

МЕТОД НАТУРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У ГЕОЛОГІЧНИХ ТА ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ: ТЕОРЕТИЧНИЙ АСПЕКТ

Мелконян Д. В.

ВСТУП

Вивчення механізмів, що беруть участь у процесі побудови висновків на основі аналогій, є важливим завданням для багатьох галузей науки, таких як: механіка, гідродинаміка, штучний інтелект, система управління, геологія, геофізика та ін.

Метод аналогій стосовно до наук про Землю був створений авторами наукових праць¹ та названий «методом натурального моделювання».

Метод натурального моделювання є перспективним для застосування в управлінні геологічними системами, оскільки є ефективним з погляду системного підходу до вирішення завдань управління, тобто аналізу структури системи у кожен аналізований час, і з погляду законів розвитку системи, тобто законів взаємодії елементів системи та законів їх переходу з одного стану в інший з набуттям нових властивостей у процесі розвитку системи.

Метод натурального моделювання передбачає спільне вивчення великої кількості факторів та наявність великого обсягу даних безперервних спостережень. Перевага натурних моделей полягає в тому, що вони зберігають різносторонність і складність зв'язків, характерних для геологічних процесів. При відповідній обробці даних неперервних спостережень можна створити різноманітні групи природних аналогів – базу для прогнозу майбутнього стану геологічної системи та для вживання заходів управління ними.

Сьогодні, коли створені численні геоінформаційні системи (ГІС), окрім бази даних, і існують сучасні швидкодійні комп'ютери,

¹ Розовский Л. Б., Зелинский И. П., Воскобойников В. М. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Москва – Киев – Одесса : Вища. шк., 1987. 208 с.; Petit J.-C. Reasoning by analogy: rational foundation of natural analogue studies. *Applied Geochemistry. Supplementary Issue*. 1992. Vol. 1. P. 9–12.

застосування даного методу практично для всіх геологічних процесів і явищ є реальним.

В нинішній час є великий обсяг різнорідних даних геологічних та геофізичних розвідувальних робіт, наприклад, моніторингові спостереження за ґрунтовими і підземними водами та іншими компонентами як геологічного, так і навколишнього природного середовища; результати випробувань ґрунтів лабораторними і польовими методами та ін. Застосування ГІС та інших інтелектуальних систем забезпечує накопичення та надійне зберігання цих даних, загальний доступ до них та їх використання на стадії розвідувальних робіт; наочне картографічне відображення виявлених особливостей досліджуваного геологічного об'єкта, явища чи процесу. Отримана інформація дозволяє не лише судити про особливості геологічного утворення, процесу чи явища, але й простежити за їхньою динамікою під впливом різних факторів, у тому числі техногенних.

Метод натурного моделювання заснований на теорії подібності і дозволяє враховувати взаємозв'язок не тільки процесів, які мають місце при природному розвитку геологічного середовища, але й складні взаємовідношення між інженерно-геологічними процесами. Зазвичай метод аналогій використовують тоді, коли у зв'язку з великою складністю і недостатньою дослідженістю процесу диференціальне рівняння не може бути складеним, або його складання пов'язане з істотним спрощенням процесу, або, якщо лабораторний експеримент на малих моделях пов'язаний з недопустимим спрощенням. Для багатьох сучасних геологічних процесів неможливо ані вивести такі рівняння, ані довести однозначність їх розв'язку. При натурному моделюванні не потрібно будувати моделі, їх потрібно лише знайти в природі у готовому вигляді. На цих природних аналогах процеси, які очікуються на об'єкті прогнозу, вже протікали, і дані спостережень на природних аналогах можна перенести на подібні їм об'єкти прогнозу.

У геології існують численні приклади успішного використання методу аналогій², і це є передумовою того, щоб надати аналогії

² Alexander W. R., Reijonen H. M., McKinley I. G. Natural analogues: studies of geological processes relevant to radioactive waste disposal in deep geological repositories. *Swiss Journal of Geosciences*. 2015. Vol. 108. P. 75–100. <https://doi.org/10.1007/s00015-015-0187-y>; Magnuszewski P., Sendzimir J., Kronenberg J. Conceptual modeling for adaptive environmental assessment and management in the Barycz Vally, Lower Silesia, Poland. *International Journal of*

статусу одного з можливих методів наукового пізнання³. Метод широко використовується не тільки в геології, але й в інженерній геології⁴. Наприклад, автори робіт⁵ застосували метод аналогії під назвою «метод інженерно-геологічної аналогії» для оцінки сучасних інженерно-геологічних умов досліджуваної території та напружено-деформованого стану масивів гірських порід у перспективі їхньої взаємодії з інженерними спорудами; для аналізу характеру та причин деформацій будівель та споруд; для виконання прогнозних оцінок розвитку геологічних і інженерно-геологічних процесів та ін.

Environmental Research. 2005. Vol. 2(2). P. 194–203. doi: 10.3390/ijerph2005020001; Schellart W. P., Strak V. A review of analogue modeling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics*. 2016. Vol. 100. P. 7–32. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.03.009>; Зелинский И. П., Черкез Е. А., Гузенко А. В. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Одесса : Изд-во ОГУ, 1983. 126 с.; Зелинский И. П., Елсуфьев С. А., Школа А. В. Геомеханика. Одесса : Астропринт, 1998. 256 с.; Количко А. В. Метод инженерно-геологических аналогий. *Проблемы и перспективы*: сб. науч. тр. Москва: АО «Институт Гидропроект», 2000. Вып. 159. С. 5–9; Мелконян Д. В., Черкез Е. А. Применение метода натурального моделирования в управлении эколого-геологическими системами. *Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии*: труды междунар. конф. (Москва, 25–26 мая 2010 г.) / Под ред. В. Т. Трофимова и В. А. Королева. Москва : Изд-во МГУ, 2010. 272 с.; Розовский Л. Б., Зелинский И. П., Воскобойников В. М. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Москва – Киев – Одесса: Вища. шк., 1987. 208 с.; Тюнина Н. В. Особенности применения метода инженерно-геологических аналогий при изысканиях на городских территориях. *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. Вып. 9. С. 46.

³ Уемов А. И. Аналогия в практике научного исследования. Москва : Наука, 1970. 264 с.

⁴ Розовский Л. Б., Зелинский И. П., Воскобойников В. М. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Москва – Киев – Одесса : Вища. шк., 1987. 208 с.; Зелинский И. П., Елсуфьев С. А., Школа А. В. Геомеханика. Одесса : Астропринт, 1998. 256 с.; Количко А. В. Метод инженерно-геологических аналогий. *Проблемы и перспективы*: сб. науч. тр. Москва : АО «Институт Гидропроект», 2000. Вып. 159. С. 5–9; Тюнина Н. В. Особенности применения метода инженерно-геологических аналогий при изысканиях на городских территориях. *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. Вып. 9. С. 46.

⁵ Количко А. В. Метод инженерно-геологических аналогий. *Проблемы и перспективы*: сб. науч. тр. Москва : АО «Институт Гидропроект», 2000. Вып. 159. С. 5–9; Тюнина Н. В. Особенности применения метода инженерно-геологических аналогий при изысканиях на городских территориях. *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. Вып. 9. С. 46.

1. Основи методу натурального моделювання

Геологічна подібність. Одним з важливих етапів застосування методу аналогії до геологічних утворень, явищ та процесів є встановлення геологічної подібності за допомогою критеріїв геологічної подібності, які мають бути пропорційними для подібних однойменних процесів та явищ.

Критерії геологічної подібності (безрозмірні числа) відображають взаємодію геологічних процесів і сил, що викликають ці процеси. Крім того, критерії геологічної подібності зберігають постійність у подібних геологічних процесів. Рівність критеріїв геологічної подібності вказує на те, що при всіх змінах у міру розвитку геологічного процесу характер взаємодії внутрішніх сил і сторін процесу залишається одним і тим самим.

