

<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 найбільш 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 гiрськопоронних 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

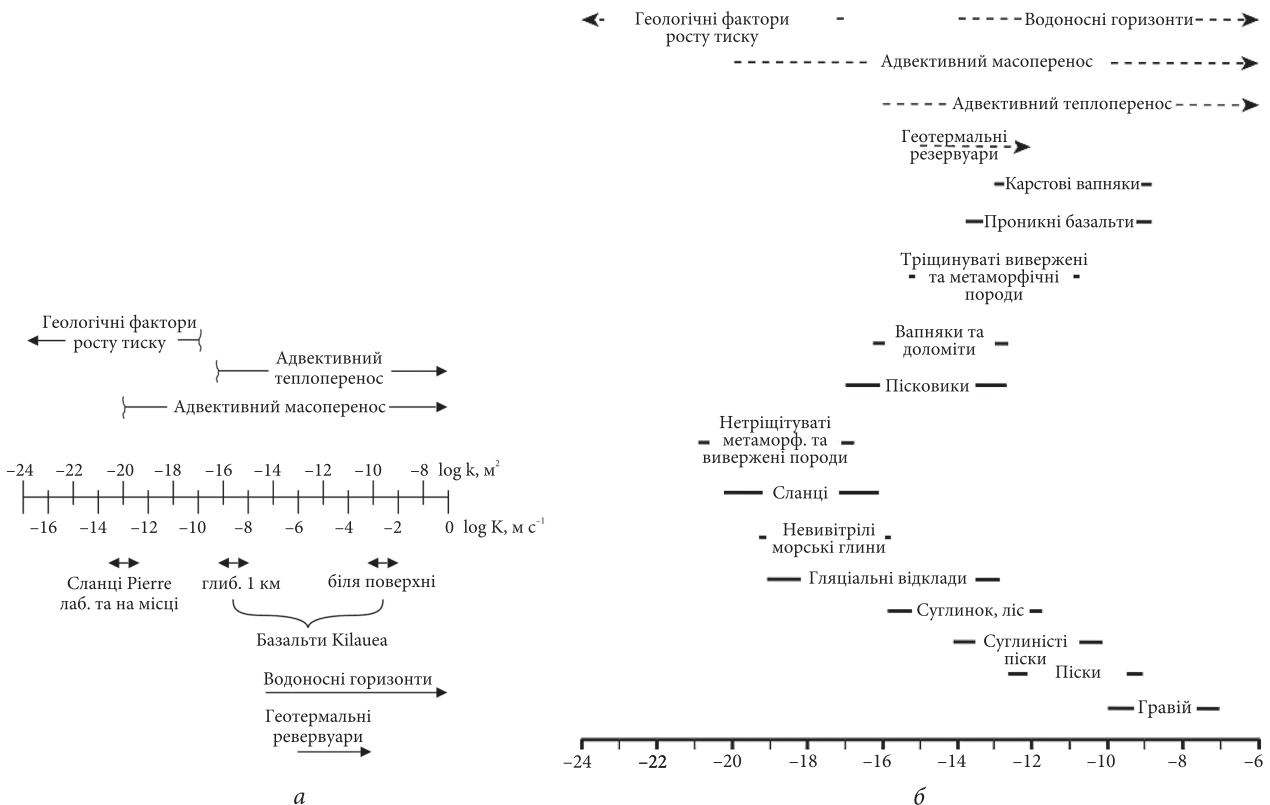


Рис. 1. Варiацiї проникностi, яка спостерiгається в рiзних геологiчних середовищах: а — за (Ingebritsen, Sanford, 2006); б — за (Ingebritsen, Appold, 2012)

Fig. 1. Variations in permeability observed in different geological environments: a — from (Ingebritsen, Sanford, 2006); б — 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; Шестопапов 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_f , 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: $F_m = K_m / (K_m + K_f + K_c)$, де F — частка стоку; K — коефіцієнти фільтрації різних середовищ, позначені індексами m (матриця), f (тріщини) і c (канали).

