

УДК 549.6.04

АНАЛІЗ ЗОБРАЖЕНЬ ПОСТСЕДИМЕНТАЦІЙНИХ ПОРОЖНИН І ТРІЩИН У ЖОВЧНИХ КАМЕНЯХ НА РЕНТГЕНОТОПОГРАМАХ

У. Борняк, В. Дяків

*Львівський національний університет імені Івана Франка
79005 Львів, вул. Грушевського, 4*

E-mail: geomin@geof.franko.lviv.ua; dyakivw@yahoo.com

Проаналізовано результати рентгенотопографічних досліджень жовчних каменів, на підставі чого схарактеризовано порожнини і тріщини в тілі конкрементів та характер постседиментаційної біомінералізації. На рентгенотопограмах виділено вісім груп зображень постседиментаційних порожнин та тріщин. Запропоновано три механізми їхнього формування: дегідратаційний, адгезійний та ростовий.

Ключові слова: жовчні камені, рентгенівська топографія, постседиментаційна порожнина, постседиментаційна тріщина.

Детальне вивчення хімічних, фізичних, механічних і біомінералогічних властивостей жовчних каменів дає важливу інформацію для вдосконалення методів лікування жовчнокам'яної хвороби (ЖКХ). Однією з найважливіших та цікавих проблем патогенного біомінералоутворення у жовчовидільній системі є наявність порожнин і тріщин у тілі жовчних каменів (ЖК). Особливо актуальне це питання в разі застосування для руйнування ЖК методів літотрипсії (ударно-хвильового руйнування в умовах *in vivo*). В основі цього методу є використання ударних хвиль, створюваних поза організмом людини, які фокусують на камінь у жовчному міхурі [3, 8]. Під час цього процесу відбувається руйнування ЖК на фракції, що дає змогу вилучати їх фізіологічним шляхом.

Досі остаточно не визначені фактори, які впливають на ефективне руйнування ЖК цим методом. Сьогодні відомо, що всі реальні тверді тіла, якими є і ЖК, мають безліч неоднорідностей – від дефектів і слабких місць у структурі кристала до тріщин різних розмірів, що зосереджені в ділянках контакту кристалічних зерен та гілок дендритів. Руйнування такого твердого тіла починається з місць найменшого опору (неоднорідності, порожнини, мікротріщини), де й відбуваються розриви [1]. За динамічних умов літотрипсії в разі руйнування тіла з наявними в ньому тріщинами процес руйнування дуже складний. Не завжди тріщина породжує процес руйнування, що прогресує, оскільки такий результат впливає з моделі ідеального пружного суцільного середовища і не відповідає реальним фізичним властивостям конкретного твердого тіла [2]. Знаючи закони фізико-хімічної механіки і вивчаючи закономірності і механізм сумісного впливу механічних і фізико-хімічних факторів на процеси руйнування твердого тіла, яким є ЖК, можна керувати цими процесами.

Для виявлення порожнин та тріщин у тілі ЖК 236 зразків, різних за речовинним складом, морфологією та мікроструктурою, досліджували методом контактної

рентгенівської топографії. Цей метод дає змогу виявляти особливості будови моно- та полікристалічних зразків природного і штучного походження, зокрема, фіксувати локалізацію в оптично непрозорих мінералах чи матеріалах дефектів, дислокацій, порожнин, зон, шарів спіралей росту, картин муару. Рентгенівська топографія ґрунтується на дифракційних, розсіювальних та адсорбційних (поглинальних) властивостях рентгенівських променів, їхній здатності проходити крізь оптично непрозорі речовини та фіксувати на фоточутливих елементах особливості внутрішньої будови досліджуваного об'єкта. Метод рентгенівської топографії для вивчення ЖК почали застосовувати на підставі їхніх рентгенологічних властивостей, зокрема – відомого ефекту Мерседес-Бенца. У праці [7] уперше в науковій літературі визначено рентгеноадсорбційні властивості компонентів ЖК. Розроблену нами методику рентгено топографічного вивчення ЖК описано у [4, 5].

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що всю різноманітність зображень на топограмах можна розділити на кілька груп.

1. **Топограми, на яких нема будь-яких неоднорідностей**, дають інформацію про контури морфології каменя у проекції знімання, свідчать про відсутність мікро- та макродефектів, а також структурованості рентгенопоглинальних фаз у камені. Зазвичай проекція каменя прозора, біла чи ясно-сіра на загальному чорному фоні. Виявлено 15 таких каменів, що становить 6 % (рис. 1).