Будь-який геологічний процес охоплює низку фізичних процесів, що його складають, тобто теорія геологічної подібності є частковим застосуванням загальної теорії фізичної подібності у галузі геологічних наук і досліджень. У зв'язку з цим для встановлення геологічної подібності можна застосувати теорію фізичної подібності⁶. Заміна реальної фізичної системи моделлю основана на так званих *законах подібності*, за допомогою яких можна отримати критерії подібності, що дозволяють перенести дані, отримані на моделі, на вихідну фізичну систему.

Геологічні процеси і явища відрізняються від фізичних (теплових, фізико-хімічних та ін.) процесів тим, що вони самі складаються з комплексів цих же процесів. Проте геологічні процеси є не механічною сумою фізичних процесів і явищ, а їх діалектичним поєднанням, в результаті становлення якого з'являється якісно нова форма руху матерії – геологічна. І так само як теплова подібність характеризує подібність температур і теплових потоків, електромагнітна подібність – подібність полів струмів і електромагнітних сил і т. п., геологічна подібність характеризує подібність конкретних форм проявів геологічного руху, подібність геологічних процесів, явищ і утворень.

Геологічні процеси мають подовжені координати часу і простору, тобто вони діють на значних площах і протягом тривалого часу. Седиментація, утворення шарів, абразія берегів, вивітрювання гірських порід, ерозія, конкретні прояви тектогенезу, формування

⁶ Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования. Москва : Высш. шк., 1984. 439 с.

речовинного складу руд і підземних вод та інші геологічні процеси не можуть бути порівнянними за своїми розмірами і тривалістю дії зі швидкоплинними фізичними процесами. Подовження координат часу і простору обумовлює важливі особливості геологічних утворень (процесів, явищ), які можна сформулювати як *неоднорідність в точці і однорідність в цілому*⁷.

Тривале протікання геологічних процесів і неодноразова зміна умов середовища дії процесів призводять до *неоднорідності в точці* геологічних утворень. Наприклад, в процесі утворення шару піску міняються умови осадження зерен піску: змінюються глибини водоймища, швидкості стікання води, її температура, міняється сам матеріал осаду і т.д. Все це відбувається на фоні руху берегової лінії. В результаті шар складається із зерен, різноманітних за формою, розміром і мінералогічним складом. Проте, та ж подовженість координат часу і простору створює численні статистичні ситуації, результатом яких є поява усереднених якостей. Ці узагальнені якості і обумовлюють *однорідність в цілому* геологічних утворень. У тому ж шарі піску його узагальненими якостями є: особливий механічний склад, роздільнозернистість, певні закономірності в заляганні і т.п. Ці усереднені і узагальнені якості визначають виділення шару піску як особливого геологічного утворення або інженерно-геологічного елемента. Узагальненими якостями можуть бути також закономірна геохімічна зональність (наприклад, закономірна зміна вмісту заліза в мінералах), закономірний розподіл дрібних розривів і тріщин різного типу в масивах гірських порід і т.д. Однорідність в цілому і неоднорідність в точці властиві в тій чи іншій мірі всім геологічним утворенням, явищам і процесам.

Таким чином, *геологічна подібність* – це схожість виявлених істотних, узагальнених якостей (однорідність в цілому) при несхожості частковостей (неоднорідність в точці).

Оскільки більшість геологічних процесів є багатофакторними складними процесами, важко створювати їх моделі або знайти у природі геологічні процеси (об'єкти) із строго пропорційними одна одній характеристиками. З цих причин геологічна подібність є переважно наближеною подібністю. Існування неоднорідного

⁷ Розовский Л. Б., Зелинский И. П., Воскобойников В. М. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Москва – Киев – Одесса : Вища. шк., 1987. 208 с.; Зелинский И. П., Елеуфьев С. А., Школа А. В. Геомеханика. Одесса : Астропринт, 1998. 256 с.

в точці утрудняє виявлення подібності геологічних об'єктів. Проте, наявність однорідного в цілому обґрунтовує принципову можливість встановлення їхньої наближеної подібності. Потрібно лише встановити у порівнюваних об'єктів приблизно пропорційні зміни величин, що характеризують узагальнені якості.

Подібними називаються ті геологічні процеси, явища й утворення, у яких схожість істотних, усереднених і узагальнених властивостей супроводжується приблизно пропорційними змінами цих властивостей або їх співвідношень.

Таким чином, застосувавши закони фізичної подібності до геологічних об'єктів (явищ, процесів), можна сказати, що два геологічні об'єкти є подібними, якщо для них приблизно однакові: 1) геологічні умови (літологія порід, їх властивості, умови залягання і т.д.); 2) просторова (геолого-структурна) характеристика території, на якій виявляється процес або явище; 3) геологічна історія і тривалість явища або процесу; 4) умови взаємодії найістотніших аспектів явища або процесу на певному етапі.

Важливо зазначити, що теорія фізичної подібності надає можливість для кількісних оцінок подібності. Базою для цієї теорії служать три теореми фізичної подібності⁸. Основою умов натурного моделювання геологічних процесів є така теза: у геологічних процесів немає особливостей, які могли б виключити застосування до них теорем фізичної подібності⁹.

Перша теорема фізичної подібності стверджує, що у подібних процесів безрозмірні комбінації величин (тобто критерії подібності), що відображають зв'язки між істотними характеристиками процесу, є відповідно рівними.

Подібність фізичних процесів потребує точного збігу критеріїв подібності. Геологічна подібність є наближеною, і у зв'язку з цим можливо здійснити лише схожість (наближену рівність) критеріїв. Оскільки геологічна подібність – це наближена подібність, при виведенні критеріїв геологічної подібності враховують в основному узагальнені, генералізовані чинники. До критеріїв геологічної подібності не входять величини, що є моноваріантами

⁸ Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования. Москва : Высш. шк., 1984. 439 с.

⁹ Розовский Л. Б., Зелинский И. П., Воскобойников В. М. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Москва – Киев – Одесса : Вища. шк., 1987. 208 с.; Зелинский И. П., Черкез Е. А., Гузенко А. В. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Одесса : Изд-во ОГУ, 1983. 126 с.

(моноваріанти – чинники, не пов’язані з результатом дії процесу узгодженими змінами), хоча вони можуть брати участь в процесі. Наприклад, для процесу переробки берегів до критеріїв подібності не зараховують показник просадковості лесів (моноваріант), оскільки узгоджений зв’язок між змінами просадковості і розмивом берега не встановлено. Хоча з геологічних міркувань слід було б розглядати просадковість лесів як важливий чинник їх деформації. Проте, в умовах їх енергетичного розмиву хвилями вплив чинника осідання на інтенсивність розмиву виявився заглушеним сильнішим впливом інших чинників. Мікроосідання лесів призводять до відшаровування від схилу порід загальним об’ємом близько часток кубічного метра на метр берегу, тоді як розмив хвилями сягає багатьох десятків кубічних метрів.

Друга теорема (π-теорема) фізичної подібності свідчить, що, якщо рівняння зв’язку характеристик явища або процесу перетворене таким чином, що воно складається з безрозмірних комбінацій, тобто критеріїв подібності, то у такому разі це *критеріальне рівняння* є кількісно рівним для всіх подібних явищ.