* Contribution to flux of particular porosity type was calculated with the following equation: $F_m = K_m / (K_m + K_f + K_c)$, where F — fraction of flux; K — permeability coefficients for various media, indicated by indexes m (matrix), f (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, магнапровідні 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 кризьчохольного 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 *кризьформацийні 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 інформації (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 виток 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 літостратиграфії 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,

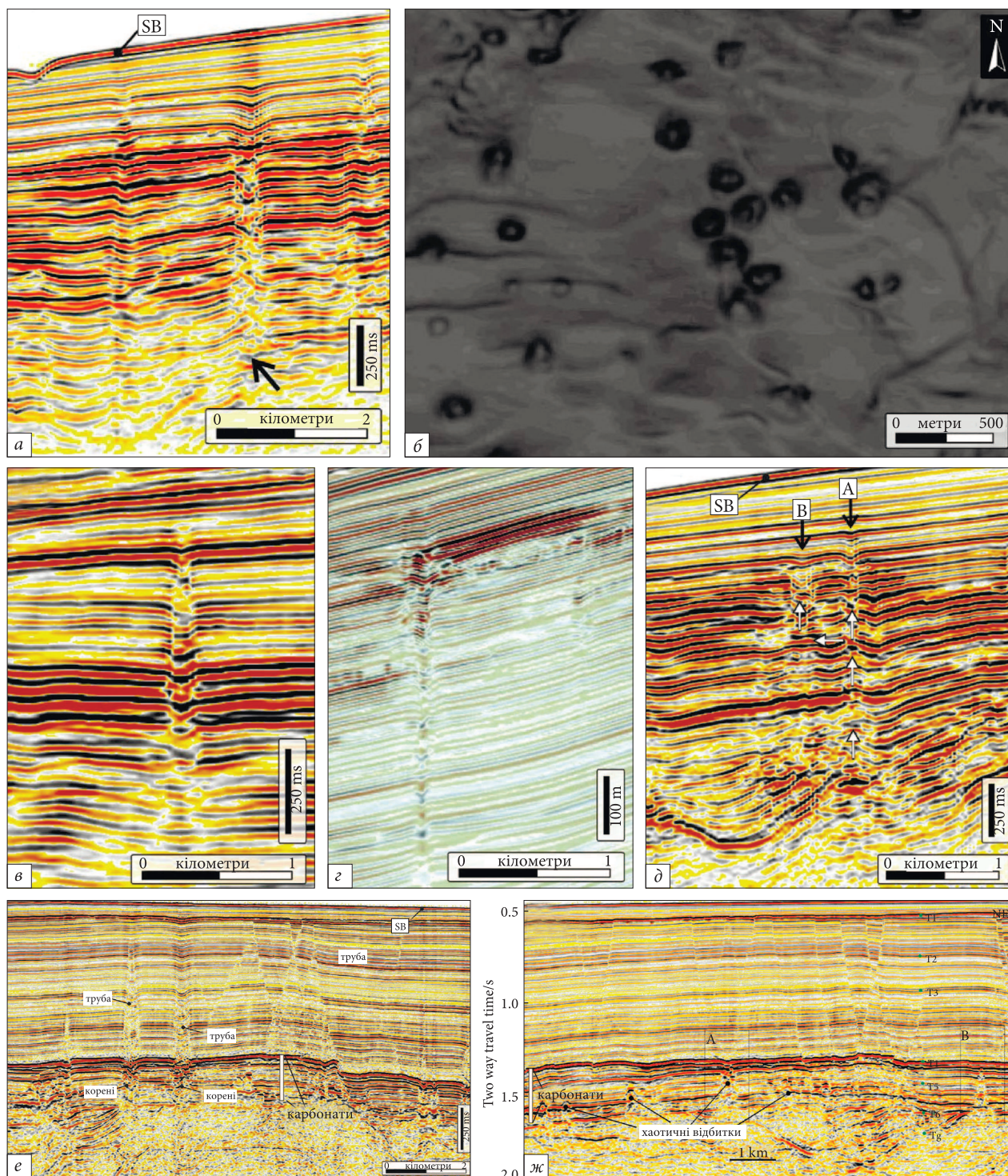


Рис. 2. Сейсмічні образи труб витоків флюїдів (*a–д* — за (Carthwright, Santamarina, 2015); *e* та *ж* — за (Sun et al., 2013): *a* — вертикальний сейсмічний профіль через серію труб на узбережжі Намібії; *b* — зріз атрибутів когерентності впоперек групи труб у цьому ж регіоні, що демонструє їх округлі форми у плані з діаметрами 100—300 м; *c* — вертикальний сейсмічний профіль через трубу біля узбережжя Намібії; *d* — вертикальний сейсмічний профіль через трубу біля узбережжя Мавританії; *e* — вертикальний сейсмічний профіль біля узбережжя Намібії, що показує біфуркацію труб по розрізу; *e* — 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 контексті 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 вміщуючими 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, виповнені цементованими брекчіями та іншими кластичними матеріалами, щілинні каньйони, рифто- та трубоподібні вертикальні канали у карстових порожнинах.

3.4. Термальні та гідрохімічні аномалії

Активні НФ-структури характеризуються специфічним складом водних флюїдів, високими витратами і показниками тепломасопереносу, чим створюють виражені термальні та гідрохімічні 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; *б* — 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; *в* — vertical seismic profile through a pipe off the coast of Namibia; *г* — a seismic profile through a pipe offshore Mauritania; *д* — vertical seismic profile offshore Namibia, showing the bifurcation of pipes; *е* — 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

