

*До 25-річчя створення Інституту біолоїдної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України і 35-річчя становлення фізико-хімічної геомеханіки*

#### **ПРОКОПЕНКО**

**Віталій Анатолійович** — доктор технічних наук, директор Інституту біолоїдної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України

#### **КОВЗУН**

**Ігор Григорович** — доктор хімічних наук, професор, провідний науковий співробітник Інституту біолоїдної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України

#### **УЛЬБЕРГ**

**Зоя Рудольфівна** — доктор хімічних наук, професор, завідувач відділу Інституту біолоїдної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України

#### **ЦИГАНОВИЧ**

**Олена Анатоліївна** — кандидат хімічних наук, заступник директора Інституту біолоїдної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України

#### **ПАНЬКО**

**Андрій Валентинович** — кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник Інституту біолоїдної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України

## **ФІЗИКО-ХІМІЧНА ГЕОМЕХАНІКА І НАНОХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПРИРОДНИХ І ТЕХНОГЕННИХ МІНЕРАЛАХ**

*Розглянуто головні етапи розвитку суміжного розділу колоїдної хімії — фізико-хімічної геомеханіки нано- і мікроструктурованих дисперсних систем; її роль у вивченні геохімічних процесів, які супроводжують диспергування і подальше вторинне ущільнення гірських порід та рудних матеріалів. Сформульовано та експериментально підтверджено основоположне значення механохімічних, мікробіологічних і нанохімічних аспектів міжфазних контактних взаємодій в умовах процесів диспергування гірських порід та їх вторинного ущільнення. Показано, що отримані фундаментальні і прикладні результати відіграють важливу роль у створенні основ біолоїдної хімії, біогеохімії, колоїдних біогеотехнологій захисту навколишнього середовища, розділення і збагачення полімінеральних залізоалюмооксидносилікатних рудних матеріалів, модифікування властивостей пелітових осадів (пелюїдів) для реабілітаційної медицини і курортології.*

**Ключові слова:** фізико-хімічна механіка, гірські породи, руди, пелюїди, механохімічні, нанохімічні, мікробіологічні процеси.

Минуло вже 35 років з того часу, як геологічний і геохімічний напрями розвитку колоїдної науки в галузі механічних, мікробіологічних і нанохімічних міжфазних контактних взаємодій було визначено як фізико-хімічну геомеханіку гірських порід і дисперсних матеріалів. У цій статті стисло описано найголовніші особливості фізико-хімічної геомеханіки, розкрито теоретичне і практичне значення фундаментальних і прикладних результатів, отриманих в Інституті біолоїдної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України, для розвитку основ біолоїдної хімії, біогеохімії, колоїдних біогеотехнологій захисту навколишнього середовища, великомасштабних технологій збагачення і розділення полімінеральних осадкових алюмо- та залізооксидносилікатних рудних матеріалів, модифікування властивостей пелюїдів (лікувальних грязей) у реабілітаційній медицині і курортології.

На початку 1980-х років фахівці вперше звернули увагу на неординарні досягнення фізико-хімічної механіки як розділу колоїдної хімії та її роль у вивченні геологічних і геохімічних процесів [1–7]. Відповідно геологічний і геохімічний напрями розвитку досліджень у галузі механічних, мікробіологічних і нанохімічних міжфазних контактних взаємодій у природних і техногенних умовах було визначено як фізико-хімічну геомеханіку гірських порід і дисперсних матеріалів [2, 8, 9]. Ця суміжна галузь ґрунтується на основних положеннях наукового відкриття № 28, опублікованого в 1964 р. і відомого як ефект Ребіндера [6, 7]. Аналіз основних етапів її становлення свідчить, що вона набула розвитку в Інституті біологічної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України, насамперед у відділі фізико-хімічної геомеханіки природних дисперсних систем [8–25].

Уперше фізико-хімічна геомеханіка як науковий напрям була сформульована в 1981 р. [9] з подальшим її уточненням у роботах [10–28]. Цей самостійний розділ науки аналізує геологічні та геохімічні процеси, встановлюючи передусім вплив механічних, фізико-хімічних, колоїдно-хімічних та нанохімічних факторів на межі поділу фаз на властивості твердих тіл, у тому числі поширених алюмо- і залізо-оксидно-силікатних та інших гірських порід і дисперсних матеріалів. Фізико-хімічна геомеханіка використовує експериментальні методи фізико-хімічної механіки, які дають змогу вивчати закономірності механічних і структурних процесів на рівні нано- і ультрадисперсного стану природних і техногенних матеріалів, але оскільки закони її попередниці — фізико-хімічної механіки справедливі для твердих тіл будь-якої природи і структури, ці методи можна застосовувати для досліджень перебігу процесів набагато ширшого спектру матеріалів. При цьому постає завдання встановлення адекватності цих процесів спостережним геологічним явищам.

Поряд з цим у фізико-хімічній геомеханіці розробляють і використовують спеціальні геологічні методи, причому особливу роль відіграє моделювання геологічних процесів [1–5,

8, 12, 15–20]. Перші спроби розглянути технологічні і техногенні процеси з позицій фізико-хімічної геомеханіки і екології було зроблено в роботах [11, 13, 14].

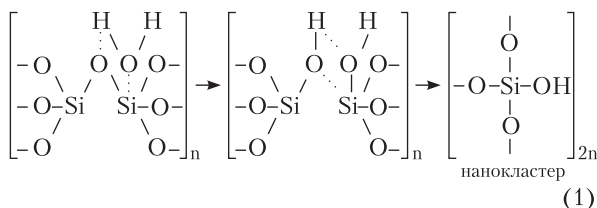
Найбільшим досягненням у період становлення фізико-хімічної геомеханіки слід вважати розвиток фундаментальних досліджень щодо впливу води на механохімічні властивості, дисперсну структуру і диспергування гірських порід [10, 11, 17, 19, 20]. Хоча уявлення про виняткову роль води в природних процесах сформувалися ще в давнину, на її геологічну роль звернули увагу лише в ХХ ст., розглядаючи її з двох точок зору — хімічної (геохімія) і механічної (механіка гірських порід) [21]. Умовність такого розмежування очевидна. Механічні властивості гірських порід аж до кінця ХХ ст. розглядали без урахування фізико-хімічного впливу середовища, адже інтеграція в науку про Землю досягнень інших природничих наук відбувалася поступово, в міру розвитку їх фундаментальних основ. Отже, впровадження фізико-хімічної геомеханіки твердих тіл і дисперсних систем у геологію, біогеохімію, біогеотехнологію почалося не так вже й давно [7–12, 16, 17, 19–21, 23–26].

Вода є поширеним компонентом гірських порід, які, як правило, перебувають у полідисперсному нано- і мікрозернистому стані і зазнають спільного впливу механічних напружень і рідких середовищ, тому роль води в таких процесах є надзвичайно важливою. При цьому ані висока розчинність пороудоформуювальних мінералів, ані значні об'єми рідкого середовища не є обов'язковими для прояву механічних ефектів, зумовлених нанохімічними процесами при взаємодії води з поверхнею порід [21]. Обов'язкова умова полягає в наявності розвиненої поверхні контактів між нано- і мікрозернами полімінеральної структури та пов'язаною з нею великою контактною поверхнею порід, утвореною внутрішніми мікро- і нанорозмірними межами поділу фаз різного мінералогічного складу [9–11, 17, 19, 20].