Рис. 1. Топограма жовчного каменя, в якому нема неоднорідностей. Чітко видно контури псевдокубічного габітусу (*a* – топограма, *б* – схематичне зображення).

2. **Топограми, на яких фіксована зовнішня облямівка, без будь-яких неоднорідностей у тілі**, окрім інформації про контури морфології каменя у проекції знімання та відсутність мікро- і макродефектів у тілі, неструктурованість рентгенопоглинальних фаз у камені, відображають потужність рентгенопоглинальної облямівки та її поведінку по контурах каменів. Виявлено 16 таких каменів, що становить 7 %. З них 11 мають перервну облямівку, а 5 – неперервну (рис. 2).

3. **Топограми, на яких фіксована зовнішня чорна (сіра) облямівка, без будь-яких неоднорідностей у тілі**, свідчать про збагаченість рентгенопоглинальними біомінералами тіла каменя. Виявлено 43 такі камені, що становить 18 %. З них 32 мають перервну облямівку, а 11 – неперервну (рис. 3).

4. **Топограми, на яких порожнини мають вигляд поліпроменевиx зірочок** (рис. 4). Такі порожнини притаманні переважно фасетковим ЖК білірубінат-холестеринового складу. Виявлено 63 такі камені, що становить 27 %.



Рис. 2. Топограма жовчного каменя з вираженою білою периферійною облямівкою. Габітус каменя псевдооктаедричний (*a* – топограма, *б* – схематичне зображення).



Рис. 3. Топограма жовчного каменя з чорною периферійною облямівкою. Чітко видно контури псевдотетраедричного габітусу (*a* – топограма, *б* – схематичне зображення).

Ці конкременти формуються в умовах численних асоціацій, що зумовлює їхні морфологічні та структурні особливості. Характерними для них є псевдограні, які зумовлюють псевдокубичний, псевдооктаедричний та псевдотетраедричний габітус поліедрів у поєднанні зі складною внутрішньою будовою. Їхні розміри коливаються від 2×2 до 25×30 мм, причому обернено залежать від кількості каменів в одній асоціації. Різноманітне зовнішнє забарвлення з багатою гамою кольорів змінюється від молочно-білого, жовтого, трав'янисто-зеленого до темно-коричневого та чорного. Порожнини локалізовані в ядерній частині моноядерних ЖК. Кількість променів у зірочках – від двох до шести, ця цифра частково залежить від габітусу поліедра. Зокрема, у псевдотетраедричних фасеткових ЖК переважають трипроменеві зірочки, а у псевдокубичних – чотирипроменеві. Порожнини орієнтовані перпендикулярно до фасеткових поверхонь та мають різний ступінь наближення до оболонки. У декількох випадках порожнина в одному з напрямів досягає поверхні, розвиток порожнини у протилежному напрямі не простежується, оскільки такі зміни ведуть до руйнування ЖК.

Здебільшого поліпроменеві порожнини формуються внаслідок проростання однієї з тріщин або родини розгалужених тріщин через її переріз. Такі порожнини часто називають магістральними. Вони найчастіше з'являються внаслідок самоорганізації морфології каменя. Магістральна порожнина протягом тривалого часу не виявляється. Однак, з'явившись, досить швидко визначає головні напрями росту. Описано випадки руйнування ЖК через досягнення порожнинами поверхні каменя. Необхідні передумови появи поліпроменевих магістральних порожнин у ЖК такі:

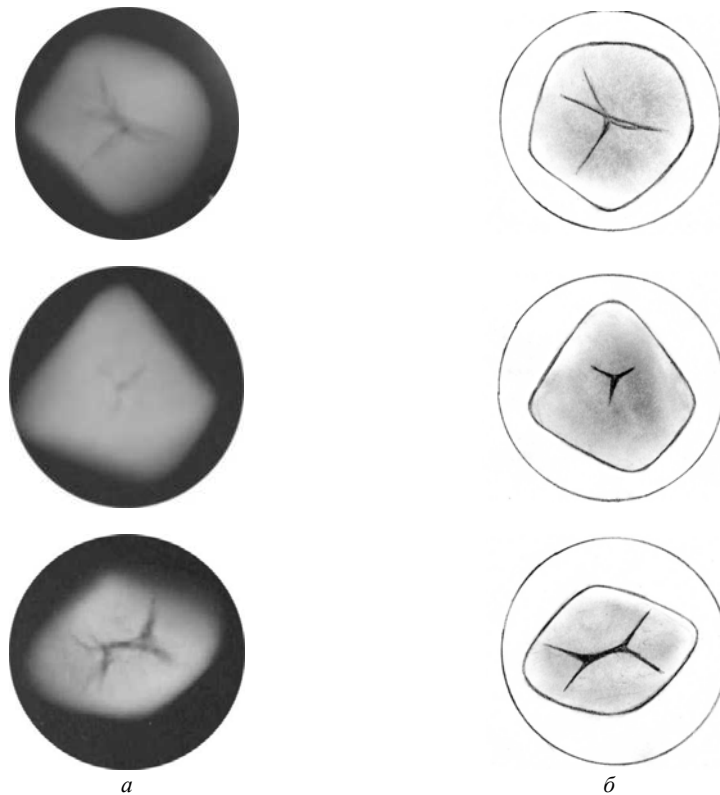


Рис. 4. Топограми фасеткових жовчних каменів із внутрішніми поліпроменевими порожнинами (а – топограми, б – схематичні зображення).

- 1) утворення зародкових мікропорожнин;
- 2) агрегація мікропорожнин (нестабільний ріст макропорожнини);
- 3) поширення та блокування розрізнених порожнин у єдине ціле.

Сприятливим фактором поширення цих порожнин є наявність первинної сфероліт-дендритової мікроструктури, а несприятливим – наявність значної кількості блокувальних домішок, передусім карбонатів і фосфатів кальцію. Адже розподіл внутрішніх напружень в неоднорідному камені навіть без тріщин суттєво відрізняється від розподілу напружень в однорідному конкременті. Це явище пов'язане з розходженням пружних властивостей біомінеральних зерен різного складу. Як відомо, у неоднорідному тілі тріщини мають тенденцію легко проникати з жорсткішої в менш жорстку речовину. Водночас зворотний процес утруднений, тобто поширення тріщини може припинитися на межі поділу фаз. Наявність у камені поліпроменевих та магістральних порожнин можна трактувати як необхідну і достатню умову руйнування каменя на дві чи більше частин, вона є своєрідним “гарантом” майбутнього цілковитого руйнування конкременту.

5. Топограми, на яких фіксована система дрібних тріщин. Такі порожнини характерні для фасеткових ЖК з дуже округлими вершинами та радіально-концентричною мікроструктурою. Зафіксовано 15 таких випадків, що становить 6 %.

Цьому типу властива незначна контрастність зображення та потужність порожнин (рис. 5). Локалізована система порожнин у центральній частині ЖК. Порожнини переважно субпаралельні до поверхні та відокремлені одна від одної.

6. Топограми, на яких фіксовані концентрично-зональні ділянки. Виявлено 22 такі камені, що становить 9 %. Найчастіше притаманні фасетковим та концентрично-шкаралупчастим ЖК із шаруватою мікроструктурою. Такі зображення на рентгенівських топограмах мають зміну забарвлення та контрастність відповідно до зон каменя. В багатьох випадках наявні поліпроменеві зірочки в ядерній ділянці фасеткового ЖК та поодинокі тріщини поблизу вершин (рис. 6).



Рис. 5. Топограма жовчного каменя із системою дрібних тріщин (а – топограма, б – схематичне зображення).



Рис. 6. Топограма фасеткового жовчного каменя з концентрично-зональною ділянкою (а – топограма, б – схематичне зображення).

7. Топограми, на яких фіксовані радіально орієнтовані порожнини. Виявлено 12 таких каменів, що становить 5 %. Такі порожнини простежуються у сфероліт-дендритових конкрементах. Порівняно з попередніми вони мають значно меншу контрастність зображення та потужність. Від ядерної частини розходяться тонкі порожнини, орієнтація яких відповідає радіально-променевому росту дендритових кристалів холестерину. В периферійній зоні на топограмах деяких конкрементів видно заломлення променів порожнин. Це пов'язано з особливостями кристалізації сфероліт-дендритових ЖК, коли за певних умов окрема гілка дендриту стає центром кристалізації нового сфероліту. Морфологічно це виявляється у каменях типу шовковиці (рис. 7).

8. Топограми, на яких фіксовані відокремлювальні порожнини. Виявлено 50 таких каменів, що становить 22 %. Такі топограми належать поліядерним ЖК, які складаються з декількох незначних за розміром адгезованих каменів.



