ті структури та текстури — на гідродинамічний режим перенесення та осадження (Ross et al., 2014). Склад брекчій у трубах дозволяє співвідносити їх зі стратиграфічними одиницями походження та виявляти особливості процесу обвалення.

Заповнення НФ-структур зменшує їхню флюїдопровідну функцію, але їх проникність часто залишається такою, що набагато перевищує проникність матриці вмщуючих порід. Тому такі структури можуть залишатися каналами переважної флюїдної міграції протягом тривалих геологічних періодів. Разом з тим мінералізація нерідко призводить до фосилізації (втрати флюїдопровідних властивостей) НФ-структур.

4.2.6. Час утворення

Датування різними методами заповнювача та конусів пригрілових відкладів дозволяє встановити мінімальний вік структур та час відповідних періодів флюїдної активності (Wendt et al., 2019; Craddock et al., 2021), але не час утворення самих структур, який може значно передувати заповненню. Разом з тим прямі датування часу утворення та етапів еволюції НФ-структур нечисленні та відсутні для структур, що виявляються за сейсмічними даними (Cartwright, Santamartina, 2015). Аналіз різних геологічних характеристик і співвідношень НФ-структур із вмщуючими товщами вказує на широкий діапазон віків самих структур і періодів їх заповнення — від конседиментаційного утворення до накладеного через мільйони років після утворення вмщуючих порід.

4.3. Механізми утворення та розвитку початкових неоднорідностей

Утворення НФ-структур пов'язується у міжнародній літературі з різними процесами, огляди яких висвітлено у роботах (Huse et al., 2010; Andresen, 2012; Cartwright, Santamarina, 2015; Wheatley et al., 2016). Проте основну увагу в них приділено флюїдодинамічним механізмам, з дотичним чи відсутнім розглядом інших.

Крихка деформація є основним механізмом виникнення *тектонічних розривів* та *гідророзривів*; перших — унаслідок тектонічних, других — у результаті гідравлічних напруг. *Обвалення порожнин* також відбувається шляхом

крихкої деформації — під дією літостатичного тиску та сил гравітації. Хоча фізичні механізми тектонічних розривів, гідравлічних розривів і розривних деформацій при обрушенні порожнин подібні, вони розглядаються як різні геологічні механізми через відмінності у природі напруг та геологічних умов реалізації.

Формуванню тектонічних розривів присвячена численна література. Вони можуть отримувати значне (сантиметри-дециметри) початкове розкриття, яке може отримувати подальшу трансформацію та/або заповнюватись осадами *in situ* або впровадженими матеріалами.

Гідророзриви найчастіше приймаються основним механізмом утворення НФ-структур (Cartwright et al., 2007; Løseth et al., 2011; Wheatley et al., 2016 та ін.). У цьому механізмі АВТ у «кореневій» зоні викликає гідравлічне тріщиноутворення у перекриваючих породах, яке поширюється до поверхні перпендикулярно до мінімальної напруги і створює первинну структуру підвищеної проникності. Необхідний як початкова умова АВТ може створюватися різними процесами: гідродинамічними, діагенетичними, швидким гляціальним навантаженням, швидким накопиченням евапоритів, гідротермалізмом, впровадженням глибинних флюїдів та ін. Природне гідравлічне тріщиноутворення є, вірогідно, циклічним процесом унаслідок такого характеру нарощування порового тиску, який періодично скидається проривом флюїдів з подальшим закриттям тріщин (Hurst et al., 2003a).

Однак прийнятність гідравлічного тріщиноутворення як основного механізму утворення НФ-структур викликає сумніви. По-перше, добре сейсмічно визначені кореневі зони труб у багатьох випадках не відповідають звичайним областям формування АВТ, таким як структурні замикання антикліналей або висхідні виклинювання горизонтів, а закладені в синклінальних пониженнях або пологонахилених структурах без структурних замикань (Cartwright, Santamarina, 2015). По-друге, модель гідравлічного тріщиноутворення не узгоджується з чіткою трубною морфологією багатьох НФ-структур висотою у багато сотень метрів та співвідношенням висоти до ширини до 20 (Cartwright, Santamarina, 2015) чи більше. Цьому механізму також не відповідає морфологія та масштаби рифтоподібних структур,

які можуть мати поздовжні та вертикальні розміри у сотні метрів. По-третє, для здійснення ін'єкцій флюїдизованого кластичного матеріалу, наприклад піску об'ємом у тисячі м³ і висотою в сотні метрів, для гідравлічного тріщиноутворення знадобилися б нереалістично високі тиски і градієнти тисків між кореневою зоною і верхніми замиканнями структур (Hurst et al., 2003a). Разом з тим гідравлічне тріщиноутворення може бути ініціюючим механізмом, що відкриває шляхи локалізованого флюїдообміну і подальшого формування трубних структур за участю розчинення та інших процесів.

Розрідження (liquefaction) і флюїдизація розглядаються як основні процеси формування кластичних інжективів (Huuse et al., 2005; Ross et al., 2014; Wheatley et al., 2019; Karstens 2019 та ін.). Розрідження визначається як тимчасова або раптова втрата зчеплення між зернами внаслідок різкого збільшення порового тиску флюїдів до рівня, що дорівнює тиску перекриваючих осадів (Owen, 1987). Процес характеризується різким руйнуванням метастабільного пухкоупакованого каркасу, з переходом зерен у зважений у поровому флюїді стан (Lowe, 1975). Флюїдизація виникає при висхідній течії флюїдів через осад, що створює силу, яка долає силу зчеплення зерен (Owen, 1987) і зважує останні.

Капілярне впровадження газів також розглядається як механізм утворення сейсмічних труб там, де коренева зона генерує вільну газову фазу (Liu, Flemings, 2006; Cathles et al., 2010). Газ, захоплений капілярною облямівкою, накопичується до критичної потужності, коли сили впливання проштовхують газ через пори з формуванням газової колони, що просувається як поршень і заміщує рідину в порах (Cathles et al., 2010).

Гравітаційне обвалення порожнин може супроводжуватися міграцією зони та порожнини обвалення вверх по розрізу із формуванням труб брекчій. Утворення порожнин, що ініціює на певній стадії процес обвалення, зазвичай пов'язується з розчиненням порід (карстом), але іноді згадуються інші процеси втрати об'єму, зокрема дисоціація гідратів (Cartwright, Santamarina, 2015).

