

Анатолій ГАЛАМАЙ, Ігор ЗІНЧУК, Дарія СИДОР

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна,
e-mail: galamaytolik@ukr.net

**ТЕРМОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФЛЮЇДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ
У БАДЕНСЬКОМУ ГАЛІТІ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ
В КОНТЕКСТІ ВСТАНОВЛЕННЯ ГЛИБИНИ
СОЛЕРОДНОГО БАСЕЙНУ**

Вивчення басейнів седиментації з дискусійними палеотектонічними характеристиками, до яких належить, зокрема, баденський Карпатського регіону, показало, що задля уникнення протиріч в інтерпретації умов формування солей за флюїдними включеннями в галіті на першому етапі дослідження має бути генетична ідентифікація седиментаційних структур галіту та флюїдних включень у цьому мінералі. Термометричні дослідження включень, які є наступним етапом під час такого вивчення, доцільно провадити термометричними установками з високою точністю заміру температури гомогенізації, у яких передбачена можливість синхронного спостереження груп включень у різних зонах седиментаційного галіту.

Реконструкцію глибини (потужності водної товщі) баденського басейну Карпатського регіону здійснено завдяки модернізації апаратурного устаткування термометричного методу, яку проведено з урахуванням досвіду використання мікротермокамер конструкції В. А. Калюжного, О. Й. Петриченка і В. М. Ковалевича. Зокрема, здійснено заміну матеріалу термокамери (жаростійка сталь) на мідь, що дозволило уникнути зайвих теплових градієнтів у камері та збільшити допустиму швидкість нагрівання без спотворення теплового поля завдяки більшій теплопровідності міді. З аналогічною метою скляні оптичні вікна камери замінені на лейкосапфірові, як матеріал зі значно вищою теплопровідністю і більшим полем зору. Вимірювальну систему установки виконано на мініатюрному платиновому термометрі опору з електронним блоком вимірювання. Ці вдосконалення дали змогу досягти високої стабільності системи та хорошої відтворюваності результатів вимірювань.

Встановлено, що температура мінералотворення на дні баденського солеродного басейну Карпатського регіону становила 19,5–26,0 °С, а на поверхні розсолу – 34,0–36,0 °С. На цій підставі вперше для цього солеродного басейну побудовано модель із вираженим термоклинном із загальною потужністю водної товщі близько 30 м, яка є найбільш імовірною для встановлення особливостей седиментації. Очевидно, що виявлення в низці давніх солених відкладів т. зв. «низькотемпературного» та «високотемпературного» придонного галіту пояснюється не різкими змінами клімату, а його кристалізацією на різних глибинах у солеродних басейнах.

Ключові слова: галіт, флюїдні включення, термометричний метод, термокамера, температура гомогенізації.

Вступ. Оскільки седиментаційний галіт осадових відкладів містить представницькі проби (у вигляді первинних флюїдних включень) водного середовища басейнів осадонакопичення, термометричне вивчення первинних флюїдних включень у цьому мінералі є однією із ключових складових термобарогеохімічних досліджень для встановлення умов формування та генези соленосних відкладів (Ковалевич, 1978; Петриченко, 1973; Сидор та ін., 2018; Galamay et al., 2019). Донедавна температурні показники розсолів давніх солеродних басейнів можна було оцінювати тільки досить приблизно, оскільки в переважній більшості галогенних формацій галіт містить або однофазові первинні включення, або газиво-рідкі, унаслідок перегріву галіту вище ніж 43–50 °С на якомусь із постседиментаційних етапів формування відкладів (Meng et al., 2018). Тому, як це характерно для сучасних соляних озер, температуру розсолів басейну, враховуючи добові і сезонні флуктуації, окреслювали в межах від 10 до 43 °С (Петриченко, 1988; Kovalevych et al., 2009). Завдяки новому підходу до встановлення температури кристалізації галіту за однофазовими первинними включеннями, що полягає в попередньому їхньому заморожуванні (Roberts & Spencer, 1995), галіт усе частіше привертає увагу дослідників як джерело інформації про палеоклімат (Xu et al., 2018; Zambito & Benison, 2013; Zhang et al., 2017; Zhao et al., 2022).

Метою роботи є встановлення особливостей седиментації і, зокрема, глибини баденського солеродного басейну Карпатського регіону, за даними температури гомогенізації газиво-рідких (із штучно отриманою шляхом охолодження галіту газивою фазою) флюїдних включень у галіті

Модернізація апаратурного устаткування термометричного методу. Палеотемпературні дослідження з використанням методу гомогенізації включень базуються на положенні про гомогенність захоплюваної у включення речовини за температури мінералоутворення (Калюжний, 1960). Нагріваючи препарат з первинними гетерогенними включеннями до температури їхньої гомогенізації, ми встановлюємо мінімальну температуру середовища кристалізації. Щодо газиво-рідких включень у галіті, максимальна температура гомогенізації при достатньо великій кількості визначень відповідає істинній температурі мінералотворення (Acros & Ayoga, 1997; Lowenstein et al., 1998). У зв'язку з можливістю фракціонування мінералотворного середовища перед фронтом росту кристалів галіту (Воробьев, 1988), результати гомогенізації слід вважати достовірними при одночасному дослідженні груп включень з однаковим співвідношенням фаз, що не завжди можливо при використанні установок для дослідження високотемпературних мінералів (Шанина и др., 2014). Також виникають невизначеності при інтерпретації даних через помилкову ідентифікацію включень різної генези як однотипних. Окрім того, унаслідок активної взаємодії рідкого вмісту включень та кристалу мінералу-господаря, температура гомогенізації в кожному окремому включенні може дещо відрізнятись.