Рис. 7. Топограма жовчного каменя III-типу (“шовковиця”) із трьома спареними радіально орієнтованими порожнинами (*a* – топограма, *б* – схематичне зображення).

Характерною ознакою такого типу порожнин є протяжність майже через усе тіло конкременту та високий контраст зображення. Такі порожнини поділяють камінь на декілька сегментів, які відповідають окремим складовим каменям. Залежно від морфології, способу агрегації каменів порожнини можуть бути з'єднані між собою або ні. У ядерних частинах переважної більшості сегментів ми простежуємо порожнини, характерні для індивідів першого типу, що свідчить про попередній індивідуальний розвиток кожного окремого сегмента (рис. 8).

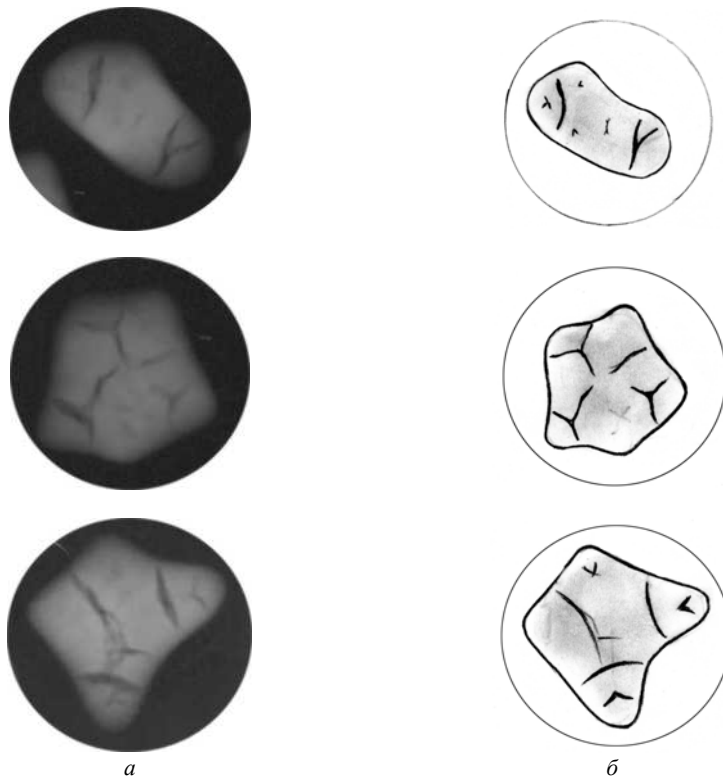


Рис. 8. Топограми “зрощених” жовчних каменів, на яких фіксовані висококонтрастні відокремлювальні порожнини (*a* – топограми, *б* – схематичні зображення).

Механізми формування порожнин і тріщин. Виконані дослідження дали змогу запропонувати три механізми формування тріщин і порожнин у ЖК: дегідратаційний, адгезійний та ростовий.

Дегідратаційний механізм ґрунтується на тому, що головним каменеутворювачем первинних ЖК є моногідрат холестерину $C_{27}H_{46}O \cdot H_2O$, який за певних умов здатен втрачати кристалізаційну воду та переходити в ангідрит холестерину $C_{27}H_{46}O$. Ця втрата становить приблизно 4–5 % маси (об'єму). Іншими словами, 4–5 % від первинного об'єму каменя повинна мати порожнина за умови втрати моногідратом холестерину кристалізаційної води. Важливими передумовами активізації дегідратаційного механізму формування тріщин у ЖК є:

- висока мікропористість моногідрат-холестеринових агрегатів;
- ізольованість внутрішньої мікроструктури каменя від водовмісного середовища, що його оточує;
- перекристалізація пористих агрегатів моногідрату холестерину з формуванням щільних агрегатів ангідриду холестерину.

Особливо інтенсивно дегідратаційний механізм активізується за умов тривалого перебування ЖК у гепатобілярній людині, численної асоціації та інтенсивних міжкаменевих взаємодій. За таких умов зовнішні розміри каменя майже не змінюються, а порожнини формуються в процесі перекристалізації пористих агрегатів моногідрату холестерину. Під час дегідратації кристаліти новоутвореного ангідриду холестерину, які ще не встигли сформувати щільний агрегат, породжують розтягувальні мікронапруження. Саме ці мікронапруження, на нашу думку, і ініціюють інтенсивніші напруження розтягу, які призводять до формування мікро- та макропорожнин у ЖК.