В практиці використання натурних моделей можуть бути отримані рівняння зв’язку (критеріальне рівняння) між прогнозною величиною і одним або групою критеріїв подібності $A = f(K_1, K_2, K_3, \dots, K_n)$. Практична цінність таких рівнянь полягає у тому, що вони є проміжним ступенем між моделюванням і узагальненнями результатів досліджень у вигляді емпіричних залежностей. Наприклад, В. М. Воскобойников виявив степеневу залежність між об’ємами розмивів (V) берегів (на 44 ділянках Каховського водосховища після двох і п’яти років експлуатації) і величинами критерію геодинамічної подібності K_1 . Критеріальне рівняння для цього зв’язку виглядає так¹⁰: $V = a \cdot K_1^{-m}$, де a і m – постійні процесу. Тут також встановлено діапазон значень критерію K_1 , за межами якого, унаслідок підсиленого впливу моноваріант, порушується відповідність змін параметрів, представлених у критерію, і змін прогнозної величини. Тоді використання критеріальних рівнянь у попередньому вигляді стає неможливим.

Наведене вище підтверджує, що подібні геологічні явища, процеси та утворення характеризуються рівняннями, в які входять

¹⁰ Розовский Л. Б., Зелинский И. П., Воскобойников В. М. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Москва – Киев – Одесса : Вища. шк., 1987. 208 с.

критерії геологічної подібності. Такі рівняння називаються прогнозними в межах, між якими вплив моноваріант не встановлено.

Третя теорема стверджує, що подібні ті процеси та явища, які відбуваються в геометрично подібних системах, підкоряються одним і тим самим рівнянням зв'язку, у яких умови однозначності знаходяться в кількісно постійному відношенні, а складені з них визначальні критерії подібності є рівними.

Під умовами однозначності розуміється комплекс умов, задоволення яких уможливує виділення з цілого комплексу явищ якого-небудь одиничного явища. Іншими словами, це ті умови, які в будь-якій причинній залежності визначають одне єдине значення наслідку. До них належать такі, незалежні від механізму самого явища, чинники і умови: геометричні властивості системи, в якій протікає процес; фізичні параметри середовища і тіл, утворюючих систему; початковий стан системи (початкові умови); умови на межах системи (граничні умови).

У конкретнішій постановці, наприклад, для подібності умов однозначності процесів переробки берегів абразією необхідно, щоб на натурній моделі і об'єкті прогнозу (або на двох ділянках узбережжя) були однакові: 1) літологічний склад і властивості порід, що розмиваються, на обох ділянках; 2) висота і крутизна схилу, що переробляється; 3) початкові умови (профіль схилу і властивості порід до початку переробки), а також тривалість процесів; 4) співвідношення між енергією хвиль, що руйнують беріг, і потенційною енергією сил опору порід розмиву протягом періоду часу, для якого виконується прогноз.

У багатофакторному геологічному процесі складніше встановити граничні умови. Для багатьох геологічних процесів справедливим є таке припущення, прийняте в подібності механічних і електричних явищ: якщо на подібні тіла діють динамічно подібні системи сил, то рухи і зміни тіл будуть подібними за однієї лише умови початкового стану тіл. Інакше кажучи, при однаковому вихідному стані подібність діючих сил обумовлює і подібність результатів. Проте, строгий збіг (у будь-який момент часу) змінних чинників, наприклад, таких, як швидкість і напрям вітру на водосховищах, що визначають одну з граничних умов – сумарну енергію хвиль, забезпечити неможливо. Отже, постійність співвідношення граничних умов при моделюванні складних геологічних процесів порушуватиметься. Проте, наближений характер геологічної подібності допускає такі порушення, якщо вони компенсовані в часі, і окремі відхилення

неістотно впливають на результат процесу. Внаслідок цього ціннішими є натурні моделі з тривалим періодом прояву процесу (наприклад, для процесу переробки берегів – 5–10 років і більше).

Зазначені припущення, так само як і інші припущення моделювання, можна перевірити дослідом – порівнянням статистичного ряду пар аналогів. Якщо вони вірні, то подібність умов однозначності обмежується подібністю одних лише початкових умов. Критерії, в які входять початкові умови, будуть *визначальними*. Наприклад, для процесу переробки берегів до критеріїв геометричної подібності K_3 і K_4 (див. параграф 2) і до критеріїв літологічної подібності K_2 входять початкові умови (характеристики вихідного стану). Ці три критерії є визначальними.

В інших випадках подібність граничних умов забезпечується, якщо умови взаємодії з навколишнім середовищем є однаковими на об'єкті прогнозу і аналогу. Наприклад, для переробки берегів водосховищ така подібність граничних умов виникає, якщо є однакові співвідношення між енергією хвиль, що руйнує схил, і потенційною енергією сил опору масиву порід розмиву протягом періоду часу, для якого виконується прогноз.

Натурна модель. Принципи натурального моделювання. З трьох типів моделювання – натурального, лабораторного і логічного – найбільші можливості для конкретних кількісних прогнозів сучасних геологічних процесів (зсувів, переробки берегів водосховищ, ерозії і т. д.) має натурне моделювання.

Будь-яке геологічне явище, як і споруда, побудована в певних геологічних умовах, є експериментом (конкретним прикладом), який повинен вивчатися і служити засобом пізнання прогнозних явищ. Тому при прогнозуванні геологічних процесів і явищ доводиться користуватися методом аналогії (натурного геологічного моделювання).

Натурні моделі – такі природні комплекси, особливості і поведінка яких в часі достатньо вивчені для того, щоб можна було встановити їх аналогію (подібність) з іншими природними комплексами.

Натурними аналоговими моделями можуть служити будь-які геологічні об'єкти – площа прояву і дії геологічних та інженерно-геологічних процесів (ділянка узбережжя, схили, геоморфологічні елементи, шар, масив, будмайданчики і т.д.). Моделлю може служити також геологічне явище: зсув, абразія, землетрус і т.д. На природних аналогах, як і на будь-яких інших моделях,

відтворюються процеси, протікання яких очікується на об'єкті прогнозу. Важливою ознакою природних аналогів (натурних моделей) є те, що вони пов'язані з відповідними об'єктами коефіцієнтами пропорційності, близькими до одиниці. Це полегшує інтерпретацію властивостей моделі на об'єкті прогнозу.

Метод натурального моделювання є комплексом досліджень об'єкта прогнозу і його природного аналога (моделі), виконаним в послідовності і обсязі, які є достатніми для перенесення одержаних висновків з аналога на об'єкт або навпаки.

Метод натурального моделювання включає три послідовні операції¹¹: (1) пошук аналогів; (2) встановлення подібності між об'єктом прогнозу (або об'єктом дослідження) і його аналогом; (3) перенесення даних від природного аналога (спостережень на натурній моделі) на об'єкт прогнозу.

Перший етап (створення бази даних) зводиться до збору і обробки інформації про природні комплекси, які знаходяться в схожих геологічних умовах. Тут також створюють окремі класи аналогів з урахуванням їх кількісних і якісних критеріїв подібності. Класи аналогів створюють, використовуючи такі істотні характеристики (показники, критерії подібності), врахування яких є достатнім для прогнозу поведінки системи в заданому діапазоні точності прогнозу.

Друга операція – це вибір потрібної натурної моделі. У зв'язку з цим (з урахуванням кількісних і якісних критеріїв подібності) спочатку встановлюють приналежність об'єкта прогнозу до одного з класів аналогів, а потім виявляють наближену подібність з одним з об'єктів усередині вибраного класу.

Для здійснення другого етапу використовують різні методи теорії розпізнавання образів: кореляційний, регресійний, метод евклідової відстані та ін. Деякі з цих методів розглянуті в параграфі 3.

При виконанні *третьої операції* (перенесення даних від природного аналога на об'єкт прогнозу) використовується просте припущення: при збігу у порівнюваних об'єктів n істотних характеристик можна очікувати, що і $n+1$ характеристика, відома на моделі і невідома на об'єкті прогнозу, також співпадає. В цьому разі

¹¹ Розовский Л. Б., Зелинский И. П., Воскобойников В. М. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Москва – Киев – Одесса : Вища. шк., 1987. 208 с.