В Інституті геології і геохімії горючих копалин НАН України групою дослідників на чолі з д. г.-м. н., проф. В. А. Калюжним (1960) було сконструйовано термокамеру, конструктивні особливості якої були дещо змінені задля дослідження соляних мінералів д. г.- м. н., проф. О. Й. Петриченко та д. г.-м. н., проф. В. М. Ковалевичем (1978). Створене апаратурне оформлення

термометричного методу для дослідження флюїдних включень у соляних мінералах дозволяло спостерігати за процесом гомогенізації великої кількості включень у галіті (Калюжний, 1960). Практика досліджень із використанням цієї термокамери дала змогу встановити, що точність визначення температур у діапазоні 30–250 °C становить ± 2 °C (Ковалевич, 1978).

Задля підвищення точності та відтворюваності вимірювань ми розробили нову конструкцію термокамери та всієї вимірювальної установки, використавши досвід експлуатації попередніх конструкцій низькотемпературних термокриокамер (Зінчук, 2003). Зокрема, заміна матеріалу термокамери (жаростійка сталь) на мідь дозволила уникнути зайвих теплових градієнтів у камері та значно збільшити допустиму швидкість нагрівання завдяки більшій теплопровідності міді. Замість скла оптичні вікна камери було виготовлено з лейкосапфіру, як матеріалу зі значно вищою теплопровідністю. Вимірювальну систему установки виконано на мініатюрному платиновому термометрі опору з електронним блоком вимірювання. Ці вдосконалення дали змогу досягти високої стабільності системи та хорошої відтворюваності результатів вимірювань. Варіація температурних значень при повторних вимірах не перевищує 0,1 °C. Перевірку камери на наявність температурних градієнтів здійснювали із застосуванням сірки, тіосульфату натрію (пентагідрат) та льоду. Тверді частинки сірки клали безпосередньо на предметне скло камери, що дозволяло одночасно спостерігати за плавленням багатьох зерен. Стандарти, схильні до дегідратації при нагріванні (вода, тіосульфат натрію), попередньо запаювали в мікрокапіляри, які надалі використовували як стандартні зразки багаторазового використання. На основі цього побудований графік залежності експериментальної температури плавлення речовин від їхніх стандартних температур плавлення (рис. 1).

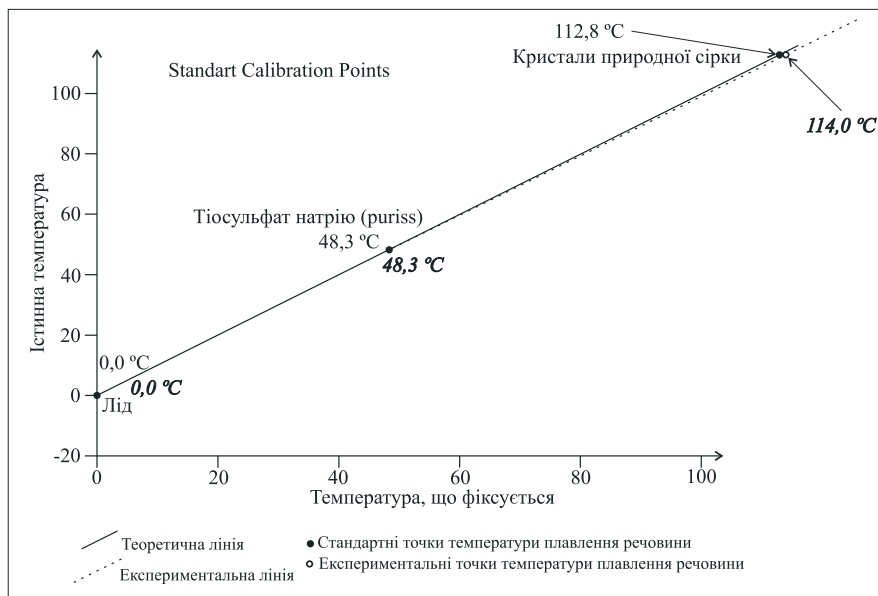


Рис. 1. Стандартні градувальні точки в діапазоні робочих температур низькотемпературної мікротермокамери

Термометричні дослідження з використанням модернізованої термометричної установки дозволяють достатньо точно встановлювати палеотемпературні обстановки мінералоутворення при можливості одночасного фіксування температури гомогенізації значної кількості флюїдних включень.