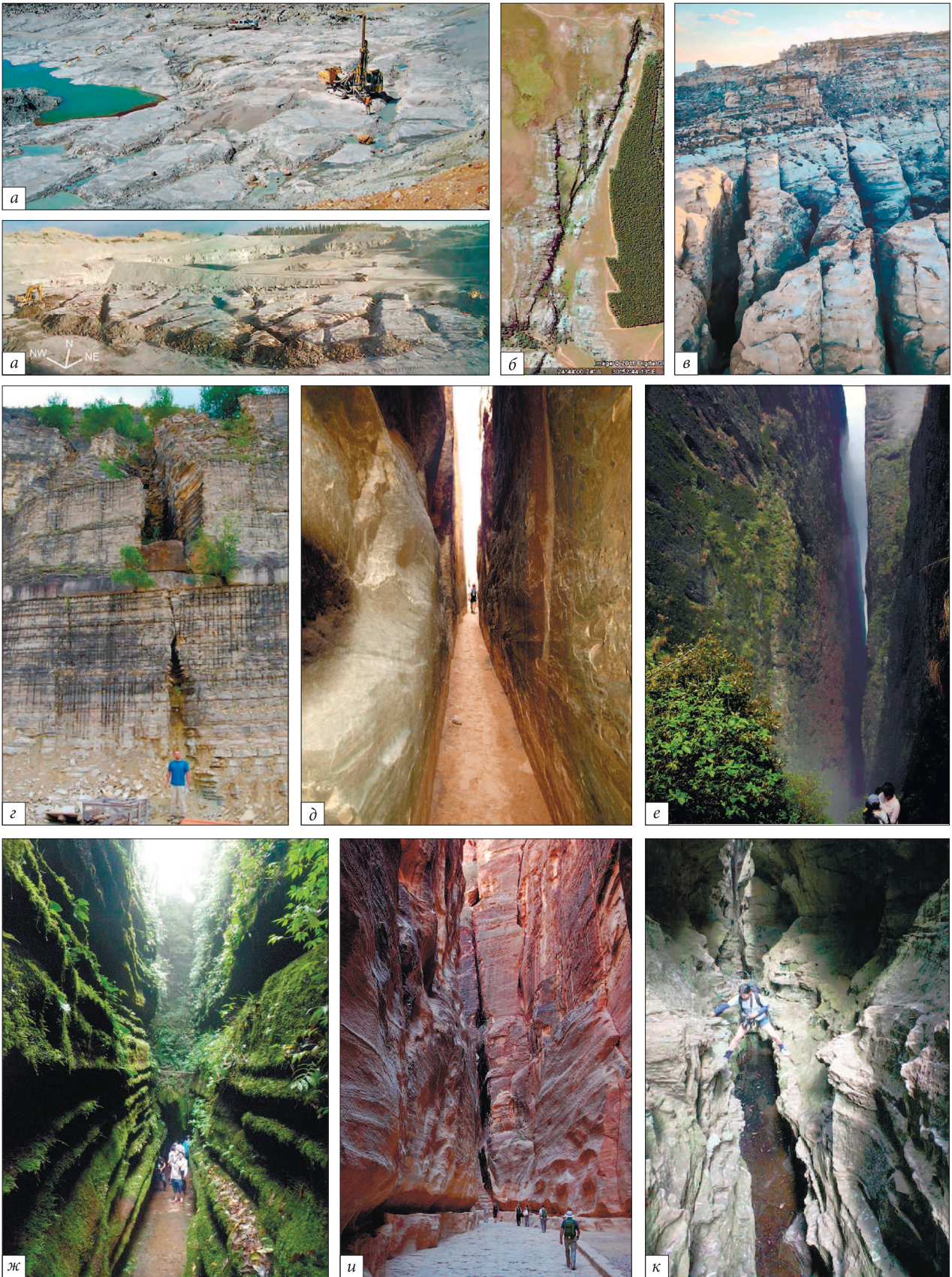
нів таких аномалій зазвичай вказує на їх зв'язок із тектонічними структурами, ідентифікованими іншими методами. Позитивні термальні аномалії в породах чохла, які можуть досягати кількох десятків °C (Yang et al., 2004; Dentzer et al., 2018), практично завжди позначають висхідний потік флюїдів від глибших резервуарів. Гідрохімічні аномалії, пов'язані з висхідними потоками по НФ-структурах, характеризуються присутністю компонентів іонного складу та газів глибинного тією 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 вверху), 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); *v* — закарстовані тріщини-рифти у пісковиках формації Entrada, Національний парк Arches, плато Колорадо, Юта, США (снaпшот з відео на YouTube: Best of Mohab, Keep Your Daydreams); *z* — рифтоподібний карстовий канал у кар'єрі верхньоюрських (Малм) вапняків, Франконський Альб, Німеччина, за (Homuth et al., 2011); *d* — щілиноподібний каньйон у пісковиках формації Navaho, Каньйонланд, Юта, США; *e* — щілиноподібний каньйон у пісковиках, гори Джангланг, провінція Чжэцзян, Китай; *ж* — каньйон по рифтоподібному каналу в ордовікських пісковиках, гори Гужанг, провінція Хунан, Китай; *и* — щілиноподібний каньйон у пізньокембрійських пісковиках району Петра, Іорданія (фото з інтернету); *к* — 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); *v* — widened fissures-rifts in Entrada sandstones, Arches National Park, Colorado Plateau, Utah, USA (snapshot from YouTube video: Best of Mohab, Keep Your Daydreams); *z* — rift-like karst conduit in the Upper Jurassic (Malm) limestone quarry, Franconian Alb, Germany (photo from (Homuth et al., 2011)); *d* — slit-like canyon in the sandstones of the Navaho Formation, Canyonland, Utah, USA; *e* — slit-like canyon in sandstones, Zhangland Mountains, Zhejiang Province, China; *ж* — canyon along the rift-like conduit in the Ordovician sandstones, Guzhang Mountains, Hunan Province, China; *и* — slit-like canyon in the Late Cambrian sandstones of the Petra district, Jordan (photo from the Internet); *к* — 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 інжекції (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 апіорі 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),