Ці принципи значно розширюють спектр геологічних і геохімічних явищ, у яких вода може бути активним компонентом дисперга-

ційних процесів. Наприклад, до них належить багато процесів деформації і руйнування поширених у земній корі алюмосилікатних і залізооксидносилікатних порід, які містять незначну кількість води в міжкристалічних прошарках. При цьому ефективна концентрація води, тобто її термодинамічна активність, істотно залежить як від кількості, так і від хімічної природи розчинених у ній компонентів. Так, нещодавно з використанням уявлень нанонауки експериментально було показано [27, 28], що невелика кількість (0,05–0,1%) розчинених у воді лужних силікатних нанокластерів може на кілька порядків збільшити диспергувальну активність води щодо гірських матеріалів різної природи, зокрема алюмо- і залізооксидносилікатних, унаслідок впливу як механічних зовнішніх напружень, так і самодиспергування (внутрішні напруження).

В основі механохімічного і на노хімічного самодиспергування гірських порід за участю води лежить кілька основних механізмів, серед яких передусім слід розглянути механізм гідролітичного руйнування силікатних зв'язків силікатних матеріалів [10]:



Під впливом механічних сил нанохімічна реакція (1) різко прискорюється [28], що, у свою чергу, полегшує процес розвитку нанотріщин руйнування в силікатній породі за присутності навіть слідів води. Частота розриву зв'язків у вершині тріщини і швидкість її зростання ( $V$ ) пов'язані з доданим механічним зусиллям таким чином [25]:

$$V = V_0 e^{-(U_0 - \gamma P) / RT}; \quad V_0 \approx vb, \quad (2)$$

де  $v$  – дебаївська частота коливань;  $\gamma$  – активіційний об'єм, що включає фактор перенапружень  $(c/b)^{1/2}$ ;  $c$  – розмір тріщини;  $b$  – параметр кристалічної ґратки;  $U_0$  – енергія активіції процесу за  $P = 0$ .

Для геології і геохімії дуже важливим є вивчення такого механізму руйнування гірських порід за присутності води і водних розчинів, оскільки він визначає багато процесів диспергування гірських порід у зонах метаморфізму, гіпергенезу, а також фізикохімію і механохімію складних тектонічних процесів, наприклад землетрусів. Так, у роботі [29] на модельному прикладі навантаженого стисканням гранодіориту було показано, що протягом місяця відбулося диспергування зразка практично на 10%. При цьому нанотріщини з початковими розмірами 10–100 нм розрослися до тріщин, розміри яких варіювали від мікрметра до часток міліметра з максимумом 200 мкм.

Спочатку механізм гідролітичного руйнування силікатних зв'язків силікатних матеріалів, викладений у публікаціях [9, 11, 17, 19–21], розглядався як найбільш характерний для кварцевмісних порід. Однак пізніше було показано, що реакція (1) та інші нанохімічні реакції за участю води відіграють істотну роль у хімічних процесах у різних гірських породах, насамперед алюмо- та залізооксидносилікатних [27, 28]. Тому варто детально розглянути один із центральних механізмів руйнування силікатних порід за участю води і водних розчинів – механізм проникнення рідких фаз по міжзеренних наномежах. Подібний процес вважається одним із найважливіших шляхів диспергування більшості гірських порід, основу яких становлять алюмо- та залізооксидносилікатні мінерали [10].

Крім того, причиною, яка змушує рідину самовільно просочуватися крізь спочатку практично безпористі щільні полімінеральні гірські породи в процесах їх метаморфізму або вивітрювання, називали енергетичний вигравш у разі заміни межі зерна наноплівкою рідини. Цей загалом бездоганий з погляду термодинаміки висновок у подальшому, з розвитком нанохімії і розумінням ролі наночастинок у контактних взаємодіях у дисперсних полімінеральних гірських породах, було уточнено [27, 28]. Показано, що для запуску практично будь-якого процесу механічного руйнування гірських порід необхідна хімічна взаємодія

води з силікатними породами на нанорівні, зокрема реакція (1). Отже, на початкових стадіях процес механічного диспергування гірських порід починається з розглянутого вище гідролітичного руйнування силікоксанових зв'язків і утворення принаймні нанотріщин, згідно з рівнянням (2). Далі, відповідно до умови Гіббса—Сміта [10, 21] міжзеренні межі між кристалами А і В заміщуються рідиною С:

$$\sigma_{МЗ} > \sigma_{АС} + \sigma_{ВС}. \quad (3)$$

При цьому енергія межі зерна виявляється більшою від суми поверхневих енергій на межі кристалів з рідкою фазою (у нашому випадку з водою або водними розчинами). В результаті на сполучених площинах відбувається процес реконструкції поверхні за допомогою хімічних реакцій [27, 28], а зростаючі при цьому фасетки (грані), впираючись у сусідні зерна, кристалізаційним тиском розривають матеріал на межі зерен. При цьому тріщина на межі зерен розширюється за стрибкоподібним механізмом [10, 28, 30], і якщо середнє число проникних меж перевищує 1/3, то процес триває безперервно і описується лінійно-параболічним рівнянням:

$$AL + BL^2 = t, \quad (4)$$

де  $t$  — час, за який фронт проникнення рідких прошарків віддалиться від джерела рідини на відстань  $L$  вглиб полікристалічної породи [27, 28]. Лінійна частина рівняння (4) визначається кінетикою зростання кристалізаційного тиску  $P_{кр}$ :

$$A = \delta RT / D_{ТЖ} C_0 P_{кр} \omega, \quad (5)$$

де  $\delta$  — середній розмір зерна;  $R$  — газова стала;  $T$  — температура;  $D_{ТЖ}$  — коефіцієнт дифузії речовини зерна в рідині;  $C_0$  — концентрація рідини в мольних частках;  $\omega$  — молярний об'єм. Параболічна частина рівняння (4) визначається лімітуючим процесом в'язкої течії рідини в проміжку зерен породи, товщина якого зазвичай становить 10–100 нм. Слід звернути увагу на передбачення авторів робіт [9, 10], датованих 1981 і 1984 р., в яких уперше наведено розмір проміжку 10–100 нм, про роль майбутньої нанонауки, зокрема в колоїдній хімії та фізико-хімічній геомеханіці, задовго до загального визнання цієї науки на початку 2000-х років [27, 31].

Застосування рівняння Пуазейля дає для величини  $B$  у рівнянні (4) такий вираз [10]:

$$B = 12\eta/\delta P_{кр}, \quad (6)$$

де  $\eta$  — в'язкість рідини. Причому величину  $1/B$  розглядають як ефективний (умовний) коефіцієнт дифузії. Оцінки  $1/B$ , які узгоджуються з експериментом, дають значення на рівні  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с, що на багато порядків перевищує коефіцієнт дифузії в твердих тілах, унаслідок в'язкої течії рідини по нанотріщинах відповідно до законів фізико-хімічної геомеханіки.

У геологічному і технологічному аспектах встановлене явище, яке належить до сфери інтересів фізико-хімічної механіки і геомеханіки, видається вельми істотним з таких причин. По-перше, при аналізі рівнянь (4)–(6) та під час їх експериментальної перевірки [9, 10] показано, що на великих глибинах за підвищених температур у полікристалічній породі межі зерен розділяються нанопрошарками рідкої фази (води або водних розчинів), яка може мігрувати (просочуватися) до поверхні Землі під дією капілярних явищ і різниці у щільності рідини і вміщуючої породи. Зрозуміло, що високі тиски ще більше сприятимуть перебігу процесу просочування рідини. По-друге, автори робіт [9, 10] під час їх написання не могли передбачити, що в майбутньому встановлене ними явище виявиться важливим не лише для розвитку фізико-хімічної геомеханіки, а й для екобезпеки процесів видобутку нафти, природного і сланцевого газу. Дійсно, просочування закачанної рідини при видобутку нафтопродуктів з глибин у кілька кілометрів до поверхні Землі, навіть через щільні породи, виявляється реально можливим. Тим більше, що в більш пізній роботі [28] було показано, що в пористих дисперсних матеріалах такий процес може відбуватися на багато порядків швидше, ніж у щільних породах, і вимірюватися годинами, а не роками. З іншого боку, в роботі [10] обговорюється експериментально доведений метод боротьби з таким небажаним явищем просочування рідини, важливим для майбутніх технологій видобутку нафтопродуктів. Показано, що для запобігання процесам збиральної рекристалізації гірських

порід і просочування крізь них рідини необхідно і достатньо, щоб породи містили не менш як чотири мінерали, які за цих умов мають бути в рівновазі один з одним.