Седиментаційні структури галіту. Застосування термометричного методу при дослідженні флюїдних включень у галіті має свої особливості. Передусім важливе значення для коректної інтерпретації отриманих даних має попереднє встановлення походження флюїдних включень та типу седиментаційних структур галіту, які містять ці включення (рис. 2). Механізм виникнення певної седиментаційної структури галіту добре вивчений та описаний у багатьох публікаціях (Валяшко, 1952; Ковалевич, 1978; Петриченко, 1988; Warren, 2006), проте встановленню генези флюїдних включень та вибору певних типів седиментаційних структур для дослідження включень не завжди

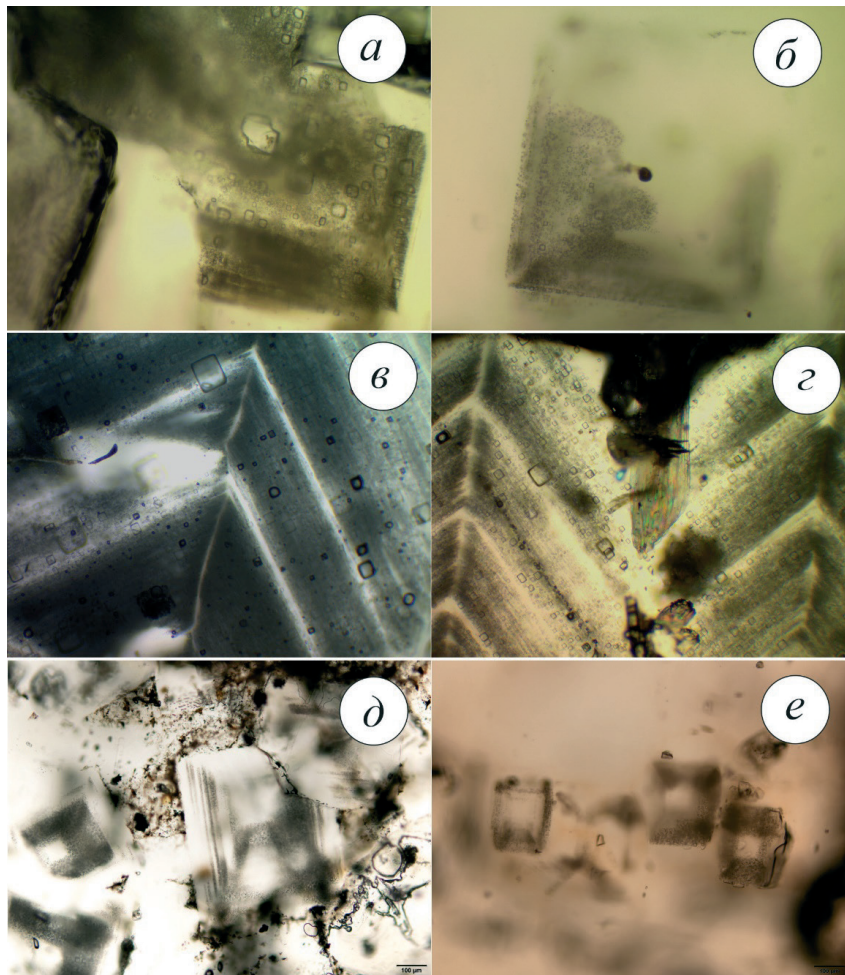


Рис. 2. Флюїдні включення в седиментаційних структурах: *a, б* – приповерхневого галіту, $\times 10$ (св. TG5, гл. 889,8 м, басейн Туз Голю, Туреччина); *в, з* – придонного галіту, $\times 5$ (св. TG7, гл. 518,6 м, басейн Туз Голю, Туреччина); *д, е* – галіту висолювання (св. 3, зр. 16, Верхньопечорський басейн, Передуралля)

приділяють достатньо уваги (Galamay et al., 2020; Meng et al., 2011). Через це, при вивченні палеоклімату за даними температури гомогенізації включень у цьому мінералі, виникають розбіжності в інтерпретації.

Важливими факторами при вивченні палеоклімату також є будова басейну, у якому кристалізується галіт, вплив на перемішування розсолів кліматичних чинників. Так, залежно від них, температурні показники кристалізації галіту на дні басейнів седиментації впродовж доби чи сезону різняться або залишаються стабільними (Benison & Goldstein, 1999; Sirota et al., 2017). Оскільки переважна більшість відомих давніх солеродних басейнів – це басейни із товщею ропи перші десятки чи сотні метрів (Петриченко, 1988), у них пряма кореляція між температурою повітря, приповерхневої ропи та температурою на різних глибинах може бути відсутня. У літературі досі немає єдиної думки щодо механізму кристалізації галіту давніх басейнів за умови стабільно однакової придонної температури.