Деякі дослідники вважають, що формування труб провальним механізмом не потребує руху флюїдів (Cartwright, Santamarina, 2015) їх

табл. 2). Насправдi обвалення покрiвлi порожнини супроводжується розуцiльненням породи, при якому об'єм порушеної маси iстотно перевищує об'єм вихiдної породи. Це призводить до зменшення порожнини над колоною обрушення, яка росте ввeрх, та самозупинцi висхiдного просування вершини труби брекчiй. Тому зростання колони обвалення на значну висоту вимагає часткового видалення обваленого матерiалу флюїдними процесами — розчиненням, флюїдизацiєю та iн. (Huntoon, 1996; Klimchouk, Andrejchuk, 1996). Мiграцiя вершини труби ввeрх у стратифiкованому розрiзi супроводжується взаємодiєю її флюїдiв з рiзними породами i водоносними горизонтами, що створює можливiсть реалiзацiї рiзних флюїдних процесiв, якi пiдтримують подальше зростання труби гравiтацiйним обваленням.

5. Роль НФ-структур у флюїдообмiнi

Гiдрогeологiя осадового чохла багато в чому контролюється шаруватими неоднорiдностями проникностi, зокрема наявністю слабопроникних iзолюючих iнтервалiв. НФ-структури за визначенням є сiчними по вiдношенню, у тому числi, до iзолюючих iнтервалiв i, як правило, вiдрiзняються набагато вищою проникністю у порiвнянні з вiмщуючими породами, принаймнi на певних етапах своєї еволюцiї. Цим визначається їхня ключова роль у флюїдообмiнi, включно з мiграцiєю вуглеводнiв i забруднювачiв. Локальований по НФ-структурах вертикальний флюїдообмiн через латеральнi лiтологiчнi та гiдродинамiчнi межi супроводжується взаємодiєю каналових флюїдiв з вiмщуючими породами i пластовими водами горизонтiв, що пересiкаються, викликає формування термальних i геохiмiчних аномалiй, порушення рiвноважного стану системи «вода—порода» та рiзнi перетворення. Цим визначається провiдна роль НФ-структур у накладеному лiтогенезi та утвореннi рудних тiл.

Флюїдопровiдна здатнiсть НФ-структур є мiнливою у часi i залежить вiд стадiйностi їх формування та вторинних змiн, тому порiвняння такої здатностi мiж морфогенетичними типами НФ-структур є загалом утрудненим. Проте очевидно, що найбільш ефективними є структури карстового походження, у форму-

ванні яких задiяний механiзм зворотного зв'язку мiж ростом розкриття i витратою потокiв i якi характеризуються найбільшими розмiрами порожнин. Гiпогенний карстогенез посилює аномальнiсть гiдродинамiчних, геотермодинамiчних та геохiмiчних параметрiв у зонах НФ-структур та сприяє бiльш iнтенсивному перебiгу флюїд-породних взаємодiй (Климчук и др., 2013; Климчук, 2017).

Флюїдна активнiсть НФ-структур зазвичай має виражений iмпульсний характер, iнодi циклiчний, що пов'язано з змiнами граничних умов унаслiдок циклiчностi процесiв флюїдолiтогенетичної самоорганiзацiї осадових басейнiв (Ortoleva, 1994), тектонiчних подiй та змiн напруженого стану порiд, проривiв флюїдiв через iзолятори та iн. Найбiльшi проникнiсть та iнтенсивнiсть флюїдних потокiв каналами НФ-структур флюїдодинамiчного типу характернi для перiодiв пiд час i безпосередньо пiсля їх формування та в перiоди активiзацiї, якi зазвичай пов'язанi з тектонiчними подiями.

Великi НФ-структури найбільшого стратиграфiчного охоплення (крiзьформацiйнi, крiзьчохольнi) завжди мають складну будову, яка включає рiзнi за генезою, морфологiєю та гiдравлiчними властивостями сегменти на рiзних рiвнях розрiзу. Крім того, вертикальнi сегменти НФ-структур перетинають рiзнi гiдростратиграфiчнi одиницi та гiдродинамiчнi межi. Цими обставинами визначаються вiдмiнностi у флюїдопровiднiй функцiї вертикальних сегментiв у межах навиць однiєї НФ-структури. Рiзкi змiни гiдродинамiчних умов, викликанi, наприклад, гiдророзривом або проривами через слабопроникнi шари внаслiдок провалу покрiвлi порожнин i проникненням колони обвалення, можуть спричиняти iмпульси iнтенсивностi флюїдних потокiв в одному або кількох сегментах НФ-структур, але не виявлятися суттєво в iнших сегментах.

Найбiльша флюїдопровiдна ефективнiсть НФ-структур характерна для територiй, що знаходяться в режимi розтягування, а також охоплених гiдротермальними системами — фiльтруючими термогiдроколонами (Поспелов, 1962). Цi ефекти тiсно пов'язанi з мантийними процесами, що визначають розподiл та iнтенсивнiсть процесiв дегазацiї Землi та їх вплив на дренажну систему у жорсткiй корi (Шестопалов та iн., 2018).

6. Роль НФ-структур у літогенезі та еволюції осадових басейнів

Наскрізний по вертикалі характер НФ-структур та їх флюїдопровідна функція зумовлюють відповідну локалізацію накладених геохімічних процесів і формування виражених флюїдодинамічних парагенезів (Лукин, 1989, 2004; Machel, 1999; Davies, Smith, 2006; Smith, Davies, 2009; Тимурзиев, 2009; Беленицкая, 2011). У роботі (Лукин, 2004) підкреслюється провідна роль різнорівневих глибинних флюїдів, термодинамічні властивості яких визначають потенціал для вторинних процесів у межах кризь-формаційних систем — труб дегазації. *«Саме вони зумовлюють різноманітні накладені гідрогенні перетворення та новоутворення, з якими пов'язані основні діагностичні геолого-геофізичні ознаки цих систем»* (Лукин, 2004, с. 37) (пер. наш. — О.К.). Іншим важливим фактором, що впливає на роль НФ-структур у літогенезі, є здатність геодинамічних напруг «стягуватися на найбільш динамічну масу» (Поспелов, 1963), що сприяє інтенсивним різноманітним процесам метасоматозу. *«Інтенсивній метасоматичній переробці порід з мобілізацією та перерозподілом різноманітних дисперсних компонентів сприяють процеси тектоно-сейсмічної активізації, які в силу зазначених особливостей геодинамічного режиму повинні виявлятися саме в межах КФ-систем та труб дегазації»* (Лукин, 2004, с. 43) (пер. наш. — О.К.).