Нарешті, обговорюване явище проникнення рідких фаз по міжзеренних межах гірських порід пояснює підвищену проникність гірських порід за температур, близьких до 400 °С. Це зумовлено тим, що з підвищенням температури міжзеренна енергія зменшується незначно, а енергія на межі мінерал—водний розчин істотно знижується. Тому зі зростанням температури настає такий стан, коли починає виконуватися умова Гіббса—Сміта (3) і виникає можливість самодиспергування гірської породи.

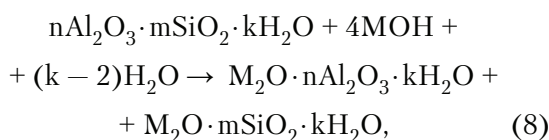
Крім розглянутих процесів руйнування силікатних систем під дією води і процесів проникнення рідких фаз по міжзеренних межах можливе квазісамовільне (нанохімічне) диспергування щільних гірських порід під впливом води і водних розчинів [10], а також набагато інтенсивніше природне і техногенне диспергування пористих матеріалів у поверхнево-активних середовищах [27, 28].

Аналіз цього механізму з точки зору нанохімічного диспергування і фізико-хімічної геомеханіки показав, що для полідисперсних пористих залізооксидносилікатних і алюмосилікатних порід при накладанні зовнішнього механічного навантаження, а також наявності слаболужних значень рН водних розчинів процес диспергування може повністю закінчуватися через кілька годин, тобто прискорюватися на кілька порядків. При цьому його кінетика підпорядковується рівнянню:

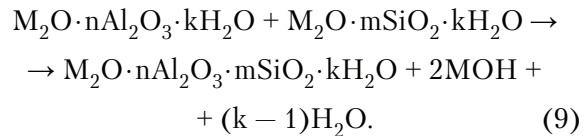
$$(S - S_0)^2 = kt, \quad (7)$$

де  $S_0$  — початкова питома поверхня пористого тіла [27, 28].

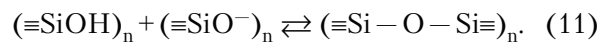
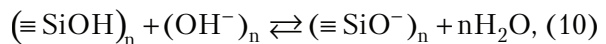
Нанохімічні процеси, поряд з реакцією (1), можуть відбуватися в нанотріщинах з розмірами 10–100 нм відповідно до рівнянь (8) і (9) [27, 28]:



а продукти реакції (8) далі реагують за схемою:



Утворений за реакцією (9) кристалогідрат має більший об'єм, ніж вихідний продукт, який бере участь у реакції (8). Тому кристалізаційний тиск, що виникає при цьому, розриває (хімічно розклинює) тріщину, чому симбатно сприяє зовнішнє механічне навантаження. Вода, яка надходить у розширене до мікрометрів устя тріщини, гідролітично руйнує продукт реакції (9) з вивільненням луку, який дифундує у вигляді розчину в новостворену вторинну нанотріщину. Процес відбувається так само, як і в разі проникнення рідких фаз по міжзеренних межах, проте на кілька порядків швидше і триває вже не роки, а години. Цьому також сприяють нанохімічні взаємодії, які доповнюють взаємодії (1), (8) і (9) і характеризуються реакціями [27]:



Нанохімічна реакція (11) є реакцією полімеризації і приводить до утворення полісилікатних нанокластерів на поверхні тріщини, а вивільнені гідроксильні іони беруть участь у реакції (8) або (10). Отже, реакції (10) і (11) не тільки доповнюють реакцію (1), а й є проміжними у процесах (8) і (9), а колоїдно-хімічні міжфазні взаємодії, які відбуваються на нанорівні на твердій поверхні нанотріщин силікатної породи, тісно пов'язані з хімічними перетвореннями в об'ємі дисперсійного середовища, що супроводжуються формуванням кристалогідратів. Процес відбувається стрибкоподібно, що було показано експериментально на модельній системі залізоалюмосилікат—лужний компонент [32]. Наведені на рис. 1 результати свідчать, що стрибкоподібний процес найінтенсивніше відбувається в умовах низької рухливості пористої дисперсної породи,

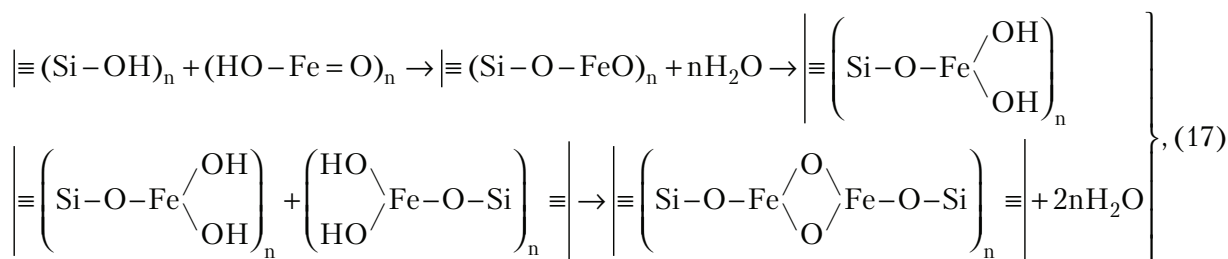
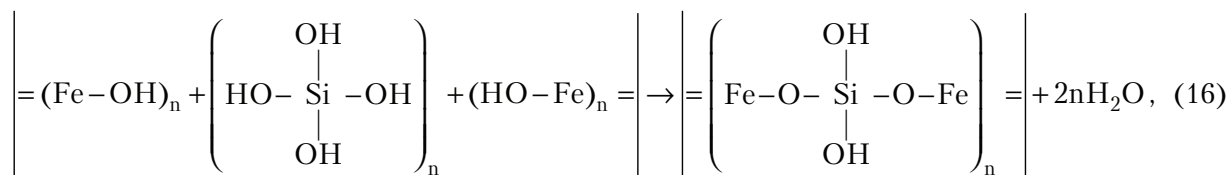
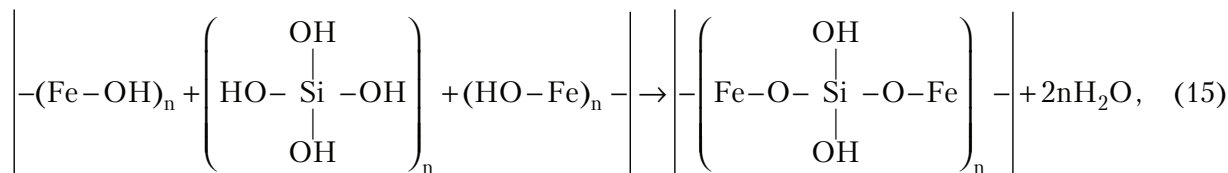
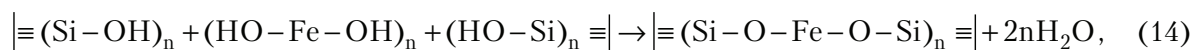
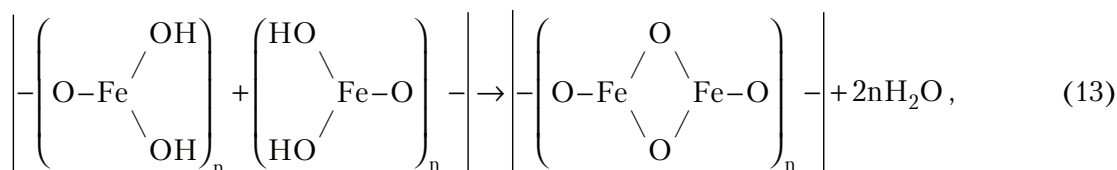
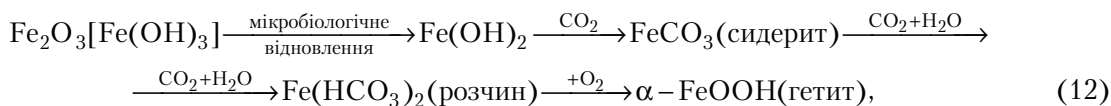


