

КОНЦЕПТУАЛЬНА СИНЕРГЕТИЧНА ГЕОЛОГО-ГІДРОГЕОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ РОЗВИТКУ СУФОЗІЇ ТА КАРСТУ У КАРБОНАТНИХ ПОРОДАХ НА ТЕРИТОРІЇ СВЯТОГІРСЬКОГО МОНАСТІРЯ

Розглянуто причини розвитку геодинамічних процесів суфозії та карсту у карбонатних породах. Визначено, що основним фактором їх формування виступають підземні води, що мають різне походження та напрямки руху. Їх фільтрація у масиві мергельно-крейдяних порід забезпечується трьома системами тріщин – екзогенних (вивітрювання), літогенних (діагенетичних) та тектоногенних. Показано, що процеси суфозії, яка є наслідком механічної діяльності підземних вод, відбуваються паралельно з процесами карстоутворення, що обумовлено хімічного взаємодією компонентів системи "порода – вода" за участю різного за генезисом діоксид у вуглецю. За результатами ізотопного аналізу на вміст важких ізотопів вуглецю у мінеральній речовині встановлено, що його генезис у продуктах епікарсту відповідає атмосферному, а у речовині арагоніту з тектонічних тріщин – глибинному.

Уперше побудовано концептуальну синергетичну просторову геолого-гідрологічну модель суфозії та карсту у карбонатних верхньокрейдяних породах "крейдяної скелі", на якій розташовані історично-архітектурні пам'ятки Святогірського монастиря. Ця модель дозволяє визначити можливі геологічні ризики для монастирських будівель та споруд та розробити методику їхнього захисту від руйнівних геодинамічних процесів.

Ключові слова: підземні вод, карбонатні породи, розлом, діоксид вуглецю, фільтрація, суфозія, карст, геодинамічні процеси тепломасоперенесення, історично-архітектурні пам'ятки.

В.Г. Суярко, В.В. Сухов. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ СУФФОЗИИ И КАРСТА В КАРБОНАТНЫХ ПОРОДАХ НА ТЕРРИТОРИИ СВЯТОГОРСКОГО МОНАСТЫРЯ. Рассмотрены причины развития геодинамических процессов суффозии и карста в карбонатных породах. Определено, что основным фактором их формирования выступают подземных воды, имеющие различное происхождение и направления движения. Их фильтрация в массиве мергельно-меловых пород обеспечивается тремя системами трещин – экзогенных (выветривания), литогенных (диагенетически) и тектоногенных. Показано, что процессы суффозии, являющейся следствием механической деятельности подземных вод, происходят параллельно процессам карстообразования, что обусловлено химическим взаимодействием компонентов системы "породы – вода" при участии двуокиси углерода различного генезиса.

Впервые построена концептуальная синергетическая пространственная геолого-гидрогеологическая модель суффозии и карста в карбонатных верхнемеловых породах "меловой скалы", на которой расположены историко-архитектурные памятники Святогорского монастыря. Эта модель позволяет определить возможные геологические риски для монастырских зданий и сооружений и разработать методику их защиты от разрушительных геодинамических процессов.

Ключевые слова: подземные воды, карбонатные породы, разлом, двуокись углерода, фильтрация, суффозия, карст, геодинамические процессы, тепломассоперенос, историко-архитектурные памятники.

Святогірська брахіантикліналь знаходиться на північному борту Бахмутської улоговини у східній частині Дніпровсько-Донецької западини. Мергельно-крейдяні відклади північніше м. Святогірськ відслонюються на правому березі р. Сіверський Донець у вигляді скелі висотою до 100 м з розташованим на ній історично-архітектурним комплексом Святогірського монастиря. Основним об'єктом комплексу є "крейдяна" Миколаївська церква, що збудована у XVI–XVII століттях на її вершині. Вона частково вирубана в крейдяних породах, а частково складена з крейдяних брил та цегли. Купол церкви висічений у вигляді башти з крейдяного моноліту.