Останніми десятиліттями стосовно флюїдогенних перетворень, локалізованих за НФ-структурами, спостерігається широке використання ряду споріднених термінів-концепцій: *гіпогенний алогенез* (накладені зміни, зумовлені гіпогенними факторами) (Лукин, 2004, 2014); *накладений літогенез* (зміни осадових порід, які зумовлені міграцією не за їх напластуванням) (Леонов, Волож, 2004; Япаскурт, 2005); *наскрізні обстановки діагенезу* (Machel, 1999); *флюїдний літогенез* (Беленицкая, 2011; Лукин, 2014).

Накладений літогенез, пов'язаний з НФ-структурами, зазвичай є локальним, тобто реалізується на відміну від фонового літогенезу у межах невеликих ділянок, прилеглих до структур. Разом з тим він може поширюватися по латералі і на значні відстані від НФ-структур

по стратиформних інтервалах високої проникності. Основними процесами є розчинення, осадження (цементация) та метасоматоз. Прояви накладеного літогенезу різноманітні і включають різні метасоматити, зони «фантомізації» (облямівки «примарних» порід) (Quinif, Bruxelles, 2011; Dubois et al., 2014), різноманітну гідротермальну мінералізацію та рудні тіла, доломітизацію (Davies, Smith, 2006; Smith, Davies, 2009). Накладений літогенез, пов'язаний із НФ-структурами, посилює неоднорідності, що формуються в осадових басейнах механізмами самоорганізації (Ortoleva, 1994). У регіонах, які знаходяться в режимі розтягування, а також охоплених гідротермальними системами, накладений літогенез, пов'язаний із глибинною дегазацією Землі та дренажною системою НФ-структур, дуже впливає на еволюцію осадових басейнів (Лукин, 2018).

7. Висновки

Головними глобальними факторами формування флюїдогеологічних аномалій є дегазація Землі та взаємодія флюїдних систем різного походження, які переважно забезпечуються наскрізними флюїдопровідними структурами різної природи, розміру та будови, що утворюють дренажну систему верхньої кори.

НФ-структури мають практично повсюдне поширення і є інтегральною частиною дренажної системи верхньої кори, хоча інтенсивність їх розповсюдження та вплив на флюїдообмін широко варіюють та різко зростають у певних геологічних та геодинамічних обставках. У локальному та субрегіональному масштабах НФ-структури та пов'язані з ними явища демонструють нерівномірне по площі, кластерне поширення.

Ключова роль НФ-структур у флюїдообміні, включно з міграцією вуглеводнів і забруднювачів, визначається їх перетинаючим і наскрізним характером по відношенню до шаруватих неоднорідностей, у тому числі до ізолюючих інтервалів, та зазвичай набагато вищою проникністю у порівнянні з вмщуючими породами. Наскрізний по вертикалі характер НФ-структур та локалізований вздовж них вертикальний флюїдообмін через латеральні літологічні та гідродинамічні межі супроводжується

взаємодiєю каналових флюїдiв з вiмщуючими породами та пластовими водами, викликає формування термальних i геохімічних аномалій, порушення рiвноважного стану системи «вода—порода» i рiзнi перетворення самих наскрiзних каналiв та порiд, що їх вiмщують. Цим визначається провiдна роль НФ-структур у накладеному лiтогенезi та руднiй мiнералiзацiї. Бiльшiсть локалiзованих накладених змiн гiрськопорiдних масивiв та проявiв рiзноамiтної мiнералiзацiї, включно з родовищами, утворенi пiд дiєю сфокусованої мiграцiї флюїдiв, тобто є геологічними проявами аномальних гiдрогеологічних процесiв.

Флюїдопровiдна здатнiсть НФ-структур залежить вiд походження, а також вiд стадiйностi їх формування та вторинних змiн, а тому мiнлива у часi. У зв'язку з цим порiвняння такої здатностi мiж морфогенетичними видами НФ-структур є загалом утрудненим, хоча найбiльш ефективними у цьому вiдношеннi є структури карстового походження. Для НФ-структур флюїдодинамiчного типу найбiльшi проникнiсть та iнтенсивнiсть флюїдних пото-

кiв по каналах характернi для перiодiв їх формування та безпосередньо пiсля них, а також у перiоди активiзацiї, що зазвичай пов'язанi з тектонiчними подiями.

Дослiдження виконано в рамках держбюджетної теми Інституту геологічних НАН України «Аномальні зони та процеси в гiдрогеологічних структурах» (2018—2021 рр., ДР № 0117U004155) за цiльовою програмою наукових дослiджень Вiддiлення наук про Землю НАН України «Розвиток геологічних, геофізичних наук, технологiй i нарощування ресурсiв корисних копалин в Україні та вивчення, прогнозування i мiнiмiзацiя надзвичайних ситуацiй» та теми прiоритетних наукових дослiджень i науково-технічних (експериментальних) розробок Вiддiлення наук про Землю НАН України «Геологічні дослiдження для пом'якшення та адаптацiї до змiни клiмату в Україні (2022—2023 рр.).

Автор висловлює вдячнiсть академіку НАН України В.М. Шестопалову за важливі поради при пiдготовцi рукопису та доктору геологічних наук О.Л. Шевченку за конструктивні зауваження, якi допомогли вдосконалити виклад матерiалу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Беленицкая Г.А. «Флюидное» направление литологии: состояние, объекты, задачи. *Ученые зап. Казан. ун-та.* 2011. № 153(4). С. 97—113.
- Геологический словарь.* В 2-х т. Под ред. К.Н. Паффенгольца и др. Москва: Недра, 1973.
- Геологический словарь.* В 3-х т. Изд. 3-е, перераб. и доп. Под ред. О.В. Петрова. Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010-2012.
- Климчук О.Б. Розвиток теорії гіпогенного карстогенезу: наукові та практичні застосування. *Вісн. НАН України.* 2017. № 11. С. 1—19. <http://doi.org/10.15407/visn2017.11.009>
- Климчук А.Б., Тимохина Е.И., Амеличев Г.Н., Дублянский Ю.В., Шпетль К. Гипогенный карст Предгорного Крыма и его геоморфологическая роль. Симферополь: ДИАИПИ, 2013.
- Кропоткин П.Н. Дегазация Земли и генезис углеводородов. *Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева.* 1986. № 5. С. 540—547.
- Леонов Ю.Г., Волож Ю.А. (ред.). Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция. Москва: Науч. мир, 2004.
- Лукин А.Е. Литогеодинамические факторы нефтегазонакопления в авлакогенных бассейнах; автореф. дис ... д-ра геол.-мин. наук. Киев, 1989. 42 с.
- Лукин А.Е. О сквозьформационных флюидопроводящих системах в нефтегазоносных бассейнах. *Геол. журн.* 2004. № 3 (309). С. 35—45.
- Лукин А.Е. Флюидный литогенез — важнейшее направление литологических исследований в XXI ст. *Геол. журн.* 2014. № 4 (349). С. 27—42.
- Лукин А.Е. Конседиментационные процессы глубинной дегазации Земли и их роль в формировании бассейнов породообразования. *Очерки дегазации Земли: Шестопалов В.М. (ред.). Киев, 2018. С. 124—186.*
- Махлаев Л.В., Голубева И.И. Флюидизаты требуют внимания. *Природа.* 2001. № 9. С. 59—68.
- Мамедов П.З., Гулиев И.С. Субвертикальные геологические тела в осадочном чехле Южно-Каспийской впадины. *Изв. АН Азербайджана. Науки о Земле.* 2003. № 3. С. 139—146.
- Поспелов Г.Л. Строение и развитие фильтрующихся гидротермальных рудообразующих систем. *Геология и геофизика.* 1962. Ч. 1, № 11. С. 28—40; Ч. 2, № 12. С. 40—57.
- Поспелов Г.Л. Геологические предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников. *Геология и геофизика.* 1963. № 3. С. 18—38.
- Хаин В.Е. Общая геотектоника. Москва: Недра, 1973.

