

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 551.243+551.253

В. Шевчук, д-р геол.-мінералог. наук, проф.,
М. Лавренюк, канд. фіз.-мат. наук, асист.,
Вол. Шевчук, асп.

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕРМОФЛЮЇДНИХ АНОМАЛІЙ
НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМАЦІЙНІ СТАНИ РОЗЛОМНИХ ЗОН**

Розроблено розрахунковий геоінформаційний модуль по оцінці впливу термопружності та фазових перетворень під час гранітизації, спричиненої термофлюїдними потоками, на напружено-деформаційні стани розломних зон із диференційованою проникністю.

Calculation geoinformatic module of the thermoelasticity and a phase transformation assessment during the granitization caused by thermo fluids flows has been developed. It influences on the stress-deformation state of the fault zones with a directional permeability.

Вступ. Постановка проблеми. Корові напружено-деформаційні стани формуються під впливом багатьох силових факторів і тому завжди є результируючими певних їх комбінацій. Поряд із фоновими масовими силами гравітації та різнонаправленими, зовнішніми щодо тих чи інших корових систем, тектонічними силами, у структурах тектоно-магматичної активізації суттєвими можуть бути також сили термопружності та до певної міри пропорційні їм впливи об'ємних ефектів різноманітних фазових перетворень. До останніх слід віднести метаморфогенне мінералоутворення, метасоматичні перетворення, часткове та повне розплавлення. Такі псевдомасові сили перш за все пов'язані із температурними режимами відповідних геоструктур, регуляторами яких виступають термофлюїдні потоки. Таким чином, флюїди не лише забезпечують широку гаму речовинних перетворень (метаморфічне та метасоматичне мінералоутворення, перетворення при флюїдно-магматичній взаємодії), але й ініціюють формування достатньо потужного силового чинника, що суттєво впливає на напружено-деформаційні стани відповідних корових систем (структур). Його роль особливо значна в межах корових розломних систем (зон), котрі відзначаються відносно високою проникністю та інтенсивністю термофлюїдних потоків.

При усій очевидності невідворотного впливу названих силових чинників на еволюцію напружено-деформаційних станів та відповідне структуроутворення в межах розломних зон, з'ясування їх співвідношень у часі і просторі навіть на якісному рівні є значною проблемою, не говорячи вже про кількісні характеристики. Відповіді на такі запитання можна шукати на шляху детального і всебічного геолого-структурного вивчення доступних, у відомому сенсі, розломних зон з метою отримання якомога більш точних даних щодо параметрів самих зон та геологічних середовищ, що їх складають, етапів розвитку, реконструйованих палеотектонічних полів напружень тощо. Такі дослідження доволі складні і не завжди приводять до однозначних висновків. Саме тому вони повинні доповнюватись засобами теоретичного (математичного) моделювання полів напружень і деформацій у системах, максимально наближених до емпірично встановлених, котрі б надавали можливість аналізу на кількісній основі усіх можливих комбінацій головних силових чинників та прогнозу деформаційних (структурних) наслідків їх прояву у реальних геологічних ситуаціях.

Особливості взаємозв'язку речовинних і структурних перетворень у межах розломних зон Українського щита. Яскравим прикладом структур розломного характеру, в межах яких структуроутворення виразно поєднується із речовинними перетвореннями на фоні контрастних теплових полів, можуть слугувати міжмегаблокові розломні зони і насамперед такі, що віднесені до рангу шов-

них структур тривалого розвитку: Голованівська, Інгuleцько-Криворізька, Оріхово-Павлоградська та ін. [1]. Неодноразовий динамометаморфізм у їх межах відзначався реалізацією різних деформаційних схем та геологічних механізмів. Спільною їх особливістю є доволі інтенсивний прояв різнотипного гранітоутворення під час протерозойської тектоно-магматичної активізації, що відбувалося у відносно високотемпературних умовах у зв'язку з розвитком локальних термофлюїдних аномалій. Витримана калій-кремнієва спеціалізація флюїдів та, відповідно, характерні типи гранітів, що утворюються за їхньої участі, виступають у ролі своєрідного індикатора палео-мезопротерозойських структурно-деформаційних проявів, оскільки останні, як показують, зокрема, мікроструктурні дослідження, мають сингранітизаційний характер [4, 5]. У межах розломних зон повсюдно відзначаються специфічні структури цього етапу. Палінгенно-метасоматичне гранітоутворення супроводжується формуванням, зокрема, мігматитових і граніто-гнейсових монокліналей, часом ускладнених складчастими формами та, зрідка, невеликими магматичними діапіроїдами.