можливим є просте перенесення прогнозної величини з моделі на об'єкт прогнозу.

Для того, щоб природний аналог (натурна модель) дозволяв вирішувати дослідницькі і прогнозні завдання, повинен бути дотриманий ряд умов (або ряд принципів моделювання): 1) принцип наближеної і неповної подібності натурної моделі і об'єкта прогнозу; 2) принцип інтегральної подібності процесу за наявності відхилень від подібності окремих процесів, що його складають; 3) принцип алгоритмізації ознак подібності природного аналога і використання представляючих показників.

1. *Принцип наближеної і неповної подібності натурної моделі і об'єкта прогнозу.* Цей принцип є прямим наслідком з постулату *однорідного в цілому, неоднорідного в точці*. Тут між моделлю і об'єктом прогнозу має бути доведено існування одного з видів встановлених аналогій (*ізоморфної, гомоморфної або групової*), а також наявність приблизно подібних змін істотних змінних характеристик.

У складних випадках, коли, наприклад, натурною моделлю служить ділянка узбережжя діючого водосховища, на якому протягом багатьох років відбувається переробка, порівнянню підлягають властивості подвійного характеру: характеристики, що практично мало змінюються в межах тривалості протікання процесу (літологія порід схилу, їх фізико-механічні властивості, мінералогічний і хімічний склад), і характеристики, що змінюються. До характеристик, що змінюються, зараховуються і діючі сили (енергія хвиль), і умови їх прояву (коливання рівнів води, трансформація хвиль на обміліні, частота обвалів), і результати їх дії (розмивання берега, зміна профілю схилу).

Перші властивості (характеристики) називаються *постійними* процесу, а другі – *змінними*.

Ізоморфні аналогії мають взаємно однозначну відповідність елементів відношень між ними. Прикладами можуть служити: аналогія між геологічною картою і геологічною будовою знятої території; аналогія між зміною дебіту свердловини і кривою дебіту свердловини на графіку. В ізоморфних аналогіях може бути відсутньою матеріальна схожість окремих елементів, проте є схожість форм, схожість відношень між окремими елементами. Наприклад, на карті взаємні відношення між розповсюдженням окремих елементів залишаються тими ж самими, що й на місцевості (на частку пісків доводиться, наприклад, 30 % площі і на місцевості,

і на карті). Водночас кожному з елементів на місцевості відповідає строго певний елемент (позначення) на карті. Це і є взаємно однозначною відповідністю.

У *гомоморфних аналогіях* відповідність елементів є неоднозначною. При цьому зберігається схожість деяких відношень і структур, і можлива також схожість деяких елементів. Наприклад, співвідношення різних мінералів в пробі піску можуть бути тотожними співвідношенню цих самих мінералів у пласті, але немає відповідності (геометричної подібності) всіх розмірів і форм пласта і проби.

Аналогії групові є аналогіями систем, що належать до однієї і тієї ж самої групи. Приналежність до групи встановлюється підпорядкуванням частини або всіх елементів одним і тим самим законом або загальністю деяких властивостей і відношень. Наприклад, декілька різних зсувів можна розглядати як групові аналогії тільки тому, що всі вони є зсувом порід по схилу під впливом сили тяжіння. Решта елементів – літологія порід, що зсовуються, поверхня ковзання, походження зсувів, їх історія і т.п. – є різними.

Ізоморфні, гомоморфні і групові аналогії відрізняються одна від одної ступенем і характером схожості. Найвищий рівень схожості відзначається в ізоморфних аналогіях. В міру деталізації досліджень і відбору аналогів групові аналогії можуть переростати в гомоморфні, а іноді – і в ізоморфні.

При порівнянні складних систем може бути встановлено наявність відразу декількох типів аналогії.

2. *Принцип інтегральної подібності геологічного процесу за наявності відхилень від подібності окремих процесів, що його складають.* Вимогу забезпечення складових окремих процесів важко виконати однаковою мірою для всіх окремих процесів. У зв'язку з цим, щоб забезпечити подібність двох геологічних процесів, немає необхідності відшукувати в природі аналоги з пропорційною зміною кожної змінної. За наявності *компенсаторів* подібність встановлюється і при непропорційних змінах всієї решти змінних.

Компенсатором може служити властивість, що найбільш "рухливо", легко змінюється (наприклад, енергія сил, що викликають процес). Дослідникам берегів давно відомо, що деякі різні за формою і літологічним складом ділянки узбережжя розмиваються з однаковою швидкістю (тут компенсатором служить величина енергії хвиль), або одну й ту саму притоку води в колодязь дають породи різної проникності (компенсатор – ухили депресивної поверхні) і т.п.

3. *Принцип алгоритмізації ознак подібності натурної моделі і використання представляючих показників.* Нерідко алгоритмізація (тобто вираження числами, формулами, правилами) багатфакторного процесу становить значні труднощі. Тоді моделювання здійснюють за допомогою якісних описів ознак подібності. Таке моделювання називається атрибутивним, оскільки в цьому випадку порівнюються атрибути (властивості) явищ (процесів, утворень), виражені словами, а не числом. Наприклад, «обидва береги складені рихлими породами», «трансформація хвиль відбувається на порівнюваних об'єктах однаковим чином» і т.п.

Представлення ознак подібності у вигляді чисел (тобто алгоритмізація) – це одна з основних умов ефективного використання натурних моделей. Окрім цього, перехід від якісного (атрибутивного) моделювання до кількісного, який використовує критерії подібності (числа), має очевидні переваги в аспекті підвищення конкретності і об'єктивності прогнозів.

Алгоритмізація різних аспектів і чинників геологічного процесу не становить серйозних труднощів, якщо є можливість розчленувати процес на складові елементи, характеристики яких піддаються безпосередньому вимірюванню. Наприклад, морфологічні елементи геологічного об'єкта (висота, крутизна профілю схилу). Утруднення з'являються тоді, коли які-небудь властивості і результати прояву процесу неможливо вимірити з різних причин. В цьому разі вдаються до представляючих показників, зміни яких відбивають зміни даної властивості. Наприклад, енергія прибіжного потоку, для якої ще не відомі задовільні методи розрахунку, може бути представлена енергією хвиль відкритого моря, для якої вже є низка емпіричних формул.

Всі теореми і принципи (умови) подібності, справедливі для лінійних систем, можуть бути поширені і на будь-які нелінійні системи або системи із змінними параметрами при збігу відповідних відносних характеристик змінних або нелінійних параметрів.

2. Критерії геологічної подібності

Виведення критеріїв геологічної подібності на основі аналізу розмірності. У теорії подібності і моделювання критерії подібності визначають за допомогою: *теоретичного* (логічного) аналізу процесу або *аналізу розмірності*. Проте, через складний характер більшості геологічних процесів диференціальні рівняння, що характеризують ці процеси, не можуть бути складені або вимагають істотних спрощень. У зв'язку з цим основним засобом отримання

критеріїв геологічної подібності в натурному моделюванні є аналіз розмірності.

В натурному моделюванні критерії подібності можна одержати, враховуючи умови однозначності і застосовуючи аналіз розмірності. Для виведення критеріїв геологічної подібності необхідно виконати такі операції:

1. Скласти структурну схему процесу, в якій встановлюють процеси, що його складають (інваріанти – чинники, діючі однозначно і односторонньо; коваріанти – чинники, діючі за принципом прямого і зворотного зв'язку; моноваріанти – чинники, не пов'язані з результатом дії процесу узгодженими змінами). Саме з величин, що представляють інваріанти і коваріанти, і утворюються критерії подібності.