Глибина баденських солеродних басейнів Карпатського регіону. У баденських соленосних відкладах регіону встановлені два із трьох різновидів седиментаційного галіту: придонний і приповерхневий. Галіт висолювання відсутній через невисоку, що не досягла стадії осадження калійно-магнієвих мінералів, мінералізацію розсолів басейнів седиментації (Галамай, 2001). Первинні флюїдні включення у виявлених структурах не містять ані газової фази (за винятком включень, перегрітих на постседиментаційній стадії вище ніж 43 °С), ані мінералів-в'язнів. Тому для температурних досліджень у флюїдних включеннях отримували газову фазу штучним шляхом. Оскільки концентрація розсолів у цих включеннях не висока, галіт не піддавався дії екстремально низьких температур (Галамай та ін., 2014), а охолоджувався декілька днів за температури –5...0 °С.

Виконано 435 визначень температури гомогенізації включень у галіті з віддалених одна від одної частин басейну, що характеризуються як ділянки найбільш інтенсивного прогинання під час седиментації: Величка (Польща), Гринівка, Солотвино (Україна), Збудза (Словаччина), Сленік-Прахова, Окна-Деж (Румунія) (Кореневский и др., 1977) (рис. 3). Включення вивчали в придонному (36 кристалів) і приповерхневому (2 кристали) галіті. Кристали із седиментаційними структурами придонного галіту були відібрані пропорційно по кожній з ділянок басейну.

Температура гомогенізації включень у придонному галіті не залежала від їхнього розміру. У кожному окремому кристалі гомогенізація включень відбувалася в невеликому температурному інтервалі: різниця між мінімальним і максимальним значеннями не перевищувала 9 °С. У різних кристалах межі інтервалів дещо відрізняються, тому кристали з придонними седиментаційними структурами можна об'єднати в три групи. Температура гомогенізації включень у них коливається в таких інтервалах: 13,0–20,5; 18,0–22,0; 17,5–26,0 °С (рис. 4). На відміну від придонного галіту, у приповерхневому температура гомогенізації включень дещо відрізняється і становить 20,0–36,0 °С (різниця між мінімальним і максимальним значеннями досягає 16 °С). Великі включення в седиментаційних структурах приповерхневого галіту, які чітко виокремлюються на тлі дрібних, мають нижчу температуру гомогенізації.



Рис. 3. Соляні фації баденського солеродного басейну Карпатського регіону (сірий колір), що відповідають ділянкам найбільш інтенсивного прогинання (Хрущов, 1980). Локалізація досліджених зразків: 1 – Величка; 2 – Гринівка; 3 – Сленік-Прахова; 4 – Окна-Деж; 5 – Солотвино; 6 – Збудза

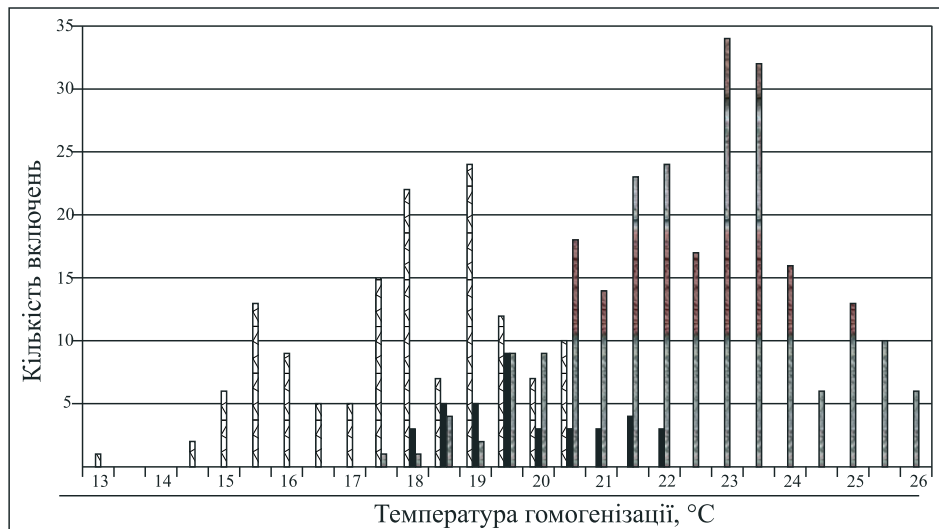


Рис. 4. Розподіл температур гомогенізації включень придонного галіту баденських солених відкладів Карпатського регіону. Сірим кольором позначено температуру в діапазоні 13,0–20,5 °С (15 кристалів); чорним – у діапазоні 18,0–22,0 °С (3 кристали); білим – у діапазоні 17,5–26,0 °С (18 кристалів)

Те, що температура гомогенізації однотипних (за фазовим складом і розміром) флюїдних включень, розташованих поруч у досліджуваних седиментаційних структурах, відрізняється, цілком відповідає закономірностям гомогенізації включень у галіті при експериментальних дослідженнях (Acros & Ayoga, 1997; Lowenstein et al., 1998). Так, у галіті, який виріс за стабільної температури, температура гомогенізації газово-рідких чи однофазових флюїдних включень (із штучно отриманою газовою фазою шляхом їхнього заморожування) відбувається в певному інтервалі, причому істинна температура мінералотворення завжди відповідає максимальному значенню температури гомогенізації. Ці експериментальні дослідження є основою у встановленні істинної температури кристалізації галіту в давніх солеродних басейнах (рис. 5).