У товщі крейдяної брили є два яруси печерних споруд. Верхній ярус (колишня церква Іоанна Хрестителя) є системою коридорів та камер, які вирубано у мергельно-крейдяних породах. Нижній ярус печерних споруд (колишня церква Олексія Людини Божої) складається з головної зали та службових приміщень, що розгалужуються на два коридори, що закінчуються отворами-вікнами, які виходять у бік річки на

північному та східному боках скелі. Похилі коридори слугують для переходів на нижче – та вищезалягаючі рівні підземних споруд.

Від розташованого унизу Успенського собору ведуть напівзруйновані східці паломників з двома майже повністю зруйнованими павільйонами.

Породи верхньої крейди, які представлені мергельно-крейдяною товщею туронського і кон'якського ярусів (K₂t-cn), що складають крейдяну скелю, розбиті тріщинами. Ці тріщини, що є каналами циркуляції підземних вод, різні за генезисом, напрямками та глибиною і поділяються на три види: екзогенні, літогенні та тектоногенні (табл. 1).

Екзогенна тріщинуватість мергельно-крейдяної товщі пов'язана з процесами геологічного вивітрювання. Тріщини мають хаотичний характер і часто – похиле (до субгоризонтального) падіння, а глибина їх рідко перевищує перші метри.

Літогенні тріщини, утворення яких відбувалося в процесі діагенезу крейдяного осаду, мають падіння від 30 до 50° на південь – у глиб

Таблиця 1

Характеристика тектонічних тріщин та тріщинних зон на ділянці знаходження крейджаної Миколаївської церкви

№ н\н	Параметри тріщин (зон)					Характер стінок	Матеріал, заповнення	Мінеральні ново- утворення, форма
	Місцезнаходження	Ширина, м	Кути падіння, град.	Азимути, град.				
				простяган- ня	падіння			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	1 ^а від краю брили	0,01-0,2	84-90	225-250	340-345	Нерівні шорохуваті	Крейджаний пил	Натічний кальцит
2.	2 ^а від краю брили	до 0,2	80-90	245-260	335-350	Нерівні, бугристі	Крейджані щебінка та «мука»	Натічний кальцит
3.	3 ^а від краю брили	0,03-0,05	82-88	240-255	340-345	Нерівні, східчасті	Дресва та щебінка крейди, крейджана «мука»	Натічний кальцит
4.	4 ^а від краю брили	0,03-0,2	84-88	240-250	330-340	Нерівні, шорохуваті	Дресур, крейджана «мука»	Натічний кальцит
5.	5 ^а від краю брили	0,03-0,05	75-88	240-250	330-340	Нерівні	Дресур, крейджана «мука»	Натічний кальцит
6.	6 ^а від краю брили	1,5-2,0	60-88	240-280	310-320	Вихлясті	Крейджана «мука»	Натічний кальцит
7.	7 ^а від краю брили	0,6-0,8	75-78	275-300	335-350	Нерівні	Щебінка та дресва крейди, крейджана «мука»	Не виявлено

Бахмутської улоговини. Починаючись від вершини "крейдяної скелі", вони затухають на глибинах до 30,0–40,0 м.

Тектогенні тріщини, утворення яких пов'язане з ларамійською та пізнішими фазами альпійської тектонічної активізації Петрівсько-Кремінського розлому [5], по зоні якого проходить русло р. Сіверський Донець, субвертикально розбивають "крейдяну скелю" і уходять униз на сотні метрів.

Тріщинуватість у масиві мергельно-крейдяних порід "крейдяної скелі" характеризується гетерогенністю та анізотропністю проникності і має певну ієрархічність. У верхній частині брили вона представлена переважно неглибокими різноспрямованими тріщинами, які утворюють найширші канали фільтрації, рух підземних вод у яких є найінтенсивнішим і часто носить турбулентний характер. З глибиною кількість тріщин (за рахунок зникнення тріщин вивітрювання) різко зменшується, хоча діагенетичні тріщини, які також ущільнюються, все ще мають широке розповсюдження. Тут фільтрація тріщинних вод має переважно ламінарний характер, хоча на деяких ділянках спостерігається їх турбулентний рух [6].