2. Знайти величини, що кількісно представляють інваріанти і коваріанти першого порядку (порядок чинника визначається за силою його впливу на процес). Одна з величин вибирається як прогнозована.

Метод натурного моделювання необхідний для кількісних прогнозів, тому він повинен оперувати числами, що полягає в зображенні інваріант і коваріант числами. Це означає, що числа (скалярні або векторні величини) не обов'язково повинні вимірювати дану властивість (чинник), що для багатьох аспектів геологічних процесів важко здійснити, а повинні відображати істотні зміни цієї властивості (чинника). Наприклад, для процесу переробки берегів водосховищ одним з важливих чинників є втрата хвильової енергії у процесі трансформації хвиль на обміліні. У цьому вельми складному процесі є низка складових процесів: втрати енергії на тертя, на зважування частинок, на фільтрацію в ґрунт і т.п. Проте, інтенсивність всіх цих складових процесів залежить від довжини пробігу хвиль над обміліною, тобто від розмірів обміліни. Тому як представляючу величину для чинника "втрата хвильової енергії в процесі трансформації хвиль на обміліні" можна вибрати ширину обміліни.

При виборі показників необхідно враховувати такі обставини:

а) показники повинні бути такими, щоб їх обчислювання або вимірювання на природних аналогах і об'єктах прогнозу було можливим;

б) показники підбираються такі, щоб їх розмірності не повторювалися. Тільки один з показників, який буде використаний як прогнозована величина, може мати розмірність, однакову з одним

з інших представляючих показників. Ця вимога обумовлена методикою аналізу розмірності;

в) мінімальна кількість представляючих показників повинна бути три, не враховуючи безрозмірних коефіцієнтів.

Системи з недостатньою кількістю врахованих характеристик (чинників) є хаотичними, їх поведінка непередбачувана. Тому, при складанні структурної схеми необхідно врахувати ту велику кількість характеристик, яка забезпечує однозначність перетворень.

Для того, щоб була дотримана умова (в), іноді буває доцільним включити до числа представляючих показників прискорення сили тяжіння, яке разом з іншими показниками (наприклад, вага породи в одному циклі обвалення, вага порід, залучених до процесу) представляє гравітаційні сили, діючі майже в будь-якому сучасному геологічному процесі.

Таким чином, після визначення всіх представляючих показників один з них (у якого зв'язки з іншими чинниками проявляються особливо чітко, тобто цей показник повинен бути фокусувальним) вибирається як прогнозована величина.

3. Скласти в загальному вигляді рівняння зв'язку прогнозованої величини та інших інваріант і коваріант у вигляді степеневого одночлена. При складанні рівняння зв'язку необхідно врахувати, що в лівій і правій частині рівняння величини з однаковою розмірністю повинні міститися не більше ніж по одному разу.

4. Застосувати аналіз розмірності. Застосувавши до складеного рівняння зв'язку аналіз розмірності, можна отримати безрозмірні числа (тобто критерії подібності), які можуть відображати подібність різних процесів, властивостей і умов на натурній моделі і об'єкті прогнозу.

Нижче наведені критерії геологічної подібності, які були отримані із застосуванням аналізу розмірності на прикладі переробки лесових берегів водосховищ¹².

Критеріальне рівняння має такий вигляд:

$$l = h \cdot f(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5), \quad (1)$$

де h – висота прибережного схилу; l – ширина абразійної обмілини, яка пов'язана з прогнозованою інтенсивністю розмиву берега (S)

¹² Розовский Л. Б., Зелинский И. П., Воскобойников В. М. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Москва – Киев – Одесса : Вища шк., 1987. 208 с.

простою залежністю $S = l-d$ (d – ширина схилу в зоні хвильової дії); K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 – критерії геологічної подібності, які детально розглянуті нижче.

$$K_1 = \frac{E}{h^4 \gamma}; \quad K_2 = \psi; \quad K_3 = i; \quad K_4 = J; \quad K_5 = Z. \quad (2)$$

Позначимо індексом « a » критерії і величини аналога, а індексом « o » – об'єкта прогнозу:

$$l_a = h_a f_a(K_1^a, K_2^a, K_3^a, K_4^a, K_5^a); \quad (3)$$

$$l_o = h_o f_o(K_1^o, K_2^o, K_3^o, K_4^o, K_5^o).$$

Якщо у об'єкта і у аналога $K_1^a \approx K_1^o, K_2^a \approx K_2^o, K_3^a \approx K_3^o, K_4^a \approx K_4^o, K_5^a \approx K_5^o$, то можна зробити припущення, що і їх функції мають однаковий вигляд (в межах якісно однакової групи явищ, наприклад, "Лесові береги"). У подібних явищ при рівності критеріїв це означає і рівність функцій, тобто $f_a(K_1^a, K_2^a, K_3^a, K_4^a, K_5^a) \approx f_o(K_1^o, K_2^o, K_3^o, K_4^o, K_5^o)$. Тоді з рівності (3) маємо:

$$l_o = \frac{h_o}{h_a} l_a = C_1 l_a. \quad (4)$$

Це рівняння вірне тільки при рівності критеріїв подібності. Воно представляє рівняння зв'язку між об'єктом прогнозу і природним аналогом. Тут $C_1 = h_o/h_a$ є масштабним коефіцієнтом моделювання. Тоді інтенсивність розмиву на об'єкті прогнозу можна визначити так: $S_o = l_o - d_o = C_1 l_a - d_o$.

Характеристика критеріїв геологічної подібності. Розглянемо докладно характеристику критеріїв геологічної подібності процесу переробки берегів водосховищ.

Критерій $K_1 = E/h^4 \gamma$ називається *критерієм геодінамічної подібності*. Фізичне значення цього критерію полягає у тому, що він відображає співвідношення двох енергій: чисельник є активною енергією, що руйнує беріг, знаменник – енергією опору порід руйнуванню.

У багатьох екзогенних геологічних процесах (абразія, ерозія, вивітрювання, осідання, карст, ущільнення ґрунтів та ін.) також можна знайти взаємодію цих двох енергій. Тому критерій K_1 є універсальним. Він характеризує подібність динаміки

денудацийних процесів, що знайшло відображення в найменуванні цього критерію. Цей критерій включає час дії процесу, оскільки сумарна величина повної і вільної енергії залежить від тривалості її прояву. Таким чином, цей критерій відображає і подібність часових умов – натурної моделі і об'єкта прогнозу, і їх синхронність.

Критерій K_1 є однією з модифікацій критерію Ньютона (Ne), що має найзагальніший характер.

Критерій $K_2 = \psi$ характеризує *подібність речовинного (літологічного) складу*. Для прогнозу переробки берегів, складених крихкими ґрунтами, як кількісний показник літологічного складу і пов'язаних з ним міцнісних властивостей порід умовно прийняли значення кута зрушення ψ . Як відомо, ψ є функцією кута внутрішнього тертя ϕ , величини зчеплення C , об'ємної ваги ґрунту і висоти берега:

$$\operatorname{tg} \psi = \operatorname{tg} \phi + \frac{C}{p} = \operatorname{tg} \phi + \frac{C}{h\gamma}. \quad (5)$$

Проте, можуть бути застосовані і інші безрозмірні характеристики літологічного складу і міцнісних властивостей. Наприклад, в набір критеріїв K_2 для скельних і напівскельних порід може входити коефіцієнт міцності.

Критерій K_2 можна представити не одним числом, а декількома, якщо вони уточнюють характеристику речовинного складу, тобто може бути декілька критеріїв літологічного складу: $(K_2)'$, $(K_2)''$, $(K_2)'''$ і т.д. Зокрема, при неоднорідній літологічній будові схилу (наприклад, при перешаруванні в схилі мергелів і пісків) необхідно вказати безрозмірну характеристику тих порід, які суттєво впливають на результат процесу (піски), крім того, як другий критерій літологічної подібності $(K_2)''$ можна розглянути відношення потужностей окремих шарів (пісків і мергелів).