тоді як з підвищенням швидкості пластичної течії стрибкоподібний процес поступово нівелюється.

Міжфазні нанохімічні взаємодії на контактній поверхні силікатних і алюмосилікатних мінералів, яким відповідають головні хімічні процеси (1), (8)–(11), в залізооксидносилікатних мінералах, що входять до складу рудних матеріалів і лікувальних донних пелагічних осадів (пелоїдів), мають додаткові більш

складні особливості [33–35]. Наведені моделі (12)–(17) міжфазних контактних взаємодій поверхонь залізооксидносилікатних мінералів у складі залізооксидносилікатних рудних матеріалів і пелоїдів дозволяють детальніше оцінити нанокластерні механізми таких взаємодій.

Як бачимо з моделей (13)–(17), міжфазні взаємодії супроводжуються утворенням нанокластерних коагуляційно-конденсаційних зв'язків між поверхнями однакових або різних дис-



де (...)n – нанокластер.

перших фаз, що спричинює ущільнення раніше диспергованих залізооксидносилікатних матеріалів. Такі механізми контактних взаємодій свідчать про те, що за участю  $\text{Fe}^{3+}$  міжфазні взаємодії міцніші, ніж за участю  $\text{Fe}^{2+}$ , оскільки в останньому випадку, характерному для моделей (14) і (15), можливе окиснення  $\text{Fe}^{2+}$  до  $\text{Fe}^{3+}$  і розрив міжфазних зв'язків  $-\text{O}-\text{Fe}-\text{O}-$  з утворенням гетиту згідно з моделлю (12).

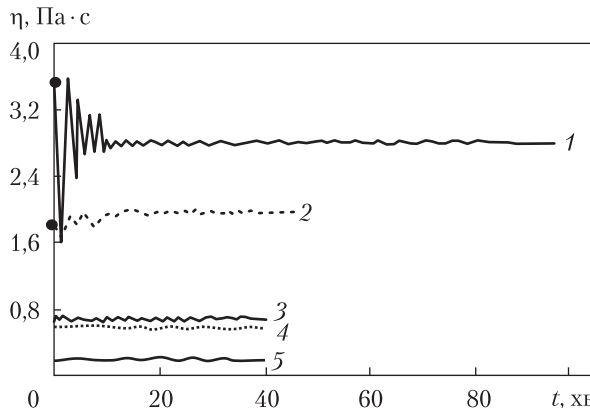
Цей висновок підтверджується також при аналізі багатоступеневого процесу (17) участі гетиту в контактних взаємодіях дисперсних фаз, оскільки цей процес за швидкості перебігу поступається одноступеневим взаємодіям згідно з модельними схемами (13) і (16).

Крім розглянутих механізмів реалізації ефекту Ребіндера в земній корі, за певних умов (незначні швидкості деформації) можливе пластифікування (повзучість) залізооксидносилікатних гірських порід [21]. Повзучість може відбуватися за двома напрямками. По-перше, під дією ПАР швидкість повзучості може збільшуватися на кілька порядків, що визначається зростанням структурного фактора ( $\gamma$ ) в рівнянні (2). По-друге, якщо виконується умова Гіббса—Сміта (3), то можлива реалізація специфічного і ефективного механізму, за яким механічно напружені ділянки, що мають надлишковий хімічний потенціал, розчиняються, а розчинена, або хімічно перетворена речовина, осідає на інших напружених ділянках. Теоретичні та експериментальні дослідження цього процесу показали, що швидкість повзучості в умовах перекристалізації описується модифікованим рівнянням (5) [10, 21]:

$$v = D_{\text{TЖ}} \omega P c_0 \delta / RT d^2, \quad (18)$$

де  $d$  — середній розмір зерна в полікристалі.

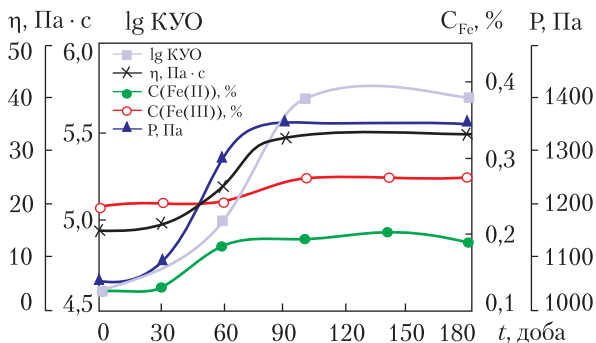
Отримані результати дозволили використувати методи фізико-хімічної геомеханіки в аналізі рудогенних і технологічних процесів за участю гірських порід. Основною метою фізико-хімічної геомеханіки рудогенезу слід вважати встановлення закономірностей і механізмів послідовних змін структурно-механічних властивостей гірських порід в умовах перебігу складних поліхронних рудогенних



**Рис. 1.** Кінетика процесу в залізоалюмосилікатній породі, що супроводжується перебігом реакцій (8) і (9), за швидкостей зсуву ( $\text{с}^{-1}$ ): 1 — 1,0; 2 — 1,8; 3 — 3,0; 4 — 27,0; 5 — 81,0

процесів залежно від типу поверхневих взаємодій на межі поділу фаз (міжфазних взаємодій), хімічного складу і структури полімінерального рудного матеріалу, температури і характеру напруженого стану. При цьому з погляду фізико-хімічної геомеханіки найцікавішими є численні природні і техногенні залізооксидносилікатні та металічні дисперсні системи, в яких поверхневі фізико-хімічні та хімічні процеси і взаємодії, що визначають їх ліофільність/ліофобність, відіграють основну роль. До таких процесів і взаємодій належать нанохімічні, мікробіологічні, реологічні, механічні, механохімічні, адсорбційні, контактні адгезійно-когезійні процеси і поверхневі міжфазні взаємодії. Розвиток цього наукового напрямку в останні роки не лише сприяв точнішому розумінню механізмів рудогенезу в твердих, осадових і пористих гірських породах і дисперсних матеріалах, а й зумовив розвиток відповідних ефективних технологій їх трансформацій, переробки і використання у великомасштабних виробничих процесах.