Отже, дані, які ми отримали, свідчать про те, що температура мінералотворення на дні баденського солеродного басейну становила 19,5–20,5; 20,0–22,0; 24,0–26,0 °С (див. рис. 3), а на поверхні розсолу – 34,0–36,0 °С. Встановлені великі флюїдні включення в седиментаційних структурах приповерхневого галіту, які мають низьку температуру гомогенізації, є включеннями, що утворилися в придонному середовищі під час докристалізації скелетного приповерхневого галіту на дні басейну. Про це свідчить форма цих включень та розташування в седиментаційній структурі у водянопрозорих ділянках.

Модель відносно глибоководних баденських солеродних басейнів з вираженим термоклинном. Вивчення механізму кристалізації галіту в сучасних озерах показало, що зональну будову придонних кристалів зумовлює нерівномірне надходження речовини через зміну швидкості випаровування та температури протягом дня та ночі. Моментом швидшого зросту відповідає більша кількість включень, аніж моментам повільнішого (Петриченко, 1973), що

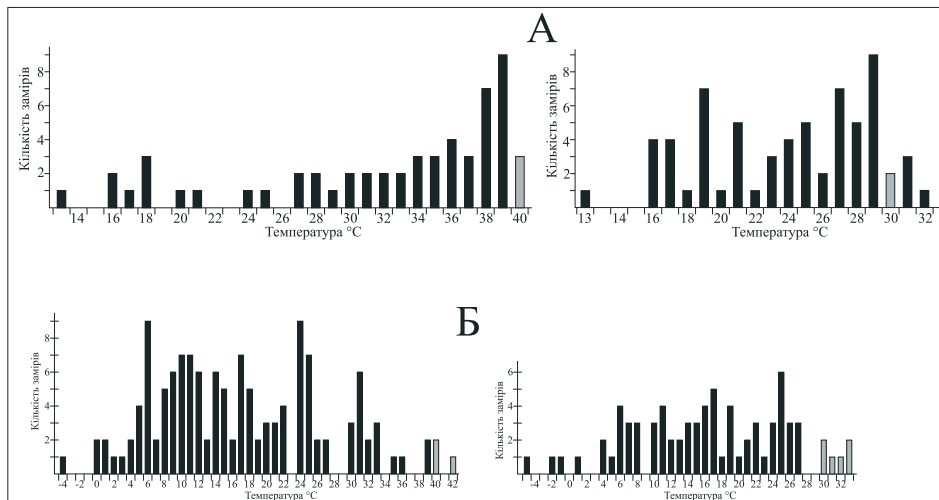


Рис. 5. Розподіл температур гомогенізації включень у галіті, що виріс за фіксованої температури в лабораторії. Сірим кольором показано істинну температуру: А – температура кристалізації становила 40,0 і 30,0 °С відповідно (Acros & Ayoga, 1997); Б – температура розсолу під час кристалізації становила 41 ± 1 та $31,5 \pm 2$ °С відповідно (Lowenstein et al., 1998)

узгоджується з даними росту галіту в давніх солеродних басейнах (Benison & Goldstein, 1999).

Сьогодні на Землі не існує морських солеродних басейнів, у яких би нагромаджувалися потужні товщі кам'яної солі. Для моделі відносно глибоководного солеродного басейну тепер найбільш раціонально використовувати дані щодо єдиного сучасного глибоководного соляного басейну – Мертвого моря (Sirota et al., 2017). Воно розташоване в поясі середземноморського клімату, де літня температура вдень підвищується до 32–45 °С, а вночі різко знижується до 20 °С та нижче. У цих умовах 25–30-метрова водна товща Мертвого моря влітку прогривається до 34–36 °С, а нижче за цю глибину існує термоклин, де температура знижується із 33 до 26 °С при поглибленні дна на 2 м (рис. 6). Узимку температура води всіх рівнів моря вирівнюється і становить приблизно 24 °С.

На відміну від баденських солеродних басейнів, Мертве море не досягло стадії відкладення товщ кам'яної солі, оскільки в літній період 20-метровий верхній шар води залишається недонасиченим по галіту (Sirota et al., 2017).