Якщо моделюється тривалий за часом геологічний процес (наприклад, переробка берегів протягом 10 років експлуатації водосховища), то необхідно також враховувати можливість зміни властивостей порід за цей період під впливом природних чинників. Тоді, якщо змінюються показники властивості порід, то змінним буде і значення K_2 .

Оскільки геолого-літологічна будова натурної моделі і об'єкта є найважливішою характеристикою середовища, в якому діє літоло-

гічний процес, то критерій літологічної подібності є універсальним критерієм у всіх випадках використання натурних моделей.

Подібність просторових умов на натурній моделі і об'єкті прогнозу відображається *критеріями геометричної подібності*. Геометрична подібність двомірних натурних моделей (наприклад, геологічних профілів) контролюється одним або кількома критеріями подібності. Наприклад, у прогнозах переробки берегів за натурними моделями подібність просторових умов враховується двома критеріями: $K_3 = i$ – критерієм геометричної подібності профілю схилу, $K_4 = J$ – критерієм геометричної подібності профілю берегової лінії (у плані). Критерій K_3 представляється ухилом схилу (i), а для обривистих берегів – представляє відношення висоти берега до глибини води ($K_3 = \bar{h}_\sigma / H_m$, де \bar{h}_σ – зведена висота берега; H_m – глибина відкритого моря). Критерій K_4 відображається величиною коефіцієнта звивистості берегової лінії, який являє собою відношення довжини берегової лінії до її проекції.

Всі розглянуті вище критерії є *визначальними*, оскільки в ці критерії входять умови однозначності.

Критерій $K_5 = Z$ – *критерій акумулятивних процесів*, рівний коефіцієнту акумуляції (відношення об'єму порід, що відклалися, до об'єму розмитих порід). Цей критерій є *невизначальним*, оскільки інтенсивність акумулятивних процесів на берегах, що розвиваються за абразійним типом, залежить від умов, які увійшли до визначальних критеріїв (енергія хвиль, літологічний склад, розрзаність берегової лінії і т.п.). Водночас цей критерій є і спеціальним, а не універсальним, оскільки він приймається тільки в моделюванні переробки берегів водосховищ.

Одержані за допомогою аналізу розмірності критерії геологічної подібності повинні бути піддані усебічній перевірці. Контролю підлягає ряд зроблених припущень і операцій: припущення про рівність функцій при рівності критеріїв, правильність вибору представляючих показників, повнота врахування чинників, коректність алгебричних викладів.

Інші приклади подібності отримані авторами робіт¹³ для моделювання напруженого стану порід зсувних схилів. Тут за допомогою аналізу розмірності отримано критерій подібності

¹³ Зелинский И. П., Елеуфьев С. А., Школа А. В. Геомеханика. Одесса : Астропринт, 1998. 256 с.

K_1, K_2, K_3 . Критерій $K_1 = \frac{E}{\gamma \cdot h}$ є ідентичним критерію геодинамічної подібності (де E – модуль пружності, h – висота схилу, γ – питома вага ґрунту), тобто представляє відношення двох сил: в чисельнику сила опору, в знаменнику – рушійна сила (гравітаційна); критерії $K_2 = v$ і $K_3 = i$ забезпечують умови однозначності деформацій і напружень, відповідно, де v – коефіцієнт Пуассона, i – крутість схилу.

3. Методи теорії розпізнавання образів. Міра подібності

Для геологічної подібності однією зі складних проблем є вивчення меж допустимого незбігу критеріїв подібності об'єкта прогнозу та його природного аналога і вплив цього незбігу на результат прогнозу. У зв'язку з тим, що можна знайти велику кількість природних аналогів, у міру збігу критеріїв подібності потрібно їх групувати в класи аналогів. Після цього, за збігом критеріїв можна виявити приналежність об'єкта прогнозу до одного з класів аналогів, а потім виявити подібність з одним з аналогів усередині вибраного класу. Вказаний процес називають *виявленням міри подібності*, тобто виявленням деякого *порогу подібності*, перевищення якого означатиме відсутність подібності. Такі методи формування класу аналогів і виявлення подібності розроблені в *теорії розпізнавання образів*¹⁴.

Геологічна подібність кваліфікується як наближена подібність, а при виявленні наближеної подібності часто відзначається різний ступінь схожості у різних характеристик порівнюваних об'єктів. У таких випадках доцільно використовувати *інтегральні міри подібності*. Тут замість ряду критеріїв подібності, які необхідно зіставляти роздільно, отримують узагальнений показник, що включає окремі характеристики подібності.

Розглянемо деякі положення теорії розпізнавання образів та їх інтерпретацію для геологічної подібності. У теорії розпізнавання образів будь-які багатофакторні об'єкти, до яких належать і всі геологічні процеси, явища і утворення, називаються зображеннями, або образами. Всі вони розглядаються як вектори або точки в N -мірному просторі. Наприклад, якщо природний аналог характеризується сімома кількісними критеріями подібності, то цей

¹⁴ Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. Москва : Мир, 1978. 412 с.

аналог може бути представлений у вигляді точки в семимірному просторі.

Збіг параметрів у ряду таких точок є підставою для того, щоб об'єднати ці точки в один клас так званих навчальних зображень. З таких навчальних зображень формують базу даних для комп'ютера.

Графічно клас навчальних зображень може бути представлений у вигляді деякої області точок, в якій розкид точок пов'язаний з незбігом деяких критеріїв подібності. Загальні властивості зображень, що становлять клас і їх кількість, визначають контури ділянки, усередині якої розташовуються точки.

Задача розпізнання нового так званого випробовуваного образу P складається з двох етапів:

- 1) розділення образів на класи; створення бази даних для комп'ютера;
- 2) розпізнавання, яке полягає у випробуванні нового зображення з метою визначення спочатку приналежності його до одного з класів навчальних зображень, а потім виявлення подібності з одним із зображень усередині вибраного класу.

Випробування полягає у визначенні відстані об'єкта прогнозу до всіх областей N -мірного простору, що графічно зображає різні класи (рис. 1). Передбачається, що чим менше відстань, тим більше міра близькості об'єкта прогнозу і деякого узагальненого образу, що характеризує клас. Вказаний метод розпізнавання називають геометричним. Його різновидами є такі методи: *кореляційний*, *евклідової відстані*, *лінії регресії* та ін.

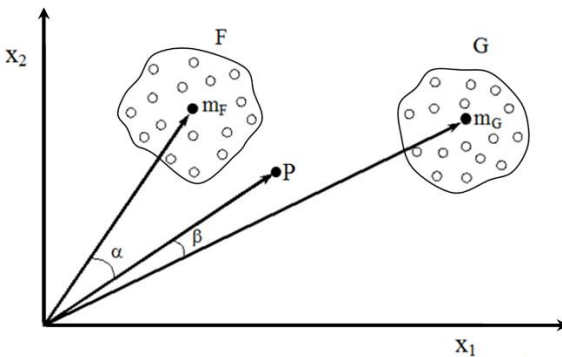


Рис. 1. Застосування кореляційного методу для оцінки міри подібності;
 F і G – класи навчальних зображень (природних аналогів);
 P – випробовуване зображення (об'єкт прогнозу); α , β – міри подібності

Розглянемо деякі з вказаних методів. На відповідних рисунках покажемо зображення в двомірному просторі, проте формули і вирішальні правила наведемо в загальному вигляді для N -мірного простору (N це будь-яке натуральне число, $N = 1, 2, 3, \dots$).