Адгезійний механізм. Поліядерним ЖК, на наш погляд, притаманний адгезійний механізм формування ЖК. Високий контраст зображення, властивий дефектам у структурі цих каменів, свідчить про те, що головним чинником, який призвів до появи порожнин, є адгезія (злипання та “склеювання” [3]) нерівних поверхонь. Відповідно, дві адгезовані поверхні із заглибинами і формують порожнину. До того ж, контраст зображення підсилює дифракція від кристалітів на поверхні субіндивідів. Порожнини, сформовані за адгезійним механізмом, поділяють камінь на окремі сегменти, які відповідають окремим субіндивідам. Залежно від нерівності поверхонь та способу адгезії каменів порожнини можуть бути з'єднані між собою. Сприяють адгезійному механізмові підвищена в'язкість жовчі, депонування аморфних фаз на поверхню та застійні явища у жовчному міхурі.

Ростовий механізм. В окремих випадках у ЖК може виявлятися ростовий механізм формування порожнин і тріщин. Він полягає в осадженні на поверхню внутрішнього дефекту каменя порошокподібної пігментної речовини і вторинного аморфного холестерину та в подальшому підвищенні кристалізаційного тиску під час перекристалізації осаджених компонентів. Унаслідок кристалізаційного тиску починається розширення дефекту та розвиток порожнини завдяки самоорганізації аморфної речовини. Розвиток порожнини припиняється після того, як кристалізаційний тиск стане нижчим, ніж стійкість мікроструктури каменя, чи за умови повної перекристалізації компонентів, які можуть чинити тиск.

Ростовий механізм формування тріщин і порожнин у ЖК значно обмежений низькою енергоємністю процесів перекристалізації (не вистачає енергії на забезпечення динамічного росту порожнини). Найбільший тиск буває на початковій стадії

масового зародження кристалів. Значно менша амплітуда збільшення розмірів порожнини в процесі конкурентного росту та росту друз перекристалізації. Друзи перекристалізації, на наш погляд, є своєрідними маркерами прояву ростового механізму формування порожнин і тріщин.

Методом дифрактометрії (дифрактометр ДРОН-3, CuK α -випромінювання) визначали речовинний склад перекристалізованих новоутворень у порожнинах ЖК. Під бінокляром вивчали поверхню порожнин, тріщини, морфологічні особливості новоутворених агрегатів. Виконані спостереження засвідчили, що паралельнотичкуваті агрегати і друзи мають закономірну кристалографічну орієнтацію клино-, дендритоподібних пластинчастих кристалів холестерину відносно їхнього видовження і зону геометричного відбору у доцентровому напрямі. Такі умови засвідчують формування паралельнотичкуватих агрегатів, менше – друз, шляхом перекристалізації. За особливостями утворення, характером рельєфу поверхні порожнин та морфологією агрегатів можна виділити декілька типів.

1. Паралельнотичкуваті агрегати та друзи, що утворилися на додатних нерівностях стінок порожнин та виступах, утворених дендритоподібними кристалами радіально орієнтованого первинного холестерину. Вони незначні за розмірами та кількістю агрегатоутворювальних індивідів. У межах однієї друзи дендритні кристали росли з порівняно однаковою швидкістю, оскільки не трапляються індивіди, чий розмір перевищує інші. Кристали вторинного холестерину клино- або дендритоподібні, відокремлені один від одного.

Характерною особливістю цих утворень є радіально-промениста будова та залежність їхньої морфології від характеристики поверхні, на якій вони утворилися. Тонкий, видовжений, гострокутний виступ зумовлює появу кулеподібного агрегату (сфероліту). На пологих, незначних підняттях поверхні порожнини ріст досліджуваних агрегатів обмежений поверхнею, що надає їм форми півкулі.

2. Паралельнотичкуваті агрегати та друзи, що утворилися в западинах на стінках порожнин та між гілками дендритоподібних кристалів радіально орієнтованого первинного холестерину. Дно западин, на яких зароджуються та ростуть ці агрегати, густо вистелене шаром дрібнозернистої пігментної речовини. Кристали вторинного холестерину численні, видовжені, вузькі, щільно прилягають один до одного. Розміри кристалів у межах однієї друзи значно різняться.