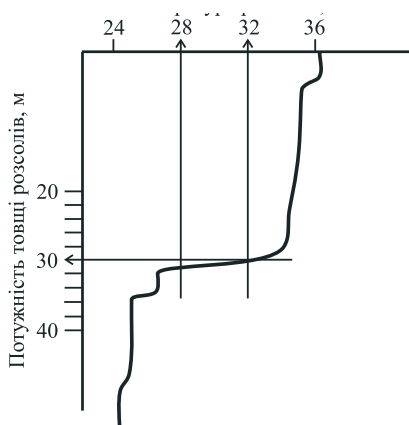


Рис. 6. Розподіл температури в товщі розсолу сучасного Мертвого моря в літні місяці (серпень, 2015 р.) (Sirota et al., 2017)

Результати проведених досліджень температури кристалізації галіту в баденських басейнах Карпатського регіону добре узгоджуються з даними розподілу температур товщі сучасного Мертвого моря. Орієнтуючись на них, потужність водної товщі баденських солеродних басейнів мала б становити приблизно 30 м (рис. 7).

Дані хімічного складу розсолів включень свідчать, що наявність у досліджуваних відкладах придонного галіту з неритмічною зональністю слід пов'язувати із ростом кристалів у поглибленнях дна басейну, у яких нагромаджувалися розсоли більшої густини (Galamay et al., 2020). Натомість ритмічна зональність у галіті виникла внаслідок надходження сконцентрованої в денний час поверхневої ропи в зону стабільних температурних показників біля дна басейну.

Кристалізацією галіту на різних глибинах у солеродних басейнах можна пояснити наявність т. зв. «низькотемпературного» та «високотемпературного» придонного галіту, який виокремлюється в давніх басейнах (Шанина и др., 2014; Benison & Goldstein, 1999; Meng et al., 2011). Так, у пермському Верхньопечорському басейні два такі температурні різновиди галіту встановлюються на різних його ділянках та різних гіпсометричних рівнях (Шанина и др., 2014). Температурний інтервал «низькотемпературного» галіту, що становить 10,0–25,0 °С, є близьким до температурного інтервалу галіту баденських басейнів (13,0–26,0 °С) представленого дослідження, що свідчить про існування в різні періоди фанерозою типових солеродних басейнів із вираженим термоклинном та подібність кліматичних умов. Існування

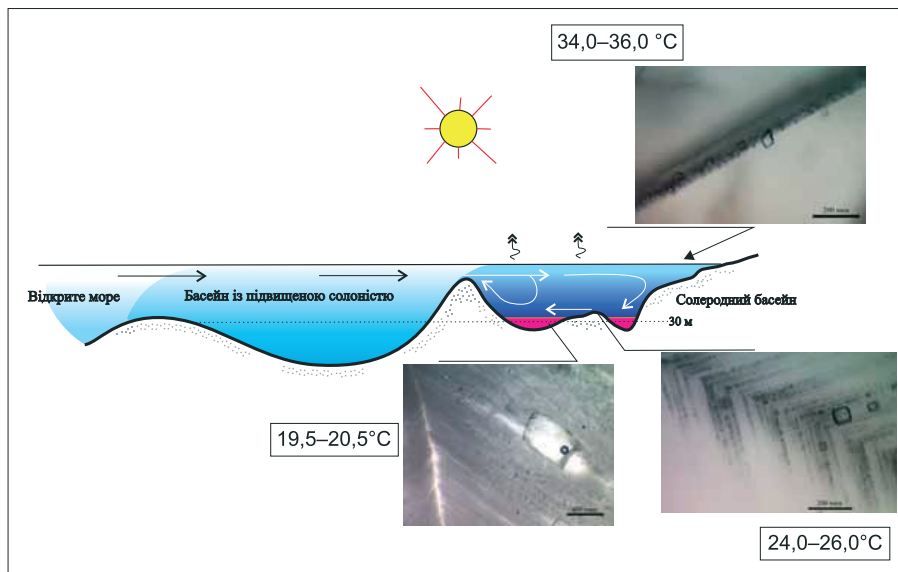


Рис. 7. Модель баденського солеродного басейну з вираженим термокліном на глибинах 25–30 м

«високотемпературного» галіту ($9,0\text{--}42,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) у Верхньопечорському басейні свідчить про кристалізацію галіту на різних глибинах. Механізм кристалізації такого «високотемпературного» придонного галіту аналогічний до механізму кристалізації галіту плитководного пермського солеродного басейну Північної Америки, у якому на кристалізацію впливали добові коливання температури, що становили $21,4\text{--}49,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Benison & Goldstein, 1999).

На нашу думку, запропонована модель солеродних басейнів із термокліном є пріоритетною для з'ясування особливостей седиментації в давніх басейнах аридного клімату, що раніше не брали до уваги, а формування «низькотемпературного» галіту пояснювали холодними кліматичними умовами.