Кореляційний метод. У кореляційному методі кількісною характеристикою подібності порівнюваних об'єктів, тобто *мірою подібності*, є косинус кута (рис. 1) між вектором випробовуваного зображення і еталоном одного з класів навчальних зображень. На рис. 1 наведені два класи об'єктів F і G . Кожен i -тий об'єкт класу F зображається вектором: $f_i = (f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{iN})$ $i = 1, 2, 3, \dots, M_1$, а класу G – вектором: $g_i = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{iN})$ $i = 1, 2, 3, \dots, M_2$.

Випробовуване зображення P задане координатами $P = (P_1, P_2, P_3, \dots, P_N)$.

Кожна з координат $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$ є однією з властивостей (критерій подібності або будь-яка інша характеристика) зображення.

Сукупність векторів, що становлять класи F і G , може бути замінена, відповідно, векторами-еталонами m_F і m_G , які є середнім з навчальних зображень для кожного з класів:

$$m_F = \frac{1}{M_1} \sum_{i=1}^{M_1} f_i, \quad (6)$$

$$m_G = \frac{1}{M_2} \sum_{i=1}^{M_2} g_i. \quad (7)$$

Процедура розпізнання полягає у пошуках кореляції (зв'язків) між випробовуваним зображенням P і еталонами-векторами m_F і m_G . Мірою зв'язку є коефіцієнт кореляції, рівний косинусу кута між вектором P і m_F , P і m_G :

$$\cos \alpha = \frac{P_1 m_F^1 + P_2 m_F^2 + \dots + P_N m_F^N}{\sqrt{P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_N^2} \sqrt{(m_F^1)^2 + \dots + (m_F^N)^2}}, \quad (8)$$

$$\cos \beta = \frac{P_1 m_G^1 + P_2 m_G^2 + \dots + P_N m_G^N}{\sqrt{P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_N^2} \sqrt{(m_G^1)^2 + \dots + (m_G^N)^2}}. \quad (9)$$

У формулах (6)–(9):

$m_F^1, m_F^2, \dots, m_F^N$ – відповідні координати вектора m_F , тобто показники, кожен з яких характеризує одну з N властивостей еталона класу F (або один з усереднених критеріїв подібності для класу F);

$m_G^1, m_G^2, \dots, m_G^N$ – те ж для класу G ;

P_1, P_2, \dots, P_N – відповідні показники (координати) випробовуваного зображення P (або відповідні критерії подібності для об'єкта прогнозу);

M_1, M_2 – число навчальних зображень, відповідно, в класах F і G ;

f_i – i -тий об'єкт класу F (або i -тий природний аналог класу F);

g_i – i -тий об'єкт класу G (або i -тий природний аналог класу G).

Переходячи до подібності об'єктів, *вирішальне правило* можна представити таким чином: P пов'язаний з класом F більш високою мірою подібності, ніж з класом G , якщо $\cos \alpha$ більше $\cos \beta$ (і навпаки):

$$\begin{aligned} P \in F, & \quad \text{якщо} \quad \cos \alpha > \cos \beta \quad (\alpha < \beta), \\ P \in G, & \quad \text{якщо} \quad \cos \alpha < \cos \beta \quad (\alpha > \beta). \end{aligned} \quad (10)$$

Метод кореляції дає добрі результати, якщо кут, що охоплює велику кількість зображень одного класу, малий в порівнянні з кутом між еталонами, тобто коли різниця між узагальненими властивостями класів значно більше, ніж між окремими аналогами усередині класу.

Метод евклідової відстані. Цей метод виходить з порівняння евклідової відстані $d(P, m_F)$ і $d(P, m_G)$ між випробовуваним зображенням P і еталонами класів навчальних зображень (рис. 2).

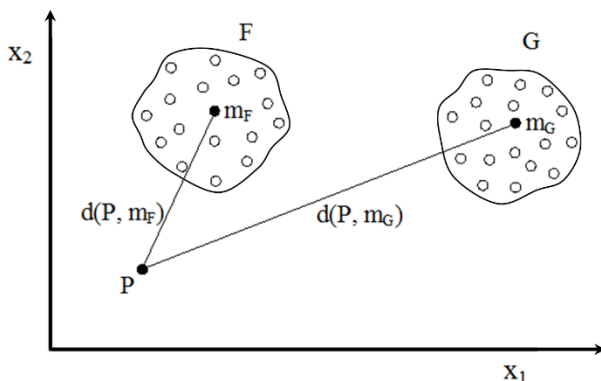


Рис. 2. Застосування методу евклідової відстані для оцінки міри подібності; $d(P, m_F), d(P, m_G)$ – міри подібності

Евклідовою відстанню між двома точками називають довжину прямолінійного відрізка, що з'єднує ці точки. В N -мірному просторі

евклідова відстань між точкою P і класом F визначається як відстань між P і еталоном m_F класу F за формулою:

$$d(P, m_F) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - m_F^i)^2} = \sqrt{(P_1 - m_F^1)^2 + (P_2 - m_F^2)^2 + \dots + (P_N - m_F^N)^2}. \quad (11)$$

Відповідно, відстань між точками P і m_G класу G обчислюється як:

$$d(P, m_G) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - m_G^i)^2} = \sqrt{(P_1 - m_G^1)^2 + (P_2 - m_G^2)^2 + \dots + (P_N - m_G^N)^2}. \quad (12)$$

Вирішальне правило для порівняльної оцінки подібності формулюється таким чином: P пов'язаний з класом F більш високою мірою подібності, ніж з класом G , якщо відстань P до еталона класу F менша, ніж до еталона класу G .

$$\begin{aligned} P \in F, & \quad \text{якщо} \quad d(P, m_F) < d(P, m_G), \\ P \in G, & \quad \text{якщо} \quad d(P, m_F) > d(P, m_G). \end{aligned} \quad (13)$$

Відстань d може бути використана не тільки у вирішальному правилі, але і як самостійна міра подібності.

Необхідно враховувати, що ототоженні міри подібності з косинусом кута між векторами (метод кореляції) або евклідовою відстанню між точками (метод евклідової відстані) дають тільки відносну характеристику подібності. За їх допомогою можна тільки встановити, що між об'єктами, наприклад, P і Q є тісніша аналогія (подібність), ніж, скажемо, між P і R . Отже, не виключена можливість існування аналога T , якого ще немає у базі даних і який може бути ще ближче до P , ніж до Q . У цьому виявляється загальний недолік методів аналогії. У зв'язку з цим для практичних цілей виявлення подібності дуже важливо визначити деякий поріг подібності, тобто максимальну відстань, перевищення якої означатиме відсутність подібності.

Інтегральна міра подібності з урахуванням вагових коефіцієнтів. Описані вище методи розпізнавання дають можливість встановити близькість випробовуваного зображення до одного з класів аналогів одночасно за великою кількістю властивостей (критеріїв подібності). При цьому передбачається однакова «вага» (значущість) всіх N -властивостей, що враховуються.

Теорія розпізнавання образів дозволяє врахувати ступінь впливу окремих чинників за допомогою вагових, тобто значущих, коефіцієнтів, які кількісно характеризують ступінь впливу даної

властивості не взагалі, а тільки для конкретного ряду спостережень: класу навчальних зображень.