Такі ділянки, зокрема, приручені тут до місць перетину літогенної та тектогенної тріщинуватості. Але тенденція до зменшення швидкостей фільтрації з глибиною чітко витримується.

Порожнинність та проникність тріщин залежить не лише від процесів їх формування та розвитку, що серед іншого обумовлюється їх розширенням при механічному руйнуванні, вилугованні та розчиненні бокових карбонатних порід [4]. У цьому можуть бути задіяні як інфільтраційні (зони суфозії та епікарсту), так і глибинні (зона гіпокарсту) води, що мають не лише різні лужність, мінералізацію, хімічний та газовий склад, а й протилежні напрямки руху.

При розкритті тріщин більше 5–15 мм в процесі фільтрації починають виникати нелінійні ефекти, пов'язані з турбулентним рухом води [4,8]. Експериментально доведено, що зміна гідродинамічних режимів з ламінарного на турбулентний відповідає двом важливим граничним ефектам: розчинення і механічній руйнації порід. У режимі повільної ламінарної кінетики відбувається розчинення карбонатних порід і перенесення речовин у справжніх водних розчинах, а у режимі швидкої турбулентної кінетики – їх механічна руйнація і перенесення речовини у вигляді суспензії [8].

Швидкості руху інфільтраційних потоків у породах зони вивітрювання верхньокрейдяних порід на вершині "крейдяної скелі" досягають

3–5 м за секунду. Однак, нижче цієї зони, згідно з проведеними спостереженнями, вони різко зменшуються і, зазвичай, становлять від одного до декількох сантиметрів у секунду. На цих глибинах максимальні швидкості інфільтраційних потоків часто приурочені до перехрестя тріщин різного походження – вивітрювання та діагенетичних. Інколи до них долучаються тектонічні тріщини. І тоді у карбонатному масиві формуються кавернозні канали діаметром до 10,0 см. Саме канали такого типу з видимими суспензійними продуктами суфозії у вигляді "крейдяного борошна" досліджені нами в інтервалі 3–10 м нижче рівня Миколаївської крейдяної церкви.

Якщо головним чинником суфозії, як наслідку механічної діяльності тріщинних вод, є їхня динаміка, то карбонатний карст розвивається завдяки хімічній агресивності водних розчинів. Останнє, зокрема, забезпечується присутністю у підземних водах як вільного, так і розчинного діоксиду вуглецю (CO_2).

Інфільтраційні води, що вміщують CO_2 атмосферного походження, проникають у масив крейдяних порід від земної поверхні. Фільтрація їх відбувається як по екзогенних тріщинах, зона розвитку яких не перевищує, переважно, 3–5 м, так і по літогенних (діагенетичних) тріщинах. З такими водами пов'язані хімічні перетворення у карбонатно-водяних системах, наслідком яких є епікарст [1,3].

З іншого боку, багаторазова тектонічна активізація Святогірської структури призвела до формування у потужній карбонатній мергельно-крейдяній товщі систем субвертикальних тектонічних тріщин, які забезпечують висхідне розвантаження напірних вод юри, тріасу і палеозою. Останні, формування котрих пов'язане з глибокими горизонтами гідросфери, забезпечували міграцію ендегенних флюїдів, провідну роль серед яких відіграє CO_2 . Напірні води глибоких горизонтів, що характеризуються лужністю та хімічною агресивністю, циркулюючи по первинних тріщинах та порах і взаємодіючи з карбонатною речовиною (кальцитом), постійно розширювали канали фільтрації, що врешті-решт обумовило формування проникних гідродинамічних зон різних розмірів. Періодичне розвантаження по них хімічно активних вод, насичених агресивними до карбонатів флюїдами (передусім, CO_2) призвело до утворення зон ендокарсту у масиві мергельно-крейдяної товщі.