- Шестопалов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславский А.С. Очерки дегазации Земли. Киев, 2018.
- Янаскурт О.В. Аспекты теории постседиментационного литогенеза. *Литосфера*. 2005. № 3. С. 3—30.
- Andresen K.J. Fluid flow features in hydrocarbon plumbing systems: What do they tell us about the basin evolution? *Marine Geology*, 2012, 332-33: 89-108.
- Audra Ph. Explorations 2013-2014 en Algérie Tébessa et massif de l'Azrou. *Spelunca*, 137: P. 39-44.
- Braccini E., de Boer W., Hurst A., Huuse M., Vigorito M., Templeton G. 2008. Sand injectites. *Schlumberger Oilfield Review*, 2015, 20 (2): 34-49.
- Broughton P.L. Salt dissolution tectonism and spatiotemporal aspects of juxtaposed sinkholes and pseudo-sinkholes of the Foreland Alberta Basin, Canada. U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings. 2021: 86-96.
- Cartwright J., Huuse M., Aplin A. Seal bypass systems. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 2007, 91: 1141-1166. <http://doi.org/10.1306/04090705181>
- Cartwright J.A., Santamarina C. Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins: Implications for pipe genesis. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 65: 126-140. <http://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.03.023>
- Cathles L.M., Su Z., Chen, D. The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27 (1): 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.09.010>
- Chan M., Netoff D., Blakey R., Kocurek G., Alvarez W. Clastic-injection pipes and syndepositional deformation structures in Jurassic eolian deposits: Examples from the Colorado Plateau. In: A. Hurst and J. Cartwright (Eds.), Sand injectites: Implications for hydrocarbon exploration and production. AAPG Memoir 87. 2007: 233-244
- Cooke M.L., Simo J.A., Underwood C.A., Rijken P. Mechanical stratigraphic controls on fracture patterns within carbonates and implications for groundwater flow. *Sedimentary Geology*, 2006., 184 (3-4): 225-239. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.11.004>
- Corbett K., Friedman M., Spang J. Fracture development and mechanical stratigraphy of Austin Chalk, Texas. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1987, 71: 17-28.
- Craddock J.P., Nuriel P., Kylander-Clark A.R.C., Hacker B.R., Luczaj J., Weinberger R. Long-term (7 Ma) strain fluctuations within the Dead Sea transform system from high-resolution U-Pb dating of a calcite vein. *GSA Bulletin*, 2021. <https://doi.org/10.1130/B36000.1>
- Davies G.R., Smith Jr.L.B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview. *AAPG Bulletin*, 2006, 90 (11): 1641-1690.
- De Boever E., Swennen R., Dimitrov L. Lower Eocene carbonate cemented chimneys (Varna, NE Bulgaria): Formation mechanisms and the (a)biological mediation of chimney growth. *Sedimentary Geology*, 2006, 185: 159-173.
- Dentzer J., Bruel D., Delescluse M., Chamot-Rooke N., Beccaletto L., Lopez S., Courrioux G., Violette S. Thermal and seismic hints for chimney type cross-stratal fluid flow in onshore basins. *Scientific Reports*, 2018, 8: 15330. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33581-x>
- Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Spötl C., Tymokhina E., Amelichev G. Isotope wallrock alteration associated with hypogene karst of the Crimean Piedmont, Ukraine. *Chemical Geology*, 2014, 377: 31-44. <http://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2014.04.003>
- Dubois C., Quinif Y., Baele J.M., Barriquand L., Bini A., Bruxelles L., Maire R. The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems. *Earth-Science Review*, 2014, 131: 116-148.
- Ferill D.A., Morris A.P., McGinnis R.N., Smart K.J., Wigginton S.S., Hill N.J. Mechanical stratigraphy and normal faulting. *Journal of Structural Geology*, 2017, 94: 275-302. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2016.11.010>
- Frumkin A., Gvirtzman H. Cross-formational rising groundwater at an artesian karstic basin: the Ayalon Saline Anomaly, Israel. *J. Hydrol.*, 2006, 318: 316-333.
- Goldscheider N., Mádl-Szönyi J., Eröss A., Schill E. Review: Thermal water resources in carbonate rock aquifers. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18: 1303-1318.
- Gross M.R., Gutierrez-Alonso T., Bai M.A., Wacker K.B., Collingsworth Behl R.J. Influence of mechanical stratigraphy and kinematics on fault scaling relations: *Journal of Structural Geology*, 1997, 19: 171-183.
- Gross M.R., Eyal Y. Throughgoing fractures in layered carbonate rocks. *GSA Bulletin*, 2007, 119 (11/12): 1387-1404. <http://doi.org/10.1130/B26049.1>
- Homuth S., Gotz A.E., Sass I. Outcrop analogue studies for reservoir characterization of deep geothermal systems in Upper Jurassic limestone formations (South Germany). *Geophysical Research Abstracts*, 2011, 13: 1-23.
- Huntoon P.W. Large-basin groundwater circulation and paleo-reconstructions of circulation leading to uranium mineralization in Grand Canyon breccias pipes, Arizona. *The Mountain Geologist*, 1996, 33 (3). 71-84.
- Hurst A., Cartwright, J. (Eds.). Sand Injectites: Implications for Hydrocarbon Exploration and Production. *AAPG Mem.*, 2007, 87. AAPG, Tulsa.
- Hurst A., Cartwright J.A., Duranti D. Fluidization structures produced by upward injection of sand through a sealing lithology. In: Van Rensbergen P., Hillis R.R., Maltman A.J., Morley C.K. (Eds.), Subsurface sediment mobilization. *Geological Society (London). Special Publication*, 2003a, 216: 123-137.
- Hurst A., Cartwright J., Huuse M., Jonk R., Schwab A., Duranti D., Cronin B. Significance of large-scale sand injectites as long-term fluid conduits: Evidence from seismic data: *Geofluids*, 2003b, 3 (4): 263-274.