Висновки. З метою підвищення точності та достовірності термометричних досліджень здійснено технічне удосконалення апаратурного устаткування термометричного методу дослідження флюїдних включень у галіті, який базується на використанні мікротермокамери конструкції д. г.-м. н., проф. В. А. Калюжного. Ці вдосконалення дозволили досягти високої стабільності системи та хорошої відтворюваності результатів вимірювань. Варіація температурних значень при повторних вимірах не перевищує $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Донедавна температурні показники розсолів баденського солеродного басейну Карпатського регіону можна було оцінювати досить приблизно, оскільки галіт містить лише однофазові первинні включення або газово-рідкі, унаслідок перегріву галіту вище ніж $43\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ на якомусь із постседиментаційних етапів формування відкладів. Завдяки застосуванню методичного прийому попереднього охолодження галіту, отримані конкретні числові дані температури кристалізації галіту. Проведено вивчення його седиментаційних структур та флюїдних включень у цьому мінералі, що дозволило уникнути протиріч при інтерпретації отриманих даних із різними інтервалами значень температур гомогенізації включень.

На підставі отриманих даних побудовано модель басейну із вираженим термоклинном та загальною потужністю водної товщі близько 30 м. Проведена інтерпретація пояснює причину виникнення галіту із різко відмінними інтервалами значень температури гомогенізації включень – так званого «низькотемпературного» та «високотемпературного» – у низці давніх солеродних басейнів, яка полягає, на нашу думку, не в періодичній зміні кліматичних показників, а в кристалізації галіту на різних гіпсометричних рівнях дна басейнів седиментації.

- Валяшко, М. Г. (1952). Галит, основные его разности, встречаемые в соляных озерах, и их структура. *Труды ВНИИГалургии*, 23, 25–32.
- Воробьев, Ю. К. (1988). К проблеме термометрии по первичным включениям в минералах. *Записки Всесоюзного минералогического общества*, 117(1), 125–132.
- Галамай, А. Р. (2001). *Фізико-хімічні умови формування баденських евапоритових відкладів Карпатського регіону* [Дис. канд. геол. наук]. Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України. Львів.
- Галамай, А., Сидор, Д., & Любчак, О. (2014). Особливості появи газової фази в однофазових рідких включеннях у галіті (для визначення температури його кристалізації). У *Мінералогія: сьогодні і майбуття: матеріали VIII наукових читань імені академіка Євгена Лазаренка (присвячено 150-річчю заснування кафедри мінералогії у Львівському університеті)* (с. 34–36). Львів; Чинадієве.
- Зінчук, І. М. (2003). *Геохімія мінералоутворюючих розчинів золото-поліметалевих рудопроявів Центрального Донбасу (за включеннями у мінералах)* [Дис. канд. геол. наук]. Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України. Львів.
- Калюжний, В. А. (1960). *Методи вивчення багатфазових включень у мінералах*. Київ: Видавництво АН УРСР.
- Ковалевич, В. М. (1978). *Фізико-хімічні умови формування солей Стебницького калійного местородження*. Київ: Наукова думка.
- Кореневский, С. М., Захарова, В. М., & Шамахов, В. А. (1977). *Миоценовые галогенные формации предгорий Карпат*. Ленинград: Недра.
- Петриченко, О. Й. (1973). *Методи дослідження включень у мінералах галогенних порід*. Київ: Наукова думка.
- Петриченко, О. Й. (1988). *Фізико-хімічні умови осадкоутворення в древніх солеродних басейнах*. Київ: Наукова думка.
- Сидор, Д. В., Галамай, А. Р., & Meng, F. (2018). Піроїтинова мінералізація у галогенних відкладах Верхньокамського родовища калійно-магнієвих солей (термобарогеохімічні дослідження). *Мінералогічний збірник*, 68(2), 52–61.
- Хрущов, Д. П. (1980). *Литологія і геохімія галогенних формацій Предкарпатського прогиба*. Київ: Наукова думка.
- Шанина, С. Н., Сокерина, Н. В., Галамай, А. Р., Леденцов, В. Н., & Оносов, Д. В. (2014). Определение температур гомогенизации включений в галите Якинского месторождения. *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*, 8, 3–6.
- Acros, D., & Ayora, C. (1997). The use of fluid inclusions in halite as environmental thermometer: an experimental study. In *XIV ECROFI: proceedings of the XIVth European Current Research on Fluid Inclusions (Nancy, France, July 1–4, 1997)* (pp. 10–11). CNRS-CREGU.
- Benison, K. C., & Goldstein, R. H. (1999). Permian paleoclimate data from fluid inclusions in halite. *Chemical Geology*, 154(1–4), 113–132. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00127-2)
- Galamay, A. R., Bukowski, K., Sydor, D. V., & Meng, F. (2020). The ultramicrochemical analyses (UMCA) of fluid inclusions in halite and experimental research to