Виходячи з цього, нами побудовано просторову синергетичну геолого-гідрогеологічну модель розвитку суфозії та карсту у масиві мергельно-крейдяних порід нижньої крейди

(рис. 1). Вона може бути описана наступним чином: після дуже активного прояву на рубежі крейди та палеогену ларамійської фази альпійського тектогенезу, південний блок активізованого Петрівсько-Кремінського розлому в межах Святогірської брахіантиклиналі було здійснено [5,7] і під сучасну пору він представлений у вигляді "крейдянної скелі". В процесі геологічної історії регіону цей розлом, як геодинамічна система, що відбиває процеси великих глибин [2], відігравав важливу роль у тепломасоперенесенні. Завдяки йому гірські породи різного віку зазнавали впливу різних екзогенних та ендеогенних процесів, які й обумовили розвиток таких геодинамічних явищ, як суфозія і карст.

Інфільтраційне живлення масиву мергельно-крейдянних порід відбувається за рахунок атмосферних опадів та поверхневих вод, які інфільтруються спочатку у сильно тріщинуваті породи верхньої частини розрізу. Пересуваючись згори вниз під дією сил гравітації по тріщинних каналах фільтрації різного походження, ці води характеризуються турбулентним типом руху, спричиняючи механічне руйнування карбонатних порід з наступним перенесенням продуктів руйнування у механічних частках різного розміру. Серед них основною формою є суспензійна, яка, як найменша за розмірами, має найдовші шляхи міграції. Суспензії, що випали з водних потоків у вигляді "крейдянної порошки", присутні не лише у екзогенних та літогенних, а й у тектоногенних тріщинах. Суфозійними процесами охоплено зону вільного водообміну, яка сформувалася у верхній частині "крейдянної скелі" (рис. 1).

Зі зменшенням швидкостей потоків інфільтраційних вод і розподілом їх у тріщинно-поровому просторі карбонатних порід за участю аніону HCO_3^- та атмосферного CO_2 нижче зони вивітрювання відбуваються процеси хімічної взаємодії інфільтраційних вод з кальцитом нижньокрейдяної товщі. Саме це, вірогідно, і обумовило розширення простору деяких з діагенетичних тріщин з утворенням карстових порожнин, які є типовими для епікарсту (рис. 1).

Тектонічні субвертикальні тріщини частково приймають участь у сучасній інфільтрації атмосферних опадів, тому в них також зустрічається суспензійний матеріал суфозійних процесів. Проте їхня основна гідродинамічна роль полягає в іншому. Утворені в різні за силою періоди тектонічної активізації Петрівсько-Кремінського розлому – від потужної ларамійської (на межі крейди та палеогену) та значно слабшої савської (на межі палеогену і неогену) до найновіших і сучасних [7], ці тріщини, які, по суті, є найдрібнішими складовими глибин-

ного розлому, виконують важливу роль у локальному тепломасоперенесенні. Як і по усій зоні розлому, тут відбуваються процеси обміну між різними флюїдодинамічними та гідродинамічними системами, що обумовлює вертикальне розвантаження вод глибокого формування та ендеогенних флюїдів з формуванням поблизу земної поверхні гідрогеотермічних та гідрогеохімічних аномалій [3]. Серед компонентів глибинного походження найважливішим для реакцій розчинення карбонатів підземними водами є діоксид вуглецю (можливо матаморфогенного походження), який сприяв розвитку гіпокарсту у масиві "крейдянної скелі". Як свідчать результати ізотопного аналізу вуглецю у арагоніті, що повсюдно зустрічається на стінках тектонічних тріщин, CO_2 , який відігравав основну роль у реакціях хімічного розчинення карбонатів і, зокрема, кальциту: був, швидше за все, матаморфогенним. Це дає підстави для виділення у нижній частині "крейдянної скелі" зони гіпокарсту.

Сучасна тектонічна активність регіону проявляється не лише у загальному зростанні Святогірської брахіантиклиналі зі швидкістю до 2,0 мм/рік, а й у землетрусах, які у 1913 та 1937 роках відбувалися приблизно за 50 км північніше та південніше території досліджень. Ці поштовхи викликали не лише коливання рівня води у колодязях, а й зміну її сольового складу (з прісних – на солоні). Води хлоридного натрієвого та сульфатно-хлоридного (натрієвого, кальцієвого) складу з мінералізацією до 5,0–10,0 г/дм³ зустрічаються тут у крейдянних породах і зараз [6].