- Huuse M., Jackson C.A.-L., Van Rensbergen P., Davies R.J., Flemings P.B., Dixon R.J. Subsurface sediment remobilization and fluid flow in sedimentary basins: an overview. *Basin Research*, 2010, 22: 342-360. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2010.00488.x>
- Huuse M., Shoulders S.J., Netoff D.I., Cartwright J. Giant sandstone pipes record basin-scale liquefaction of buried dune sands in the Middle Jurassic of SE Utah. *Terra Nova*, 2005, 17: 80-85. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2004.00587.x>
- Ingebritsen S.E., Appold M.S. The physical hydrogeology of ore deposits. *Economic Geology*, 2012, 107: 559-584.
- Ingebritsen S.E., Sanford W.E. 2006. Groundwater in geologic processes. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jamveit B., Svensen H., Podladchikov Y.Y., Planke S. Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins. In: Breiterkreuz C., Petford N. (Eds.), Physical Geology of High-Level Magmatic Systems. *Geological Society of London, Special Publication*, 2004, 234: 233-241. <http://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.234.01.15>
- Karstens J., Müller Ph., Berndt C., Patruno S. Deep-seated focused fluid migration as indicator for hydrocarbon leads in the East Shetland Platform, North Sea Province. *Geological Society of London. Special Publications*. 2019, 494. <https://doi.org/10.1144/SP494-2019-26>
- Klimchouk A.B. Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. National Cave and Karst Research Institute, Special Paper No. 1, Carlsbad, New Mexico, 2007.
- Klimchouk A. Types and settings of hypogene karst. In: Klimchouk A., Palmer A., De Waele J., Auler A., Audra P. (Eds.), Hypogene Karst Regions and Caves of the World. Springer International Publishing AG, Cham, 2017a, pp. 1-39.
- Klimchouk A.B. Tafoni and honeycomb structures as indicators of ascending fluid flow and hypogene karstification. In: Parise M., Gabrovsek F., Kaufmann G., Ravbar N. (Eds.), Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications. *Geological Society of London., Special Publication*., 2017b, 466: 79-105. <https://doi.org/10.1144/SP466.11>
- Klimchouk A.B., Amelichev G.N., Chervyatsova O.Y., Tokarev S.V., Kiseleva D.V., Potapov S.S. Ferruginous accumulations in hypogene karst conduits of Crimean Piedmont: Evidence for a deep iron source for the Kerch-Taman iron-ore province, North Black Sea region. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 127: 104954. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.104954>
- Klimchouk A., Andrejchuk V. Breakdown development in cover beds, and landscape features induced by intrastratal gypsum karst. In: Klimchouk A.B., Lowe D.J., Cooper A.H., Sauro U. (Eds.), Gypsum karst of the World. *International Journal of Speleology*, Theme issue. 1996, 25 (3-4): 127-144.
- Laubach S.E., Olson J.E., Gross M.R. Mechanical and fracture stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 2009, 93 (11): 1413-1426. <http://doi.org/10.1306/07270909094>
- Liu X., Flemings P.B. Passing gas through the hydrate stability zone at Hydrate Ridge, offshore Oregon. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, 241: 211-226.
- Løseth H., Gading M., Wensaas L. Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 304-1319.
- Løseth H., Wensaas L., Arntsen B., Hanken N.-M., Basire C., Graue K. 1000 m long gas blow out pipes. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28: 047-1060.
- Lowe D.R. Water escape in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, 1975, 2: 57-204.
- Machel H.G. Effects of groundwater flow on mineral diagenesis, with emphasis on carbonate aquifers. *Hydrogeology Journal*, 1999, 7: 4-107.
- Moss J.L., Cartwright J. 2010. 3D seismic expression of km-scale fluid escape pipes from offshore Namibia. *Basin Res.* Vol. 22. P. 481-502.
- Ortoleva P. 1994. Geochemical self-organization. New York: Oxford University Press.
- Owen G. 1987. Deformation processes in unconsolidated sands. *Geological Society of London. Special Publication*. Vol. 29. P. 11-24. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1987.029.01.02>
- Quinif Y., Bruxelles L. 2011. L'altération de type 'fantôme de roche': processus, évolution et implications pour la karstification. *Géomorphologie*. Vol. 4. P. 349-358.
- Reynolds D.L. Fluidization as a geological process and its bearing on the problem of intrusive granites. *Am. J. of Science*, 1954, 252 (10): 577-614. <https://doi.org/10.2475/ajs.252.10.577>
- Ross J.A., Peakall J., Keevil G.M. Facies and flow regimes of sandstone-hosted columnar intrusions: Insights from the pipes of Kodachrome Basin State Park. *Sedimentology*, 2014, 61 (6): 1764-1792. <http://doi.org/10.1111/sed.12115>
- Smith Jr.L.B., Davies G.R. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: Introduction. *AAPG Bulletin*, 2006, 90 (11): 1635-1640.
- Spötl C., Dublyansky Y., Koltai G., Honiat C., Plan L., Angerer T. Stable isotope imprint of hypogene speleogenesis: Lessons from Austrian caves. *Chemical Geology*, 2021, 572: 120209. <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120209>
- Sun Q., Cartwright J., Wu S., Chen D. 3D seismic interpretation of dissolution pipes in the South China Sea: Genesis by subsurface, fluid induced collapse. *Marine Geology*, 2013, 337: 171-181. <http://doi.org/10.1016/J.MARGEO.2013.03.002>
- Wendt K.A., Pythoud M., Moseley G.E., Dublyansky Y.V., Edwards R.L., Spötl C. Paleohydrology of southwest Nevada (USA) based on groundwater 234U/238U over the past 475 k.y. *GSA Bulletin*, 2019, 132 (3-4): 793-802. <https://doi.org/10.1130/B35168.1>