Найбільшого розвитку в цьому напрямі набули дослідження біоколоїдних, мікробіологічних і біохімічних процесів, основаних на використанні явища вибіркової гетерокоагуляції мінеральних речовин з мікроорганізмами, висвітлені в роботі [26], а також процесів,



**Рис. 2.** Залежності в'язкості ( $\eta$ ), напруження зсуву ( $P$ ), концентрації ( $C$ , %)  $Fe^{2+}$  ( $C(FeII)$ ) і  $Fe^{3+}$  ( $C(FeIII)$ ) та кількості колонієутворюючих організмів ( $lgKCO$ ) у морських пелагічних осадах від часу їх витримки за вологості 46 %

**Фізико-хімічні показники морських пелагічних осади за вологості 46 %**

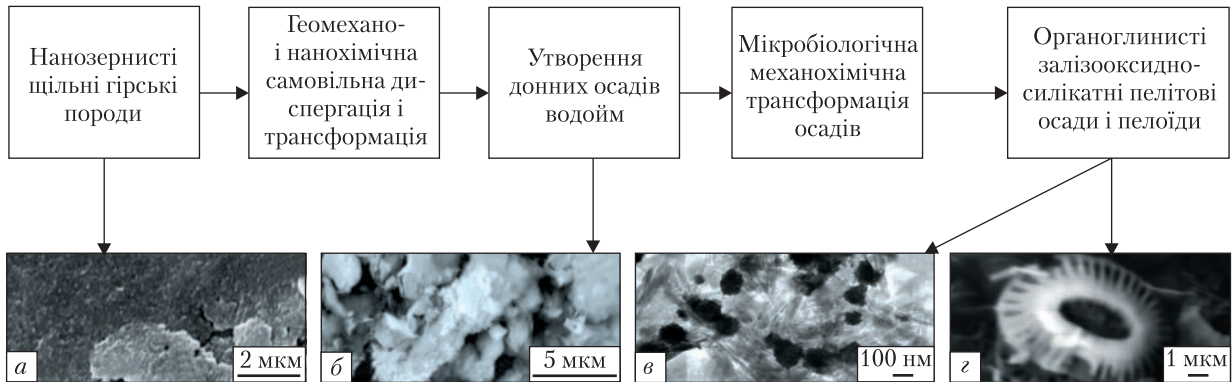
Показник	Витримка, діб				
	0	10	30	60	100
pH рідкої фази	7,0	7,1	7,3	7,4	7,4
Напруження зсуву, Па	1030	—	1080	1290	1340
В'язкість, Па · с	15	—	17	24	33
Концентрація частинок розмірами понад 250 мкм, %	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5
Концентрація наночастинок, %	0,1	0,1	0,3	0,4	0,4
$lgKCO$	4,6	—	4,7	5,1	5,7

які розкривають механізми виникнення пелоїдів [33–35] і біогенного формування аутигенних включень металів, зокрема золота, в тонкодисперсних осадах та перекристалізації океанічних конкрецій [15, 17, 22, 36–39]. Подальший розвиток цих напрямів дав змогу оцінити взаємозв'язок мікробіологічних, фізико-механічних і нанохімічних особливостей процесів самодиспергування як щільних, так і подрібнених або пористих гірських порід і похідних від них пелітових осади, пелоїдів та подальшого їх ущільнення в певних умовах [34, 35, 40]. Ці процеси, особливо вторинного

ущільнення, істотно залежать у випадку пелітових осади і пелоїдів від життєдіяльності мікроорганізмів і продуктів їх метаболізму [35, 40]. Утворені, згідно з уявленнями біогеохімії, при селективній взаємодії мікроорганізмів з мінеральними частинками біогеоценози, або біокосні агрегати, трансформуються в ооліти, які є основою осадових рудних родовищ і пелоїдів [26]. Однак, як було нещодавно показано в роботах [34, 35], під дією ПАР, як продуктів метаболізму, можливі вторинні диспергаційні процеси мінеральних частинок біогеоценозів відповідно до встановлених законів фізико-хімічної геомеханіки. На рис. 2 і в таблиці наведено дані, які підтверджують сумарний вплив мікроорганізмів різних екологічних груп, кількість яких сягає 10 [35], на змінення фізико-хімічних властивостей пелоїдів Чорного моря. Ці дані свідчать, з одного боку, про здатність пелітових осади і пелоїдів відновлювати свою біологічну активність у разі збільшення кількості колонієутворюючих організмів ( $lgKCO$ ). З другого боку, зі зростанням часу витримки пелоїдів підвищуються значення ефективної в'язкості і відповідного напруження зсуву. Це зростання корелює зі зростанням кількості в пелоїді заліза (II), яке утворюється внаслідок життєдіяльності залізовідновних бактерій біогеоценозу (рис. 2), а також корелює зі зростанням кількості наночастинок і зменшенням кількості мікрочастинок (табл.). Такі дані свідчать про те, що життєдіяльність мікроорганізмів у складі біокосних агрегатів приводить до активізації диспергування мінеральної частини пелоїдів згідно з механізмами (1), (8)–(11), а після завершення процесу активації пелоїдів після 90–100 діб – до вторинного ущільнення пелагічних осади згідно з моделями (12)–(17).

Отже, поряд з фізико-хімічними нанохімічними процесами в дисперсних залізооксидно-сілікатних осадах і пелоїдах під дією поверхнево-активних речовин – метаболітів мікроорганізмів активуються біоколідні взаємодії, що впливає на утворення нанодисперсно структурованих органоглинистокарбонатних продуктів, які збагачують донні пелагічні осади





**Рис. 3.** Загальна схема трансформації гірських порід. Микрофотографії нанозернистої гірської породи (а); донних осадів подрібнених гірських порід (б); пелітових органоглинистозалізооксидносилікатних осадків і пелюїдів (в); пелітових осадків з карбонатним залишком *Foraminifera* (г)

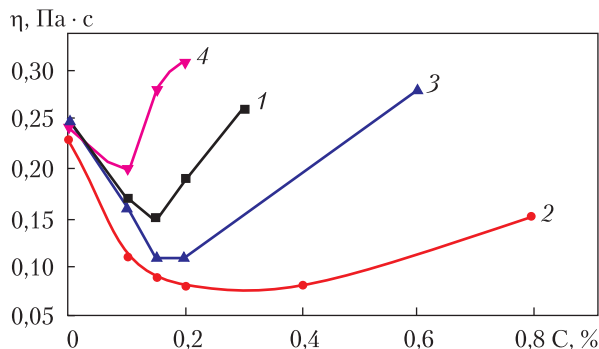
ди і пелюїди органічними речовинами, глинами, оксидами заліза і кальцитом [38–40]. Як наслідок, похідні щільні гірські породи трансформуються в концентровані мазеподібні водонепроникні композиції донних осадів, переважно в морях і океанах. Такі композиції структуровані нано- і мікрочастинками оксидів заліза, глин, карбонатів і органічних речовин, що в результаті реалізації схем (12)–(17) утворюють міцні коагуляційно-кристалізаційні контактні зв'язки. Загальну схему трансформації гірських порід наведено на рис. 3.

Встановлені закономірності дозволили розробити й здійснити цілий ряд технологічних і виробничих процесів, основаних на використанні досягнень фізико-хімічної геомеханіки, біоколоїдної хімії і закономірностях нанохімічних міжфазних взаємодій. Крім процесу вилучення тонкодисперсного золота з гірських порід в Інституті біоколоїдної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка НАН України методами фізико-хімічної геомеханіки вивчають процеси керування фізико-механічними властивостями бар'єрних структур завдяки впливу на них активних середовищ природного і техногенного походження, а також розробляють основи їх колоїдно-хімічного матеріалознавства [26–28].