- improve the accuracy of measurement. *Minerals*, 10(9), 823. <https://doi.org/10.3390/min10090823>
- Galamay, A. R., Meng, F., Bukowski, K., Lyubchak, A., Zhang, Y., & Ni, P. (2019). Calculation of salt basin depth using fluid inclusions in halite from the Ordovician Ordos Basin in China. *Geological Quarterly*, 63(3), 619–628. <https://doi.org/10.7306/gq.1490>
- Kovalevych, V., Paul, J., & Peryt, T. M. (2009). Fluid inclusions in the halite from the Röt (Lower Triassic) salt deposit in Central Germany: evidence for seawater chemistry and conditions of salt deposition and recrystallization. *Carbonates and Evaporates*, 24(1), 45–57. <https://doi.org/10.1007/BF03228056>
- Lowenstein, T. K., Li, J., & Brown, C. B. (1998). Paleotemperatures from fluid inclusions in halite: method verification and a 100,000 year paleotemperature record, Death Valley, CA. *Chemical Geology*, 150(3–4), 223–245. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00061-8)
- Meng, F., Ni, P., Schiffbauer, J. D., Yuan, X., Zhou, C., Wang, Y., & Xia, M. (2011). Ediacaran seawater temperature: Evidence from inclusions of Sinian halite. *Precambrian Research*, 184(1–4), 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.10.004>
- Meng, F., Zhang, Y., Galamay, A. R., Bukowski, K., Ni, P., Xing, E., & Ji, L. (2018). Ordovician seawater composition: evidence from fluid inclusions in halite. *Geological Quarterly*, 62(2), 344–352. <https://doi.org/10.7306/gq.1409>
- Roberts, S. M., & Spencer, R. J. (1995). Paleotemperatures preserved in fluid inclusions in halite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(19), 3929–3942. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00253-V](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00253-V)
- Sirota, I., Enzel, Y., & Lensky, N. G. (2017). Temperature seasonality control on modern halite layers in the Dead Sea: In situ observations. *GSA Bulletin*, 129(9–10), 1181–1194. <https://doi.org/10.1130/B31661.1>
- Warren, J. K. (2006). *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-32344-9>
- Xu, Y., Liu, C., Cao, Y., & Zhang, H. (2018). Quantitative temperature recovery from middle Eocene halite fluid inclusions in the easternmost Tethys realm. *International Journal of Earth Sciences*, 108, 173–182. <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1648-0>
- Zambito, J. J., & Benison, K. C. (2013). Extremely high temperatures and paleoclimate trends recorded in Permian ephemeral lake halite. *Geology*, 41(5), 587–590. <https://doi.org/10.1130/G34078.1>
- Zhang, H., Lü, F., Mischke, S., Fan, M., Zhang, F., & Liu, C. (2017). Halite fluid inclusions and the late Aptian sea surface temperatures of the Congo Basin, northern South Atlantic Ocean. *Cretaceous Research*, 71, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2016.11.008>
- Zhao, X., Zhao, Y., Wang, M., Hu, Y., Liu, C., & Zhang, H. (2022). Estimation of the ambient temperatures during the crystallization of halite in the Oligocene salt deposit in the Shulu Sag, Bohaiwan Basin, China. *Minerals*, 12(4), 410. <https://doi.org/10.3390/min12040410>

Стаття надійшла:
20.03.2023 р.

Anatoliy GALAMAY, Ihor ZINCHUK, Daria SYDOR

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals
of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine,
e-mail: galamaytolik@ukr.net

**THERMOMETRICAL STUDIES OF FLUID INCLUSIONS
IN THE BADENIAN HALITE OF THE CARPATHIAN REGION
IN THE CONTEXT OF DETERMINING THE DEPTH OF THE SALT BASIN**

It was established that in order to avoid errors in the interpretation of paleotectonic conditions of salt formation based on fluid inclusions in halite, the primary stage of the research should be the genetic identification of the sedimentation textures of halite and fluid inclusions in this mineral. For the thermometric study of inclusions and to determine the depth of the sedimentation basin based on the obtained data, only thermal test chambers are suitable which provide the possibility of observing groups of inclusions in different zones of sedimentary halite, as, for example, in the micro thermal test chamber designed by Prof. V. A. Kalyuzhny.

In the course of the research, the equipment of the thermometric method, which is based on the use of a microthermal test chamber designed by V. A. Kalyuzhny, was modernized. In particular, the material of the thermal chamber (stainless steel) was replaced with copper, which made it possible to avoid excessive thermal gradients into chamber and to increase the permissible heating rate by 20 times due to the higher thermal conductivity of copper. For the same purpose, the glass optical windows of the camera were replaced with leukosapphire windows, which have a much higher thermal conductivity. The measuring system of the installation is made on a miniature platinum resistance thermometer with an electronic measuring unit. These improvements made it possible to achieve high system stability and good reproducibility of measurement results.

Using the thermometric method, it was established that the temperature of sedimentation at the bottom of the Badenian salt basin of the Carpathian region was 19.5–20.5; 20.0–22.0; 24.0–26.0 °C, and on the surface of the brine was 34.0–36.0 °C. On this basis, a model of the basin with a pronounced thermocline and a total thickness of the water column of up to 30 meters was built, which is the most likely to establish the features of sedimentation. Crystallization of halite at different depths in basins with a thermocline can explain the presence of so-called “low-temperature” (24.0–25.0 °C) and “high-temperature” (37.8–42.6 °C) bottom halite in a number of ancient salt-bearing basins.

Keywords: halite, fluid inclusions, thermometric method, thermal chamber, homogenization temperature.