Дослідження особливостей розвитку суфозійних та карстових процесів у мергельно-крейдянних породах нижньої крейди на території Святогірського монастиря дозволили зробити наступні висновки:

1. Підземні води є основним чинником розвитку геодинамічних процесів у карбонатних породах.

2. Тріщинуватість мергельно-крейдянної товщі верхньої крейди в межах "крейдянної скелі" пов'язана з розвитком трьох генетичних видів тріщин: вивітрювання (екзогенних), діагенетичних (літогенних) та тектонічних (ендогенних), які виконують основну гідродинамічну роль, забезпечуючи фільтрацію по них підземних вод різного походження.

3. Важливим фактором тепломасоперенесення, з яким пов'язане висхідне розвантаження вод глибоких горизонтів та ендеогенних флюїдів, є нова та сучасна тектонічна активізація Петрівсько-Кремінського розлому.

4. Встановлено, що у карбонатних породах

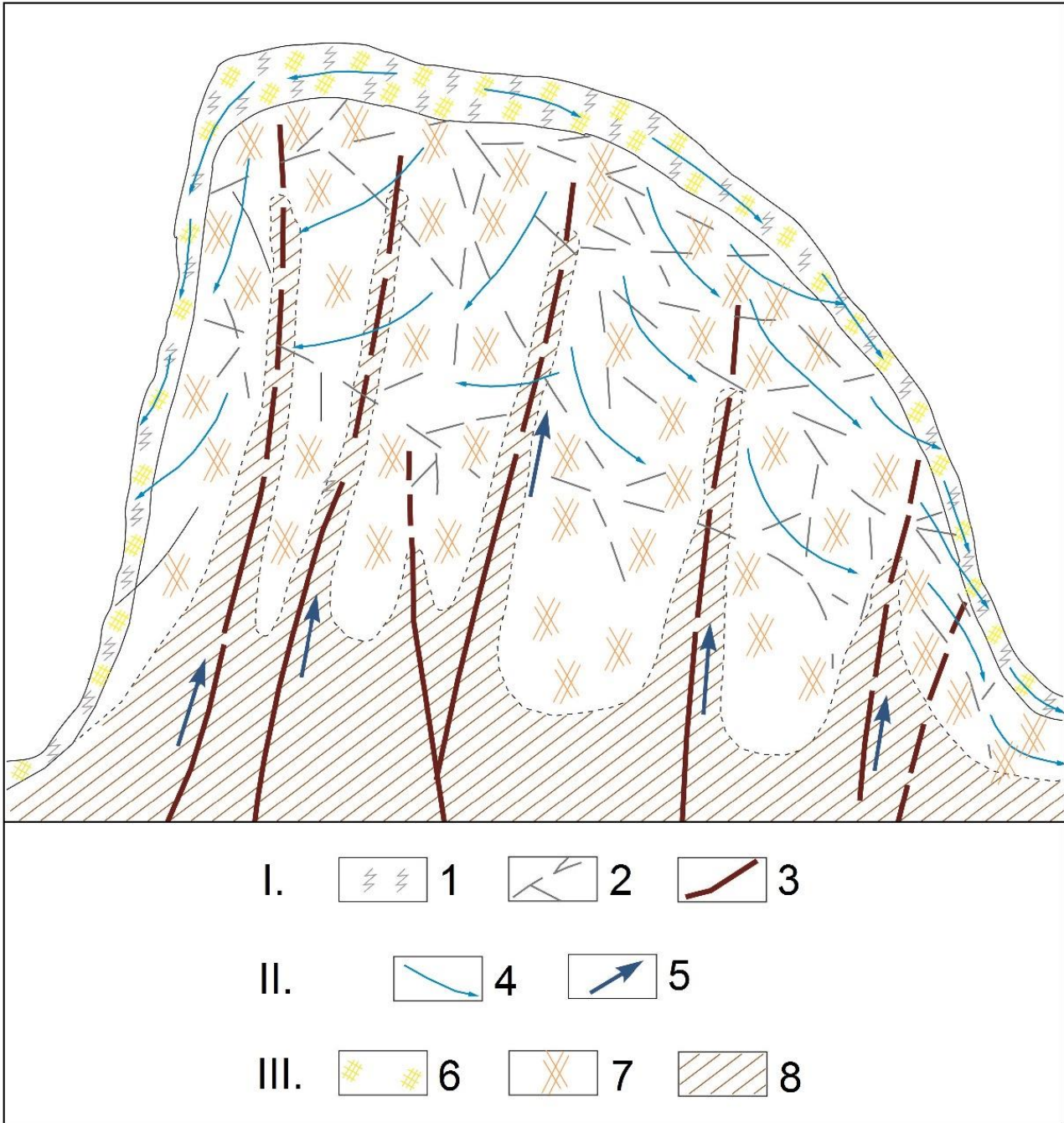


Рис. 1. Геолого-гідродинамічна модель розвитку суфозійності і карстових процесів у масиві мергельно-крейдових порід («крейдяна брила»)

Умовні позначення:

I. Тріщини:

1 – вивітрювання (екзогенні); 2 – літогенні (діагенетичні); 3 – тектоногенні (ендогенні).

II. Напрямки руху підземних вод:

4 – низхідний (інфільтраційних, безнапірних, з атмосферним); 5 – висхідний (глибинних, напірних, з ендогенним CO₂).

III. Зони розвитку геодинамічних процесів:

6 – суфозії; 7 – епікарсту; 8 – гіпокарсту.

верхньої крейди на території досліджень за участю підземних вод відбуваються геодинамічні процеси суфозії (пов'язаною з механічною дією підземних вод) та карсту (обумовленого хімічною взаємодією водних розчинів і гірських порід). При цьому, в залежності від генезису підземних вод та CO_2 і напрямком їх фільтрації, у карбонатних породах утворюються зовні подібні, але генетично різні зони карсту – приповерхнева (епікарст) та глибинна (гіпокарст).