Важливо підкреслити, що навіть у випадках витриманих (регулярних) полів напружень, що характеризують палеопротерозойський етап розвитку тієї чи іншої розломної зони, постійно фіксується змінність локальних полів напружень протягом гранітизації на рівні локальних структур чи на породному рівні. Наприклад, формування субпаралельних жильних гранітоїдних тіл, завдяки стійкому розтягу в межах розломної зони або її фрагмента, може супроводжуватись неодноразовим чергуванням стиснення-розтягу та зсування в межах однієї й тієї самої жили, що фіксується деформацією та перекристалізацією послідовно виникаючих мінеральних асоціацій. Це підтверджує періодичну появу локального внутрішнього силового чинника, який асоціюється з температурним режимом та динамо-кінематичними аспектами процесів гранітоутворення. Спостереження за поведінкою (залеганням) площинних та лінійних структурно-текстурних елементів (смуристість, сланцюватість, лінійність) доводять неодноразові збурення полів напружень у межах розломних зон під час гранітизації.

Таким чином, припускається, що активізовані на етапі протерозойської тектоно-магматичної активізації розломні зони завдяки високій проникності можуть концентрувати флюїдні потоки і завдяки цьому стають ареною гранітоутворення, особливості якого певною мірою обумовлюються еволюцією напружено-деформаційних станів. Останні, за сукупністю геологічних даних, формуються за участю регіональних та локальних силових чинників. До останніх належить зміна

об'єму завдяки перманентним фазовим перетворенням в ареалах розвитку термофлюїдних аномалій.

Математичне моделювання як засіб перевірки геологічних моделей та кількісної оцінки силових факторів. Вивчення розломних зон на основі детального геологічного картування із залученням методів польової тектонофізики і петроструктурного аналізу дає змогу створити більш чи менш аргументовані геологічні моделі розвитку розломних зон, реконструювати палеотектонічні поля напружень і деформацій, що спричинили утворення відповідних структурних парагенезисів. При цьому ряд важливих аспектів таких моделей залишається гіпотетичним, а кількісні характеристики та співвідношення між силовими чинниками – невідомими. З іншого боку, геологічні дані та моделі достатні для створення теоретичних моделей та засобів наближених комп'ютерних розрахунків напружено-деформаційних станів у розломних системах у широкому діапазоні початкових і граничних умов, різних комбінацій параметрів систем та геологічних середовищ, а також силових факторів.

Задля можливості комп'ютерного моделювання напружено-деформаційних станів складних розломних зон, якісної і кількісної оцінки впливу кожного із головних силових факторів та інтегральної їх дії, створено розрахунково-аналітичну модель по численному дослідженні ролі зазначених силових чинників.

При побудові фізичної і математичної моделей та розрахунках на основі алгоритмічної схеми математичної моделі до уваги брались наступні зведені фактори:

1. геометричні параметри системи, що моделюється (розломної зони): лінійні розміри системи та її фрагментів, проникних для флюїдних потоків;

2. дія гравітаційного поля Землі;

3. стаціонарний розподіл температур у межах системи та стабілізоване аномальне теплове поле, викликане термофлюїдним потоком певної інтенсивності з обрахуванням температурних градієнтів у межах системи;

4. зведений тип геологічного середовища (породно-го комплексу) із притаманними йому термомеханічними характеристиками – модулем Юнга, коефіцієнтом Пуассона, коефіцієнтом лінійного розширення, густиною, межею текучості та міцності;

5. граничні умови на межах обраної системи у вертикальному чи горизонтальному її перерізі (по переміщеннях чи напруженнях): верхня межа (денна поверхня) обиралась вільною від напружень, на бічних обмеженнях передбачена можливість аналізу умов вільного проковзування, защемлення або дії сил додаткового стиснення-розтягу та зсування, на нижній межі – також умов проковзування, защемлення та диференційованого випучування чи просідання;

6. при розрахунках передбачено можливість задавати залежності основних термомеханічних характеристик породних мас від температури (модуль Юнга, коефіцієнт лінійного розширення, межа плинності).

При побудові фізико-геологічної моделі приймаємо такі гіпотези:

1. обмежуємось розглядом скінченного масиву (системи), відкидаючи все, що знаходиться за його межами, вважаючи, що прикладені на границях масиву зусилля компенсують зовнішній вплив;

2. приймається гіпотеза суцільності матеріалу масиву;

3. приймається гіпотеза про малі деформації, що виникають внаслідок діючих силових факторів (температурного, гравітаційного тощо);

4. вважаємо поведінку матеріалу масиву термопружною (реологічний закон записується у вигляді співвідношень Дюганеля-Неймана);

5. вважаємо, що по відношенню до матеріалу масиву справедлива гіпотеза про лінійність деформацій (у співвідношеннях між переміщеннями та деформаціями нехтуємо членами вище першого порядку).