Як приклад на рис. 4 наведено результати дослідження впливу активних середовищ на реологічні властивості подрібненої глинистої породи, обробленої мікроорганізмами і вико-

ристаної для зниження здатності до просочування мінералізованої води крізь дно водойм, а на рис. 5 – схему бар'єрного захисту реального ставка-накопичувача за допомогою біогео- і нанотехнологій. Після використання такої технології об'єм закачуваної в ставок води, яка містить 30–45 г/дм<sup>3</sup> солей, зріс у 6–7 разів без погіршення технологічних параметрів фільтрації води. Для отримання оптимального ефекту осадкові і донні мінеральні породи було всебічно вивчено методами фізико-хімічної геомеханіки, створено модель мікробіологічного і нанохімічного перетворення донних структур і способи керування нею за допомогою активних добавок, які містять силікатні нанокласти, наночастинки і мікроорганізми [27, 34, 35, 40].

Підбиваючи підсумки короткого аналізу результатів досліджень різних форм прояву ефекту Ребіндера на твердих речовинах різної природи і структури і додаткових експериментальних даних щодо впливу на ці прояви нанохімічних і мікробіологічних процесів, отриманих на гірських породах і дисперсних залізооксидносилікатних матеріалах, слід відзначити науково обґрунтовану можливість досить точного опису багатьох фізико-механічних процесів, що відбуваються в земній корі та в техногенних умовах. Проведені багаторічні дослідження та отримані експериментальні дані дозволили:



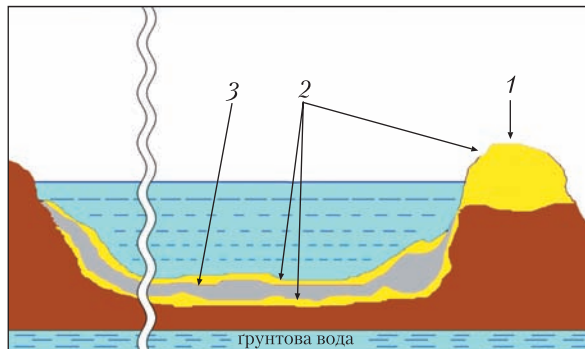
**Рис. 4.** Вплив хімічної будови силікатних нанокластерів на в'язкість 50%-ї водної суспензії подрібненої залізооксидносилікатної глинистої породи залежно від концентрації ( $C$ ) аніонних нанокластерів різного хімічного складу: 1 –  $(\text{Si}_2\text{O}_7^{2-})_n$ ; 2 –  $(\text{Si}_2\text{O}_5^{2-})_n$ ; 3 –  $(\text{SiO}_3^{2-})_n$ ; 4 –  $(\text{SiO}_4^{4-})_n$

- розробити термодинамічні основи, з'ясувати кінетику і механізми метаморфізму гірських порід унаслідок їх самовільного диспергування за участю нанохімічних і мікробіологічних процесів з утворенням нової дисперсної структури з термодинамічно стійкими мінеральними фазами;

- розвинути уявлення про механізми повзучості гірських порід унаслідок перекристалізації механічно напружених ділянок і нанохімічного перенесення по міжзеренних межах речовин рідкої фази на інші напружені ділянки поверхні;

- обґрунтувати термодинамічні умови та кінетику просочування гідротермальних і техногенних вод крізь гірські та осадові породи у міжзеренний і поровий простір;

- визначити екологічні проблеми, пов'язані з процесами буріння глибоких свердловин і видобутку нафтопродуктів;



**Рис. 5.** Схема бар'єрного захисту водойми мінералізованих вод з використанням біогео- і нанотехнологій: 1 – гребля, 2 – бар'єрний щит, 3 – наноструктурований залізооксидносилікатний мікробіологічно активний матеріал

- розкрити основні принципи фізико-механічного і хімічного регулювання властивостей дисперсно-пористих залізооксидносилікатних пелагічних осадів і пелюїдів у природних і техногенних умовах;

- окреслити подальші шляхи розвитку зазначених фундаментальних проблем із застосуванням отриманих закономірностей у геологічних науках, колоїдній і біоколоїдній хімії з метою створення сучасних технологічних процесів для використання в рудовидобувній, металургійній, нафтогазовидобувній, керамічній, будівельній та інших галузях промисловості, у сільському господарстві, у медицині для розроблення нових методик реабілітації і курортного лікування хворих, профілактики гемофілії, створення ранозагоювальних, опіколікувальних і лікувально-косметичних засобів тощо.

REFERENCES  
[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Perzov N.V., Traskin V.Y., Kogan B.S., Ivanova N.I. Destruction of minerals, rocks and other ionic compounds in the presence of liquid surface-active environment. *Phys. Stat. Solid.* 1978. **3**: 86.
2. Kogan B.S., Traskin V.Yu., Pertsov N.V. Physico-chemical mechanics of rock destruction processes. In: *Mathematical models of ore formation processes.* (Moscow: VIMS, 1979). P. 30–41.  
[Коган Б.С., Траскін В.Ю., Перцов Н.В. Фізико-хімічна механіка процесів руйнування гірських порід. В сб.: *Математическіе моделі рудообразовательних процесів.* М.: ВІМС, 1979. С. 30–41.]
3. Pertsov N.V., Serdyuk V.N. Migration of the surfactant assets substances on the new formed surface. *Colloid Journal.* 1980. **42** (5): 991.