- Wenrich K.J., Sutphin H.B. Recognition of breccias pipes in Northern Arizona. *Fieldnotes*, 1988, 18 (1): 1-5.
- Wheatley D.F., Chan M.A., Sprinkel D.A. Clastic pipe characteristics and distributions throughout the Colorado Plateau: Implications for paleoenvironment and paleoseismic controls. *Sedimentary Geology*, 2016, 344: 20-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.03.027>
- Whittaker B.N., Reddish D.J. Subsidence: Occurrence, Prediction and Control. Elsevier Science Publishing Company Inc., New York, 1989.
- Worthington S.R.H., Ford D.C., Beddows P. Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution. In: Klimchouk A., Ford D., Palmer A., Dreybrodt W. (Eds.), *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000, pp. 423-432.
- Yang J., Large R.R., Bull S.W. Factors controlling free thermal convection in faults in sedimentary basins: implications for the formation of zinc-lead mineral deposits. *Geofluids*, 2004, 4: 237-247. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2004.00084.x>

Надійшла до редакції 31.01.2022

Надійшла у ревізованій формі 12.02.2022

Прийнята 14.02.2022

REFERENCES

- Andresen K.J. 2012. Fluid flow features in hydrocarbon plumbing systems: What do they tell us about the basin evolution? *Marine Geology*, 332-334: 89-108.
- Audra Ph. 2015. Explorations 2013-2014 en Algérie Tébessa et massif de l'Azrou. *Spelunca*, 137: 39-44.
- Belenitskaya G.A. 2011. "Fluid" branch of lithology: state of the art, objects, and challenges. *Uchenyye Zapiski Kazanskogo Universiteta*, 153 (4): 97-113 (in Russian).
- Braccini E., De Boer W., Hurst A., Huuse M., Vigorito M., Templeton G. 2008. Sand injectites. *Schlumberger Oilfield Review*, 20 (2): 34-49.
- Broughton P.L. 2021. Salt dissolution tectonism and spatiotemporal aspects of juxtaposed sinkholes and pseudo-sinkholes of the Foreland Alberta Basin, Canada. U. S. *Geological Survey Karst Interest Group Proceedings*: 86-96.
- Cartwright J.A., Santamarina C. 2015. Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins: Implications for pipe genesis. *Marine and Petroleum Geology*, 65: 12-140. <http://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.03.023>
- Cartwright J., Huuse M., Aplin A. 2007. Seal bypass systems. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 91: 1141-1166. <http://doi.org/10.1306/04090705181>
- Cathles L.M., Su Z., Chen, D. 2010. The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration. *Marine and Petroleum Geology*, 27 (1): 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.09.010>
- Chan M., Netoff D., Blakey R., Kocurek G., Alvarez W. 2007. Clastic-injection pipes and syndepositional deformation structures in Jurassic eolian deposits: Examples from the Colorado Plateau. In: A. Hurst and J. Cartwright (Eds.), *Sand injectites: Implications for hydrocarbon exploration and production*. AAPG Memoir 87: 233-244.
- Cooke M.L., Simo J.A., Underwood C.A., Rijken P. 2006. Mechanical stratigraphic controls on fracture patterns within carbonates and implications for groundwater flow. *Sedimentary Geology*, 184 (3-4): 225-239. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.11.004>
- Corbett K., Friedman M., Spang J. 1987. Fracture development and mechanical stratigraphy of Austin Chalk, Texas. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71: 17-28.
- Craddock J.P., Nuriel P., Kylander-Clark A.R.C., Hacker B.R., Luczaj J., Weinberger R. 2021. Long-term (7 Ma) strain fluctuations within the Dead Sea transform system from high-resolution U-Pb dating of a calcite vein. *GSA Bulletin*. <https://doi.org/10.1130/B36000.1>
- Davies G.R., Smith Jr.L.B. 2006. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview. *AAPG Bulletin*, 90 (11): 1641-1690.
- De Boever E., Swennen R., Dimitrov L. 2006. Lower Eocene carbonate cemented chimneys (Varna, NE Bulgaria): Formation mechanisms and the (a)biological mediation of chimney growth. *Sedimentary Geology*, 185: 159-173.
- Dentzer J., Bruel D., Delescluse M., Chamot-Rooke N., Beccalotto L., Lopez S., Courrioux G., Violette S. 2018. Thermal and seismic hints for chimney type cross-stratal fluid flow in onshore basins. *Scientific Reports*, 8: 15330. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33581-x>
- Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Spötl C., Tymokhina E., Amelichev G. 2014. Isotope wallrock alteration associated with hypogene karst of the Crimean Piedmont, Ukraine. *Chemical Geology*, 377: 31-44. <http://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2014.04.003>
- Dubois C., Quinif Y., Baele J.M., Barriquand L., Bini A., Bruxelles L., Maire R. 2014. The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems. *Earth-Science Reviews*, 131: 116-148.
- Ferill D.A., Morris A.P., McGinnis R.N., Smart K.J., Wigginton S.S., Hill N.J. 2017. Mechanical stratigraphy and normal faulting. *Journal of Structural Geology*, 94: 275-302. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2016.11.010>
- Frumkin A., Gvirtzman H. 2006. Cross-formational rising groundwater at an artesian karstic basin: the Ayalon Saline Anomaly, Israel. *J. Hydrol*, 318: 316-333.