На основі розглянутої фізичної моделі в рамках лінійної термопружності побудовано математичну модель означеної системи.

У рамках цієї моделі напружено-деформаційний стан системи описується як термопружнопластична рівновага ізотропної матриці під дією прикладених до неї масових (гравітаційне поле Землі) неоднорідного стаціонарного поля температури та поверхневих зусиль. Крім того, вважається, що модуль Юнга у кожній точці матриці залежить від температури.

Поле переміщень описується системою диференціальних рівнянь Ляме в частинних похідних разом із граничними умовами по переміщеннях чи напруженнях.

Застосовуючи одержані на основі теореми взаємності робіт співвідношення Сомільяно та використовуючи граничні властивості потенціалів простого та подвійного шару, записуємо систему гранично-контактних рівнянь. Для розв'язання одержаної системи рівнянь застосовується модифікація прямого методу граничних елементів, що використовує ітераційну схему для врахування пружної поведінки неоднорідного за розподілом температури масиву. Ітераційний процес зводиться до розв'язання послідовності пружних задач для однорідного масиву, де всі неоднорідності механічних характеристик, спричинені неоднорідним полем температури, враховуються як псевдомасові сили, що входять у рівняння рівноваги. Пластична задача розв'язується на основі методу пружних розв'язків у рамках теорії малих пружнопластичних деформацій, що також приводить до побудови ітераційного процесу на кожному ітераційному кроці для розв'язання задачі термопружнопластичної рівноваги вибраного масиву.

У модифікованому методі граничних елементів для невідомих густин потенціалів застосовано двовимірну апроксимацію, котра дає змогу визначати з розв'язків граничних інтегральних рівнянь одночасно всі складові тензора напружень у межах масиву. В результаті одержується система лінійних алгебраїчних рівнянь, для замикання якої до рівнянь, одержаних на основі дискретизації гранично-контактних рівнянь, додаються граничні умови та умови неперервності переміщень на дискретизованій границі розглядуваного масиву.

На основі цієї моделі побудовано численно-аналітичний алгоритм розв'язання задачі в математичній постановці, який спирається на модифікований ітераційний метод граничних елементів. Цей метод було вибрано для розв'язання задачі як найбільш ефективний та доцільний для даного класу задач, такий, що забезпечує високу ефективність (порівняно з методами скінченних елементів) та точність розв'язків (порівняно з методами скінченних різниць).

На основі побудованої алгоритмічної схеми розроблено розрахунковий геоінформаційний модуль по кількісній оцінці термогравітаційних процесів, що відбуваються в гірських масивах, зі зручною графічною оболонкою, із гнучкою системою настройок для розв'язання розглядуваного класу задач, з візуалізацією одержаних результатів обчислень, можливістю збереження одержаних результатів розрахунків для їх подальшого використання. Зорема, розроблена програма дозволяє:

- розраховувати всі компоненти напружено-деформованого стану в кожній точці розглядуваного масиву для пружної постановки задачі;

– виконувати три- та двовимірну візуалізацію одержаних результатів розрахунку напружено-деформованого стану;

– створювати банк даних по задачах розглядуваної проблематики, зберігаючи одержані результати розрахунків для подальшого проведення розгорнутого аналізу накопичених даних. Крім того, на основі одержаних розрахункових величин, для наочності та зрозумілості, в програмі Matlab виконується візуалізація полів інтенсивностей деформацій та дотичних напружень, головних напружень, кутів повороту головних осей у формі ізоліній та векторного поля.

Розроблений модуль дозволяє у режимі моделювання обраховувати поля напружень, що формуються в межах розломних зон із диференційованою проникністю під впливом сил гравітації, термопружності і різноспрямованих тектонічних сил та прогнозувати викликані ними деформаційні процеси і геометричні співвідношення між віртуальними структурно-текстурними елементами.

Важливим вхідним параметром модуля є розподіл температур у поперечному січенні розломної зони, викликаний аномальним термофлюїдним потоком. Цей розподіл обраховується за допомогою раніше створеної комп'ютерної програми [2, 3]. Вона базується на розв'язковій динамічній задачі теплопровідності в умовах комбінації флюїдно-конвективного і кондуктивного тепло-

переносу, використовує як вхідні параметри теплові характеристики геологічних середовищ та термофлюїдних потоків і дозволяє розраховувати теплові поля та час їхньої стабілізації при тих чи інших початкових і граничних умовах.

Висновки. На основі детальних геологічних досліджень розломних зон Українського щита, активізованих на етапі протерозойської тектоно-магматичної активізації, розроблено геолого-фізичну та математичну моделі розломної зони і створено розрахунковий модуль, який дозволяє обраховувати напружено-деформаційні стани та кількісно оцінювати роль різних силових чинників, зокрема, термопружності та фазових перетворень під час гранітизації.

1. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. – К., 2005. 2. Шевчук В.В., Лихачев В.В. Математическая модель поля напряжений, вызванного тепловой аномалией в упругой среде // Геофиз. журнал. – 1996. – Т. 18, № 6. – С. 74–80. 3. Шевчук В.В., Кузь І.С., Лихачев В.В., Шевчук В.В. Особливості інверсійних корових полів напружень за даними математичного моделювання // Вісник Львів. ун-ту. Сер. геол. – 1997. – Вип. 13. – С. 24–27. 4. Шевчук В.В., Шевчук В.В. Особливості докембрійського і фанерозойського граніто-гнейсового структуроутворення // Вісник Київ. ун-ту. Геологія. – 2006. – Вип. 37. – С. 4–6. 5. Шевчук В.В. Петроструктурні особливості синдеформаційних метасоматитів Тальнівської зони розломів // Сучасні напрямки геологічної науки: 36 наук. праць ІГН НАН України. – К., 2006. – С. 55–61.

Надійшла до редколегії 01.10.07

УДК 912:681.518

В. Мокієнко, асист.,
О. Кошляков, канд. геол.-мінералог. наук, доц.

ДО ПИТАННЯ ПОБУДОВИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Викладено підхід до створення геоінформаційної гідрогеологічної моделі, побудованої на основі детермінованого математичного моделювання гідрогеологічного об'єкту. Для створення геоінформаційної гідрогеологічної моделі використано геоінформаційні системи Mapinfo та ArcView. Об'єктом досліджень є потік ґрунтових вод лівобережної частини м. Києва.

The approach to creation of geoinformation hydro-geological model on a basis of hydro-geological determined model is stated. At creation of geoinformation hydro-geological model the geoinformation systems Mapinfo and ArcView are used. Object of research is the underground water flow on the left coast in Kiev city.

Актуальність проблеми. Застосування сучасних інформаційних технологій для оцінки стану геологічного середовища дає можливість отримати нову інформацію порівняно з традиційними методами. Зокрема, використання ГІС-технологій для оцінки стану гідродинамічних умов територій, що зазнають значного техногенного впливу, та пов'язаних з цим негативних наслідків, є актуальним при створенні систем моніторингу, оперативного отримання результатів у картографічному вигляді та застосування цих результатів при прийнятті господарських або інженерно-технічних рішень на різних рівнях управління.

Аналіз проблеми. Практичний досвід свідчить, що отримання достовірної інформації про стан потоків підземних вод лише засобами ГІС неможливе в зв'язку з відсутністю відповідних механізмів реалізації такої задачі. Разом з потужними засобами відображення різноманітної інформації у вигляді векторних і растрових карт, безпосередньо в ГІС відсутній апарат детермінованого математичного моделювання геофільтрації. Крім того, запропоновані розробниками ГІС методи інтерполяції або апроксимації поверхонь не враховують фізичну природу руху підземних вод. Для розв'язання існуючої проблеми, на думку авторів, доцільно поєднати методику детермінованого гідрогеологічного моделювання фільтраційних процесів та можливості ГІС-технологій для оцінки стану гідродинамічних умов територій, що зазнають значного техногенного впливу [2, 3].

Методика та результати досліджень. Для ґрунтових вод лівобережної частини м. Києва на основі створеної геофільтраційної моделі та використання засобів ГІС Mapinfo і ArcView побудовано оригінальну геоінформаційну гідрогеологічну модель об'єкту. За допомогою згаданої геоінформаційної моделі отримано нові дані про стан ґрунтових вод території.

Безпосередньо об'єктом досліджень є наступні водоносні горизонти, що розповсюджені в межах лівобережної частини м. Києва [1]:

– водоносний горизонт в алювіальних відкладах голоцену, приурочений до заплав та днищ балок, що представлений різнозернистими пісками, супісками, суглинками, потужністю до 10 м;

– водоносний горизонт в алювіальних відкладах верхнього неоплейстоцену першої та другої надзаплавних терас, що складений середньо-дрібнозернистими пісками з прошарками гумусованих суглинків, потужність цього водоносного горизонту складає 10–25 м;

– водоносний горизонт у відкладах канівської та бучацької серій еоцену, представлений різнозернистими пісками з прошарками алевритів та глин, потужністю 10–20 м.

Регіональним водотривким шаром на території досліджень є відклади мергелю та мергельних глин потужністю від 5 до 15 м. Потік ґрунтових вод, що формується на лівобережній частині Києва, з гідродинамічної точки зору класифікується як безнапірний, однорідно-шаруватий, напівообмежений, з межею у вигляді р. Дніпро.

© Мокієнко В., Кошляков О., 2008