5. На основі аналізу фактичного матеріалу вперше створено концептуальну просторову синергетичну геолого-гідрогеологічну модель розвитку геодинамічних процесів суфозії та карсту у верхньокрейдяній мергельно-крейдяній товщі Святогірської брахіантикліналі яка дозволяє визначити не лише взаємозв'язки окремих системи “порода – вода”, а й можливі геологічні ризики для історично-архітектурного комплексу Святогірського монастиря.

Література

1. Андрийчук, В. Карст как геоэкологический фактор [Текст] / В. Андрийчук. – Сосновец-Симферополь: Высшая школа экологии и НАН Украины, 2007. – 137 с.
2. Белоконь, В.Г. Бассейн р. Северский Донец как геодинамическая система, отражающая процессы больших глубин [Текст] / В.Г. Белоконь // Геологический журнал, 1984. – Т. 34, вып. 5. – С. 11–27.
3. Климчук, А.Б. Гипогенный спелеогенез, его гидрогеологическое значение и роль в эволюции карста [Текст] / А.Б. Климчук. – Симферополь: ДИАЙПИ, 2013. – 180 с.
4. Пиннекер, Е.В. Роль воды в осадочном породообразовании и метаморфизме [Текст] / Е.В. Пиннекер. – В кн.: Геологическая деятельность и история воды в земных недрах. – Новосибирск: Наука, 1982. – С. 28–43.
5. Скаржинский, В.И. Эндогенная металлогения Донецкого бассейна [Текст] / В.И. Скаржинский. – К.: Наукова думка, 1973. – 203 с.
6. Суярко, В.Г. Геохимия подземных вод восточной части Днепровско-Донецкого авлакогена [Текст] / В.Г. Суярко. – Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2006. – 225 с.
7. Шумлянский, В.А. Киммерийская металлогеническая эпоха на территории Украины [Текст] / В.А. Шумлянский. – К.: Наукова думка, 1983. – 220 с.
8. White, W.B. Karst hydrology : recent developments and open questions // Eng. Geol., 2002. – 65. – P. 85–105.