- Geological Glossary* (In 2 volumes). 1973. Paffengolts K.N. (Ed.). Moscow: Nedra (in Russian).
- Geological Glossary* (In 3 volumes). 2010-2012. Petrov O.V. (Ed.). St.-Petersburg: VSEGEI (in Russian).
- Goldscheider N., Mádl-Szőnyi J., Erőss A., Schill E. 2010. Review: Thermal water resources in carbonate rock aquifers. *Hydrogeology Journal*, 18: 1303-1318.
- Gross M. R., G. Gutierrez-Alonso T. Bai M. A. Wacker K.B. Collingsworth Behl R.J. 1997. Influence of mechanical stratigraphy and kinematics on fault scaling relations: *Journal of Structural Geology*, 19: 171-183.
- Gross M.R., Eyal Y. 2007. Throughgoing fractures in layered carbonate rocks. *GSA Bulletin*, 119 (11/12): 1387-1404. <http://doi.org/10.1130B26049.1>
- Homuth S., Gotz A.E., Sass I. 2011. Outcrop analogue studies for reservoir characterization of deep geothermal systems in Upper Jurassic limestone formations (South Germany). *Geophysical Research Abstracts*, 13: 1-23.
- Huntoon P.W. 1996. Large-basin groundwater circulation and paleo-reconstructions of circulation leading to uranium mineralization in Grand Canyon breccias pipes, Arizona. *The Mountain Geologist*, 33 (3): 71-84.
- Hurst A., Cartwright J., Huuse M., Jonk R., Schwab A., Duranti D., Cronin B. 2003a, Significance of large-scale sand injectites as long-term fluid conduits: Evidence from seismic data. *Geofluids*, 3 (4): 263-274.
- Hurst A., Cartwright J.A., Duranti D. 2003b. Fluidization structures produced by upward injection of sand through a sealing lithology. In: Van Rensbergen P., Hillis R.R., Maltman A.J., Morley C.K. (Eds.), *Subsurface sediment mobilization. Geological Society (London). Special Publication*, 216: 123-137.
- Hurst A., Cartwright, J. (Eds.) 2007. Sand Injectites: Implications for Hydrocarbon Exploration and Production. *AAPG Mem.*, 87. AAPG, Tulsa.
- Huuse M., Jackson C.A.-L., Van Rensbergen P., Davies R.J., Flemings P.B., Dixon R.J. 2010. Subsurface sediment remobilization and fluid flow in sedimentary basins: an overview. *Basin Research*, 22: 342-360. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2010.00488.x>
- Huuse M., Shoulders S.J., Netoff D.I., Cartwright J. 2005. Giant sandstone pipes record basin-scale liquefaction of buried dune sands in the Middle Jurassic of SE Utah. *Terra Nova*, 17: 80-85. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2004.00587.x>
- Ingebritsen S.E., Sanford W.E. 2006. *Groundwater in geologic processes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ingebritsen S.E., Appold M.S. 2012. The physical hydrogeology of ore deposits. *Economic Geology*, 107: 559-584.
- Jamveit B., Svensen H., Podladchikov Y.Y., Planke S. 2004. Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins. In: Breiterkreuz C., Petford N. (Eds.), *Physical Geology of High-Level Magmatic Systems. Geological Society of London. Special Publications*, 234: 233-241, <http://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.234.01.15>
- Karstens J., Müller Ph., Berndt C., Patruno S. 2019. Deep-seated focused fluid migration as indicator for hydrocarbon leads in the East Shetland Platform, North Sea Province. *Geological Society of London. Special Publications*, 494. <https://doi.org/10.1144/SP494-2019-26>
- Khain V.E. 1973. *General Geotectonics*. Moscow: Nedra (in Russian).
- Klimchouk A. 2017a. Types and settings of hypogene karst. In: Klimchouk A., Palmer A., De Waele J., Auler A., Audra P. (Eds.), *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. Springer International Publishing AG, Cham, pp. 1-39.
- Klimchouk A., Andrejchuk V. 1996. Breakdown development in cover beds, and landscape features induced by intrastatal gypsum karst. In: Klimchouk A.B., Lowe D.J., Cooper A.H., Sauro U. (Eds.), *Gypsum karst of the World. International Journal of Speleology*, Theme issue, 25 (3-4): 127-144.
- Klimchouk A.B. 2007. Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. National Cave and Karst Research Institute, Special Paper No. 1, Carlsbad, New Mexico.
- Klimchouk A.B. 2017a. The development of the theory of hypogene karst genesis: scientific and practical implications. *Visnyk NAN Ukrainy*, 11: 1-19. doi: 10.15407/visn2017.11.009 (in Ukrainian).
- Klimchouk A.B. 2017b. Tafoni and honeycomb structures as indicators of ascending fluid flow and hypogene karstification. In: Parise M., Gabrovsek F., Kaufmann G., Ravbar N. (Eds.), *Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications. Geological Society of London, Special Publications*, 466: 79-105. <https://doi.org/10.1144/SP466.11>
- Klimchouk A.B., Amelichev G.N., Chervyatsova O.Y., Tokarev S.V., Kiseleva D.V., Potapov S.S. 2021. Ferruginous accumulations in hypogene karst conduits of Crimean Piedmont: Evidence for a deep iron source for the Kerch-Taman iron-ore province, North Black Sea region. *Marine and Petroleum Geology*, 127: 104954. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.104954>
- Klimchouk A.B., Timokhina E.I., Amelichev G.N., Dublyansky V.N., Spoetl C. 2013. Hypogene Karst of the Crimean Piedmont and its Geomorphological Role. Simferopol: DIP (in Russian).
- Kropotkin P.N. 1986. Degassing of Earth and the origin of hydrocarbons. *Zhurnal Vsesojuznogo Khimicheskogo Obshchestva*, 31 (5): 481-587 (in Russian).
- Laubach S.E., Olson J.E., Gross M.R. 2009. Mechanical and fracture stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 93 (11): 1413-142. <http://doi.org/10.1306/07270909094>
- Leonov Y.G., Volozh Y.A. (Eds.) 2004. *Sedimentary Basins: Methods of Study, Structure and Evolution*. Moscow: Nauchny Mir (in Russian).
- Liu X., Flemings P.B. 2006. Passing gas through the hydrate stability zone at Hydrate Ridge, offshore Oregon. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 241: 211-226.