- [Перцов Н.В., Сердюк В.Н. Миграция ПАВ по свежееобразованной поверхности. *Коллоид. журн.* 1980. Т. 42, № 5. С. 991–993.]
4. Pertsov N.V., Ovcharenko F.D. Using the achievements of colloid chemistry in geology. *Vistnik Akademii Nauk.* 1980. **1**: 97.  
[Перцов Н.В., Овчаренко Ф.Д. Использование достижений коллоидной химии в геологии. *Вестн. АН СССР.* 1980. № 1. С. 97–98.]
  5. Pertsov N.V., Kogan B.S., Balashov V.N. Model fissure intrusions of magma in a manifestation of the effect of lowering the stripping strength of rock. *Doklady Akademii Nauk.* 1977. **235** (6): 1375.  
[Перцов Н.В., Коган Б.С., Балашов В.Н. Модель трещинных интрузий магмы в условиях проявления эффекта десорбционного понижения прочности горных пород. *ДАН СССР.* 1977. Т. 235, № 6. С. 1375–1378.]
  6. Pertsov N.V., Pertsov A.V., Mirkin L.N., Schukin E.D. About spontaneous dispersion in a strong reduction of free interfacial energy. *Doklady Akademii Nauk.* 1964. **158** (5): 1166.  
[Перцов Н.В., Перцов А.В., Миркин Л.Н., Щукин Е.Д. О самопроизвольном диспергировании в условиях сильного понижения свободной межфазной энергии. *ДАН СССР.* 1964. Т. 158, № 5. С. 1166–1170.]
  7. Pertsov N.V., Goryunov Yu.V., Summ B.D. *Rehbinder effect.* (Moscow: Nauka, 1966).  
[Перцов Н.В., Горюнов Ю.В., Сумм Б.Д. *Эффект Ребиндера.* М.: Наука, 1966.]
  8. Pertsov N.V., Ovcharenko F.D. Colloidal chemistry and physico-chemical mechanics of the crust. In: *Physico-chemical mechanics and lyophilic of disperse systems.* (Kyiv: Naukova Dumka, 1981). P. 3–5.  
[Перцов Н.В., Овчаренко Ф.Д. Коллоидная химия и физико-химическая механика земной коры. *Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем.* К.: Наук. думка, 1981. Вып. 13. С. 3–5.]
  9. Pertsov N.V., Kogan B.S. Physico-chemicals geomechanics. In: *Physico-chemical mechanics and lyophilic of disperse systems.* (Kyiv: Naukova Dumka, 1981). P. 53–65.  
[Перцов Н.В., Коган Б.С. Физико-химическая геомеханика. В кн.: *Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем.* К.: Наук. думка, 1981. Вып. 13. С. 53–65.]
  10. Pertsov N.V., Kogan B.S. Physico-chemical mechanics and lyophilic of natural systems. In: *Physico-chemical mechanics and lyophilic of disperse systems.* (Kyiv: Naukova Dumka, 1984). P. 71–78.  
[Перцов Н.В., Коган Б.С. Физико-химическая механика и лиофильность природных систем. В кн.: *Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем.* К.: Наук. думка, 1984. Вып. 16. С. 71–78.]
  11. Pertsov N.V. Physico-chemical influence of the environment on the destruction of rocks. In: *Physico-chemical mechanics of natural disperse systems.* (Moscow: MGU, 1985). P. 107–117.  
[Перцов Н.В. Физико-химическое влияние среды на разрушение горных пород. В кн.: *Физико-химическая механика природных дисперсных систем.* М.: Изд-во МГУ, 1985. Вып. 17. С. 107–117.]
  12. Pertsov N.V., Vakar N.G., Ivanova N.I. Physical and mechanical properties when it is deformed marble in the presence of aqueous solutions of surfactants. In: *Physical basis of prediction of rock failure.* (Frunze, 1985). P. 39–40.  
[Перцов Н.В., Вакар Н.Г., Иванова Н.И. Физико-механические свойства мрамора при его деформировании в присутствии водных растворов ПАВ. В кн.: *Физические основы прогнозирования разрушения горных пород.* Фрунзе: ИЛИМ, 1985. Вып. 17. С. 39–40.]
  13. Pertsov N.V., Ovcharenko F.D. The use of surfactants in mining. In: *Physico-chemical mechanics and lyophilic of disperse systems.* (Kyiv: Naukova Dumka, 1986). P. 3–5.  
[Перцов Н.В., Овчаренко Ф.Д. Применение ПАВ в горной промышленности. В кн.: *Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем.* К.: Наук. думка, 1986. Вып. 18. С. 3–5.]
  14. Pertsov N.V., Ovcharenko F.D. Mechanisms of action of surfactants in the destruction of rocks. In: *Physico-chemical mechanics and lyophilic of disperse systems.* (Kyiv: Naukova Dumka, 1986). P. 5–11.  
[Перцов Н.В., Овчаренко Ф.Д. Механизмы действия ПАВ при разрушении горных пород. В кн.: *Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем.* К.: Наук. думка, 1986. Вып. 18. С. 5–11.]
  15. Ulberg Z.R., Pertsov N.V., Ovcharenko F.D., Garbara S.A., Kogan B.S., Kiselev V.P. Biogeochemical forming of metal zones in coastal fine sediments. *Dopovidi of Academy of Sciences of Ukraine. B.* 1986. (1): 44.  
[Ульберг З.Р., Перцов Н.В., Овчаренко Ф.Д., Гарбара С.А., Коган Б.С., Киселев В.П. Биогеохимическое формирование металлоносных зон в прибрежных тонкодисперсных осадках. *ДАН УССР.* 1986. Сер. Б, № 1. С. 44–48.]
  16. Pertsov N.V., Ivanova N.I., Vakar N.G. Study of the adsorption of surfactants on calcite from aqueous solutions. *Colloid Journal.* 1987. **49** (1): 148.

- [Перцов Н.В., Иванова Н.И., Вакар Н.Г. Изучение адсорбции ПАВ на кальците из водных растворов. *Коллоид. журн.* 1987. Т.49, № 1. С. 148–150.]
17. Ovcharenko F.D., Pertsov N.V., Obushenko I.M., Topkina N.M. Recrystallization of oceanic nodules. *Dopovidi of Academy of Sciences of Ukraine. B.* 1987. (10): 42.  
[Овчаренко Ф.Д., Перцов Н.В., Обушенко И.М., Топкина Н.М. Перекристаллизация океанических конкреций. *ДАН УССР.* 1987. Сер. Б., № 10. С. 42–45.]
  18. Pertsov N.V., Ivanova N.I., Vakar N.G. Effect of adsorption of surfactants on natural calcite solubility. *Russian Journal of Applied Chemistry.* 1987. **60**(7): 1504.  
[Перцов Н.В., Иванова Н.И., Вакар Н.Г. Влияние адсорбции поверхностно-активных веществ на растворимость природного кальцита. *Журнал прикладной химии.* 1987. Т. 60, № 7. С. 1504–1508.]
  19. Traskin V.Yu., Pertsov N.V., Skvortsova Z.N. The contact between adhesive strength and adhesive work of water in polymineral disperse systems. In: *Surface films.* (Moscow: MGU, 1988). P. 211.  
[Траскин В.Ю., Перцов Н.В., Скворцова З.Н. Связь адгезионной прочности и работы адгезии воды в полиминеральных дисперсных системах. В кн.: *Поверхностные плёнки.* (М.: МГУ, 1988). С. 211–219.]
  20. Traskin V.Yu., Pertsov N.V. Colloid chemistry of the earth's crust. In: *Colloid chemistry and scientific and technical progress.* (Moscow: Nauka, 1988). P. 67.  
[Траскин В.Ю., Перцов Н.В. Коллоидная химия земной коры. В кн.: *Коллоидная химия и научно-технический прогресс.* М.: Наука. 1988. С. 67–84.]
  21. Traskin V.Yu., Pertsov N.V., Kogan B.S. Influence of water on the mechanical properties and disperse structure of rocks. In: *Water in disperse systems.* (Moscow: Nauka, 1989). P. 83.  
[Траскин В.Ю., Перцов Н.В., Коган Б.С. Влияние воды на механические свойства и дисперсную структуру горных пород. В кн.: *Вода в дисперсных системах.* М.: Наука. 1989. С. 83–101.]
  22. Ulberg Z.R., Pertsov N.V., Nechaev S.V., Stepanenko V.G. Silicate bacteria in the microbiological processes of metals extraction from ores. *Dopovidi of Academy of Sciences of Ukraine. B.* 1990. (5): 80.  
[Ульберг З.Р., Перцов Н.В., Нечаев С.В., Степаненко В.Г. Силикатные бактерии в микробиологических процессах извлечения металлов из руд. *ДАН УССР.* 1990. Сер. Б, № 5. С. 80–84.]
  23. Pertsov N.V., Traskin V.Yu. Reh binder effect in nature. In: *The success of colloid chemistry and physicochemical mechanics.* (Moscow: Nauka, 1992). P. 155.  
[Перцов Н.В., Траскин В.Ю. Эффект Ребиндера в природе. В кн.: *Успехи коллоидной химии и физико-химической механики.* М.: Наука. 1992. С. 155–165.]
  24. Pertsov N.V., Traskin V.Yu., Skvortsova Z.N., Bryuhanova L.S. Fracture Mechanics cohesive border with different concentrations of alien inclusions. In: *The success of colloid chemistry and physicochemical mechanics.* (Moscow: Nauka, 1992). P. 222.  
[Перцов Н.В., Траскин В.Ю., Скворцова З.Н., Брюханова Л.С. Механика разрушения когезионной границы с различной концентрацией инородных включений. В кн.: *Успехи коллоидной химии и физико-химической механики.* М.: Наука. 1992. С. 222–228.]
  25. Pertsov N.V. The Reh binder Effect in the Earth's Crust (Physicochemical Geomechanics). *Colloid Journal.* 1998. **60**(5): 578.  
[Перцов Н.В. Эффект Ребиндера в земной коре (физико-химическая механика). *Коллоид. журн.* 1998. Т. 60, № 5. С. 629–640.]
  26. Prokopenko V.A., Kovzun I.G., Ulberg Z.R. The creative potential of scientific discovery. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2014. (10): 52. <https://doi.org/10.15407/visn2014.10.052>  
[Прокопенко В.А., Ковзун И.Г., Ульберг З.Р. Созидательный потенциал научного открытия. *Вісник НАН України.* 2014. № 10. С. 52–61.]
  27. Kovzun I.G., Protsenko I.T., Pertsov N.V. Contribution of Chemical and Physical Processes to the Formation of Alkaline Silicate Suspensions and Their Properties. *Colloid Journal.* 2001. **63**(2): 191.  
[Ковзун И.Г., Проценко И.Т., Перцов Н.В. Роль химических и физико-химических процессов при получении и формировании свойств силикатных суспензий. *Коллоид. журн.* 2001. Т. 63, № 2. С. 214–219.]
  28. Kovzun I.G., Pertsov N.V. Colloid Chemistry Process Contact Self-organization in Alkaline Silicate Composites and Relation to Formation of Nanosized Surface Structures. In: *Nanoscience Colloidal and Interfacial Aspects.* (London-New York: Taylor and Francis Group, 2010). P. 523–568. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.07.003>