Морфологічні та структурні особливості цих агрегатів пов'язані з умовами їхнього утворення. В агрегатів, які ростуть у вузьких западинах з високими стінками, кристали холестерину голчасті, надзвичайно вузькі та видовжені. Аналогічні агрегати, що ростуть у розлогих западинах стінок порожнин, мають клиноподібні кристали, які не так щільно розташовані, як попередні, та не такі видовжені.

У межах одного конкременту не можна виділяти тільки певний тип друзових агрегатів. Як звичайно, вони гармонійно поєднуються, чергуються, а в деяких випадках поступово переходять з одного в інший.

Дрібні тріщини виповнені винятково паралельнотичкуватими агрегатами холестерину. Ріст цих агрегатів обмежений тріщиною, яка відкривалась поступово і з меншою швидкістю, ніж швидкість росту кристалів. Такі агрегати виповнюють тріщину повністю – від стінки до стінки по всій її довжині. Максимальна довжина прожилків до 4 мм, потужність – 0,5 мм. Можна припустити, що в разі виникнення тріщини на її стінках у вільному просторі почали рости поодинокі кристали холестерину і деякий період ріст кристалів не досягав швидкості відкриття тріщини.

Це підтверджує кристалографічна впорядкованість, яка свідчить про частковий геометричний відбір, що можливий лише за вільного росту кристалів. З часом об'єм тріщини повністю заповнився вторинним холестерином і став недостатнім для його росту.

Особливості агрегатоутворення зумовили стійкість холестеринових прожилків до механічного руйнування. Щільні паралельнотичкуваті агрегати вторинного холестерину неущокоджувані після руйнування дендритоподібних кристалів первинного холестерину, між якими вони розміщені. Зазначимо, що ці паралельнотичкуваті агрегати траплялися лише у зразках, у центрі яких розташовані макроскопічні порожнини з друзовими агрегатами на стінках. Тріщини розташовані в периферійній зоні, тоді як порожнини – у ядерній.

Наявність у жовчних каменях порожнин і тріщин, їхнє розташування та характер виповнення функціонально залежать від їхнього складу та структури і дають інформацію про фізико-хімічний склад літогенної жовчі та процеси, які відбувалися під час росту ЖК. Під час руйнування саме вони відіграють визначальну роль у фракціюванні ЖК.

1. *Александров А.В., Потапов В.Д.* Основы теории упругости и пластичности. М., 1990.
2. *Борисовский В.Г., Патан В.В.* Современное состояние и перспективы развития динамической динамики разрушения // *Механика деформированного твердого тела.* М., 1988.
3. *Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П.* Адгезия твердых тел. М., 1973.
4. *Дяків В.О.* Динаміка змін конфокальних текстур у сфероліт-дендритних холестеринових агрегатах жовчних камінців (за даними рентгенопографічних досліджень) // *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол.* 1999. Вип. 13. С. 116–120.
5. *Дяків В.О.* Рентгенопографічне вивчення орієнтацій порожнин у мікроструктурній будові фасеткових жовчних камінців // *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол.* 1999. Вип. 13. С. 121–125.
6. *Люлько А.В., Баранник С.И., Пстолов Ю.М.* Дистанционная литотрипсия. Днепропетровск, 1997.
7. *Kienzle H.F., Klee W.E.* Microradiography of gallstones // *Z. Gastroenterol.* 1981. Vol.19. P. 667–672.
8. *Wilbert D. M., Reicheuberger H., Nosce E.* New generation shock wave litotripsy // *J. Urol.* 1987. Vol. 138. N 3. P. 563–565.

**ANALYSIS OF GALLSTONES CAVITIES AND CRACKS IMAGES
ON X-RAY TOPOGRAMS****U. Bornyak, V. Dyakiv**

Ivan Franko National University of Lviv
Hrushevskogo st. 4, UA – 79005 Lviv, Ukraine
E-mail: geomin@geof.franko.lviv.ua; dyakivw@yahoo.com

The results of the X-ray topography researches of gallstones have been analysed. On this basis hollows and cracks in concrement's body and postsedimentary biomineralization have been characterised. Eight groups of postsedimentary hollows and cracks images are allocated on X-ray topograms. Three mechanisms of their formation have been offered: dehydration, adgesion and growth.

Key words: gallstones, X-ray topography, postsedimentary hollow, postsedimentary crack.

Стаття надійшла до редколегії 05.02.2002
Прийнята до друку 19.09.2002