- Løseth H., Gading M., Wensaas L. 2009. Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 26: 1304-1319.
- Løseth H., Wensaas L., Arntsen B., Hanken N.-M., Basire C., Graue K. 2011. 1000 m long gas blow out pipes. *Marine and Petroleum Geology*, 28: 1047-1060.
- Lowe D.R. 1975. Water escape in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, 22: 157-204.
- Lukin A.E. 1989. Lithogeodynamic factors of oil and gas accumulation in aulacogen basins. Extended abstract of Doctor's thesis. Kyiv (in Russian).
- Lukin A.E. 2004. About cross-formational fluid-conducting systems in oil-bearing basins. *Geologičnij žurnal*, 3 (309): 35-45 (in Russian).
- Lukin A.E. 2014. Fluid-induced lithogenesis — the most important direction of lithological research in XXI century. *Geologičnij žurnal*, 4 (349): 27-42 (in Russian).
- Lukin A.E. 2018. Consedimental processes of the Earth' deep degassing and their role in the formation of rock-forming basins. In: Shestopalov V.M. (Ed.), *Essays on the Earth degassing*. Kyiv (in Russian).
- Machel H.G. 1999. Effects of groundwater flow on mineral diagenesis, with emphasis on carbonate aquifers. *Hydrogeology Journal*, 7: 94-107.
- Makhlaev L.V., Golubeva I.I. 2001. Fluidizates require attention. *Priroda (Nature)*, 9: 59-68 (in Russian).
- Mamedov P.Z., Guliev I.S. 2003. Sub-vertical geological bodies in the sedimentary cover of the South-Caspian Depression. *Izvestiya Akademii Nauk Azerbaydzhana. Nauki o Zemle*, 3: 139-146 (in Russian).
- Moss J.L., Cartwright J. 2010. 3D seismic expression of km-scale fluid escape pipes from offshore Namibia. *Basin Res*, 22: 481-502.
- Ortoleva P. 1994. *Geochemical self-organization*. New York: Oxford University Press.
- Owen G. 1987. Deformation processes in unconsolidated sands. *Geological Society of London. Special Publication*, 29: 11-24. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1987.029.01.02>
- Pospelov G.L. 1962. Structure and development of filtrating hydrothermal ore-forming systems. *Geologiya i Geofizika*, part 1, 11: 28-40; part 2, 12: 40-57 (in Russian).
- Pospelov G.L. 1963. Geological background of physics of ore-controlling fluid conductors. Геологические предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников. *Geologiya i Geofizika*, 3: 18-38 (in Russian).
- Quinif Y., Bruxelles L. 2011. L'altération de type 'fantôme de roche': processus, évolution et implications pour la karstification. *Géomorphologie*, 4: 349-358.
- Reynolds D.L. 1954. Fluidization as a geological process and its bearing on the problem of intrusive granites. *Am. J. of Science*, 252 (10): 577-614. <https://doi.org/10.2475/ajs.252.10.577>
- Ross J.A., Peakall J., Keevil G.M. 2014. Facies and flow regimes of sandstone-hosted columnar intrusions: Insights from the pipes of Kodachrome Basin State Park. *Sedimentology*, 61 (6): 1764-1792. <http://doi.org/10.1111/sed.12115>
- Shestopalov V.M., Lukin A.E., Zgonnik V.A., Makarenko A.N., Larin N.V., Boguslavskiy A.S. 2018. *Essays on the Earth degassing*. Kyiv (in Russian).
- Smith Jr.L.B., Davies G.R. 2006. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: Introduction. *AAPG Bulletin*, 90 (11): 1635-1640.
- Spötl C., Dublyansky Y., Koltai G., Honiat C., Plan L., Angerer T. 2021. Stable isotope imprint of hypogene speleogenesis: Lessons from Austrian caves. *Chemical Geology*, 572: 120209, <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120209>
- Sun Q., Cartwright J., Wu S., Chen D. 2013. 3D seismic interpretation of dissolution pipes in the South China Sea: Genesis by subsurface, fluid induced collapse. *Marine Geology*, 337: 171-181. <http://doi.org/10.1016/J.MARGEO.2013.03.002>
- Wendt K.A., Pythoud M., Moseley G.E., Dublyansky Y.V., Edwards R.L., Spötl C. 2019. Paleohydrology of southwest Nevada (USA) based on groundwater 234U/238U over the past 475 k. y. *GSA Bulletin*, 132 (3-4): 793-802. <https://doi.org/10.1130/B35168.1>
- Wenrich K.J., Sutphin H.B. 1988. Recognition of breccias pipes in Northern Arizona. *Fieldnotes*, 18 (1): 1-5.
- Wheatley D.F., Chan M.A., Sprinkel D.A. 2016. Clastic pipe characteristics and distributions throughout the Colorado Plateau: Implications for paleoenvironment and paleoseismic controls. *Sedimentary Geology*, 344: 20-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.03.027>
- Whittaker B.N., Reddish D.J. 1989. *Subsidence: Occurrence, Prediction and Control*. Elsevier Science Publishing Company Inc., New York.
- Worthington S.R.H., Ford D.C., Beddows P. Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution. In: Klimchouk A., Ford D., Palmer A., Dreybrodt W. (Eds.), *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000, pp. 423-432.
- Yang J., Large R.R., Bull S.W. 2004. Factors controlling free thermal convection in faults in sedimentary basins: implications for the formation of zinc-lead mineral deposits. *Geofluids*, 4: 237-247. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2004.00084.x>
- Yaraskurt O.V. 2005. Aspects of the theory of post-sedimentation lithogenesis. *Litosfera*, 3: 3-30 (in Russian).

Received 31.01.2022

Received in revised form 12.02.2022

Accepted 14.02.2022

O.B. Klimchouk

Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: klimchouk.2020@gmail.com

THROUGHGOING FLUID-CONDUCTING STRUCTURES: CONCEPTUALIZATION,
TERMINOLOGY, TYPES, PROPERTIES, AND THE ROLE IN FLUID CIRCULATION

In this paper the review and analysis of global data on throughgoing fluid-conducting structures is performed, the problematic issues of related concepts and terminology are considered, typification of structures by various criteria is proposed and their role in fluid circulation and in lithogenesis and evolution of sedimentary basins is accessed. Such structures are ubiquitous and are an integral part of the drainage system of the upper crust, although the intensity of their distribution and impact on fluid circulation vary widely and increase drastically in certain geological and geodynamic conditions. At the local and subregional scales, throughgoing structures and related phenomena show uneven, clustered distribution.

The key role of throughgoing structures in fluid circulation, including the migration of hydrocarbons and pollutants, is determined by their intersecting and throughgoing nature with respect to layered inhomogeneities, including sealing (low permeability) horizons, and by usually much higher permeability than that of the host rocks. The vertical nature of structures and localized vertical fluid flow across lateral lithological and hydrodynamic boundaries cause the formation of thermal and geochemical anomalies and disequilibrium of the water-rock system, accompanied by the interaction of conduit fluids with host rocks and reservoirs and by alteration of the rocks that contain them. This determines the leading role of throughgoing structures in superimposed lithogenesis and ore mineralization.

The fluid conductivity of throughgoing structures is variable over time because it depends on their origin, stages of their formation and secondary changes. In this regard, the comparison of this ability between morphogenetic varieties of throughgoing structures is generally difficult, although the most effective in this respect are structures of karstic origin. For structures of fluidodynamic type, the greatest permeability and intensity of fluid flows through the conduits are characteristic of the periods of their formation and immediately after them, as well as of the periods of activation, which are usually associated with tectonic events.

Keywords: throughgoing fluid-conducting structures; fluid exchange; typology of throughgoing structures; superimposed lithogenesis.