29. Ivanova N.I. The microcracks study of mechanically intense of quartz diorite in the presence of aqueous phases. In: *Physico-chemical mechanics and lyophilic of disperse systems*. (Kyiv: Naukova Dumka, 1981). P. 111.  
[Иванова Н.И. Изучение микротрещиноватости механически напряжённого кварцевого диорита в присутствии водных фаз. В кн.: *Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем*. К.: Наук. думка, 1981. Вып. 13. С. 111–114.]
30. Kovzun I.G., Pertsov N.V., Protsenko I.T. Jumpwise development of the processes with the participation of colloidal systems. *Colloid Journal*. 2002. **64**(3): 312.
31. Sergeev G.B. *Nanochemistry*. (Moscow: MGU, 2003). P. 288.  
[Сергеев Г.Б. *Нанохимия*. М.: Изд-во МГУ, 2003.]
32. Kovzun I.G., Koryakina E.V., Protsenko I.T., Pertsov N.V. Colloid-chemical processes in the hardening of alkaline compositions based on aluminum silicates and impurities. II. Rheological studies. *Colloid Journal*. 2003. **65**(5): 589.  
[Ковзун И.Г., Корякина Е.В., Проценко И.Т., Перцов Н.В. Коллоидно-химические процессы в твердеющих щелочных композициях на основе алюмосиликатов и шлаков. II. Реологические исследования. *Коллоид. журн.* 2003. Т. 65, № 5. С. 643–647.]
33. Nikipelova O.M. Colloid-chemical properties of silt peloid and basic principles of their regulation. Dr. (Chemistry) thesis. Kyiv, 2011.  
[Нікіпелова О.М. Колоїдно-хімічні властивості мулових пелоїдних систем та основні принципи їх регулювання: дис. ... д-ра. хім. наук. Київ, 2011.]
34. Panko A.V., Kovzun I.G., Ulberg Z.R., Oleinik V.A., Nikipelova E.M., Babov K.D. Colloid-chemical modification of peloids with nano- and microparticles of natural minerals and their practical use. In: *Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies and Applications*. (Springer, 2016). P. 163. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56422-7>
35. Oleinik V.A., Panko A.V., Kovzun I.G., Prokopenko V.A., Ablets E.V., Zuganovitch E.A., Nikipelova E.M. Processes of metamorphism in iron-oxide-silicate rocks, their microbiological, nanochemical and nanostructural transformations. In: *Nanomaterials: Application & Properties '2016*. Lviv, Ukraine. 02NABM01.
36. Ulberg Z.R., Pertsov N.V., Ovcharenko F.D., Garbara S.V., Kogan B.S. The mechanism of biogenic formation of authigenic inclusions of gold in the fine sediments. *Doklady Akademii Nauk*. 1985. **284** (3): 711.  
[Ульберг З.Р., Перцов Н.В., Овчаренко Ф.Д., Гарбара С.В., Коган Б.С. Механизм биогенного формирования аутигенных включений золота в тонкодисперсных осадках. *ДАН СССР*. 1985. Т. 284, № 3. С. 711–713.]
37. Ovcharenko F.D., Ulberg Z.R., Pertsov N.V., Garbara S.V., Kogan B.S. The mechanisms of biogenic metals concentration in the shelf zones of sediment deficit. *Dopovidi of Academy of Sciences of Ukraine. B*. 1989. (1):19.  
[Овчаренко Ф.Д., Ульберг З.Р., Перцов Н.В., Гарбара С.В., Коган Б.С. Механизмы биогенного концентрирования металлов в шельфовых зонах дефицита наносов. *ДАН УССР*. 1989. Сер. Б, № 1. С. 19–21.]
38. Ulberg Z.R., Pertsov N.V., Garbara S.V., Kogan B.S., Kiselev V.P. The mechanisms of biogenic metals concentration in the shelf zones of sediment deficit. *Geochemistry*. 1990. (1): 112.  
[Ульберг З.Р., Перцов Н.В., Гарбара С.В., Коган Б.С., Киселев В.П. Механизмы биогенного концентрирования металлов в шельфовых зонах дефицита наносов. *Геохимия*. 1990. № 1. С. 112–116.]
39. Ovcharenko F.D., Pertsov N.V., Ulberg Z.R. Mechanisms of metal zones formation in coastal areas of fine sediments. In: *The success of colloid chemistry and of physico-chemical mechanics*. (Moscow: Nauka, 1992). P. 98.  
[Овчаренко Ф.Д., Перцов Н.В., Ульберг З.Р. Механизмы формирования металлогенных зон в прибрежных тонкодисперсных осадках. В кн.: *Успехи колл. хим. и физ.-хим. механики*. М.: Наука, 1992. С. 98–103.]
40. Kovzun I.G., Ulberg Z.R., Panko A.V., Prokopenko V.A., Oleinik V.A., Nikipelova E.M. Colloid-chemical and nanochemical processes in peloids on basis of ferrous clay minerals. In: *Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies and Applications*. (Springer, 2015). P. 233. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30737-4>

Стаття надійшла 25.09.2017



*V.A. Prokopenko, I.G. Kovzun, Z.R. Ulberg, O.A. Tsiganovich, A.V. Panko*

Ovcharenko Institute of biocolloid chemistry  
of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

PHYSICOCHEMICAL GEOMECHANICS AND NANO-CHEMICAL  
PROCESSES IN NATURAL AND TECHNOGENIC MINERALS

The main steps of development of related section of colloid chemistry – physico-chemical geomechanics of nano- and microstructural disperse systems, its role in studying of geochemical processes, which accompany the dispersion and next secondary consolidation of rocks and ore materials, are considered. The ideas of fundamental importance for the development of research in the specified direction of mechanochemical, microbiological and nanochemical aspects of interface contact interactions in terms of dispersing processes of rocks and their secondary consolidation are formulated and experimentally confirmed. It is shown, that received fundamental and practical results are important for formation of foundations of biocolloid chemistry, biogeochemistry, colloid biotechnologies of environmental protection, separation and enrichment of polymineral iron-alumino-oxide-silicate ore materials, property modification of pelitic sediments (peloids) for rehabilitation medicine and balneology.

**Keywords:** physicochemical mechanics; rocks, ores, peloids; mechanochemical, nanochemical, microbiological processes.