Інтегральна міра подібності з урахуванням вагових коефіцієнтів обчислюються за формулою¹⁵:

$$S(P, F) = \frac{1}{M_1} \left[d^2(P, f_1) + d^2(P, f_2) + \dots + d^2(P, f_i) \right], \quad (14)$$

де $d^2(P, f_i)$ – квадрат відстані від об'єкта P до вектора f_i класу F , обчислюваний за формулою:

$$d^2(P, f_i) = \sum_{n=1}^N \delta_n^2 (P_n - f_{in})^2, \quad i = 1, \dots, M_1. \quad (15)$$

Вагові коефіцієнти характеризують значущість (вагу) n -ої властивості (координати) середовища решти N властивостей, виражаються в частках одиниці ($0 < \delta_n \leq 1$) і обчислюються за формулою:

$$\delta_n = \frac{1}{\sigma_n^2 \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{\sigma_n^2} \right)}. \quad (16)$$

де σ_n^2 – дисперсія показників n -ої властивості, яка обчислюється як:

$$\sigma_n^2 = \bar{f}_n^2 - (\bar{f}_n)^2 = \frac{1}{M_1} \sum_{m=1}^{M_1} f_{mn}^2 - \frac{1}{M_1} \left(\sum_{m=1}^{M_1} \bar{f}_{mn} \right)^2, \quad (17)$$

де f_m – m -ий аналог класу F ;

f_{mn} – n -а координата (властивість) m -го аналога f_m класу F ;

M_1 – число аналогів (або навчальних зображень) класу;

\bar{f}_n^2 – середня квадратична показників, що характеризують n -ну властивість (для всіх аналогів класу);

$(\bar{f}_n)^2$ – квадрат середньої величини показника n -ої властивості для всіх аналогів класу.

У розрахунках сума δ_n приймається за одиницю, тобто

¹⁵ Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. Москва : Мир, 1978. 412 с.

$$\sum_{n=1}^N \delta_n = 1. \quad (18)$$

В основі формул (15) і (16) знаходиться простий принцип: у аналогів класу впливовіші властивості (чинники) повинні мати розбіжності (дисперсії) менш значні, ніж розбіжності по другорядних мало впливових властивостях. Інакше кажучи – чим менше дисперсія, тим більше вага. Цей принцип відповідає умовам наближеної подібності, за якими необхідно добиватися збігу критеріїв подібності істотних властивостей, допускаючи неадекватність менш істотних критеріїв.

ВИСНОВКИ

Складні і багатофакторні геологічні процеси, явища та утворення мають властивість однорідного в цілому і неоднорідного в точці. На цій властивості основана принципова можливість подібності геологічних об'єктів і процесів.

Геологічна подібність – це схожість виявлених істотних, узагальнених якостей (однорідність в цілому) при несхожості частковостей (неоднорідність в точці).

Перевага природних аналогів полягає в тому, що вони зберігають багатосторонність та складність зв'язків, характерних для геологічних та інженерно-геологічних процесів.

В нинішній час існує великий обсяг різнорідних даних натурних спостережень сучасних геологічних та інженерно-геологічних процесів, і застосування ПС та інших інтелектуальних систем забезпечує створення баз даних (автоматизованої інформаційної системи), загальний доступ до них та їх використання на стадії дослідження та розвідувальних робіт. У зв'язку з цим застосування методу натурального моделювання практично для всіх геологічних та інженерно-геологічних процесів і явищ є реальним.

Натурна модель і об'єкт прогнозу повинні мати такі умови подібності: наближено пропорційні зміни істотних характеристик, що визначають стан геологічного об'єкта або процес; спільність та незмінність механізму процесу; інтегральну подібність загального процесу за наявності окремих його складових; рівність чи подібність однозначності, у тому числі однакову тривалість протікання процесу; однакові початкові та граничні умови.

Три теореми фізичної подібності інтерпретуються для геологічних об'єктів у вигляді трьох загальних принципів геологічної подібності: 1) принцип наближеної і неповної подібності натурної моделі і об'єкта прогнозу; 2) принцип інтегральної подібності процесу за наявності відхилень від подібності окремих процесів, що його складають; 3) принцип алгоритмізації ознак подібності природного аналога і використання представляючих показників.

Через складний характер більшості геологічних процесів диференціальні рівняння, що характеризують ці процеси, не можуть бути складені або вимагають істотних спрощень. У зв'язку з цим основним засобом отримання критеріїв геологічної подібності в натурному моделюванні є аналіз розмірності.

Вирішальні правила і алгоритми, розроблені в теорії розпізнавання образів, дають можливість оцінити близькість аналізованого об'єкта прогнозу до різних класів об'єктів, характеристики яких відомі.

АНОТАЦІЯ

Геологічні та інженерно-геологічні процеси є складними та багатофакторними. Для їх вивчення та прогнозування ефективним є використання методу натурного (аналогового) моделювання. Перевагою даного методу є те, що він дозволяє враховувати багатобічність та складність зв'язків між внутрішніми та зовнішніми факторами, що формують досліджуваний процес. Розглянуто принципи та методика, які доцільно використовувати під час натурного моделювання. Зокрема, розглянуто деякі методи теорії розпізнавання образів які застосовуються для встановлення геологічної подібності. Висвітлено поняття геологічної подібності, критеріїв геологічної подібності. Розглянуто інтерпретацією теорем фізичної подібності для геологічної подібності. Описано методику виведення критеріїв геологічної подібності та схарактеризовано ці критерії для різних геологічних та інженерно-геологічних процесів.

Література

1. Розовский Л. Б., Зелинский И. П., Воскобойников В. М. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Москва – Киев – Одесса : Вища шк., 1987. 208 с.

2. Petit J.-C. Reasoning by analogy: rational foundation of natural analogue studies. *Applied Geochemistry. Supplementary Issue*. 1992. Vol. 1. P. 9–12.

3. Alexander W. R., Reijonen H. M., McKinley I. G. Natural analogues: studies of geological processes relevant to radioactive waste disposal in deep geological repositories. *Swiss Journal of Geosciences*. 2015. Vol. 108. P. 75–100. <https://doi.org/10.1007/s00015-015-0187-y>

4. Emmerton B., Burgess J., Esterle A, Erskine P., Baumgartl T. The application of natural landform analogy and geology-based spoil classification to improve surface stability of elevated spoil landforms in the Bowen Basin, Australia. *Land Degradation & Development*. 2018. Vol. 29. P. 1489–1508. <https://doi.org/10.1002/ldr.2908>

5. Magnuszewski P., Sendzimir J., Kronenberg J. Conceptual modeling for adaptive environmental assessment and management in the Barycz Vally, Lower Silesia, Poland. *International Journal of Environmental Research*. 2005. Vol. 2(2). P. 194–203. doi: 10.3390/ijerph2005020001

6. Schellart W. P., Strak V. A review of analogue modeling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics*. 2016. Vol. 100. P. 7–32. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.03.009>

7. Зелинский И. П., Черкез Е. А., Гузенко А. В. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Одесса : Изд-во ОГУ, 1983. 126 с.

Зелинский И. П., Елсуфьев С. А., Школа А. В. Геомеханика. Одесса : Астропринт, 1998. 256 с.

8. Количко А. В. Метод инженерно-геологических аналогий. *Проблемы и перспективы*: сб. науч. тр. Москва : АО «Институт Гидропроект», 2000. Вып. 159. С. 5–9.

9. Мелконян Д. В., Черкез Е. А. Применение метода натурального моделирования в управлении эколого-геологическими системами. *Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии*: труды междунар. конф. (Москва, 25–26 мая 2010 г.) / Под ред. В. Т. Трофимова и В. А. Королева. Москва : Изд-во МГУ, 2010. 272 с.

10. Тюнина Н. В. Особенности применения метода инженерно-геологических аналогий при изысканиях на городских территориях. *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. Вып. 9. С. 46.

Уемов А. И. Аналогия в практике научного исследования. Москва : Наука, 1970. 264 с.

11. Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования. Москва : Высш. шк., 1984. 439 с.

12. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов.
Москва : Мир, 1978. 412 с.

Information about the author:

Melkonyan Dzhema Varantsivna,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor at the Department of Engineering Geology and
Hydrogeology

Odessa I. I. Mechnikov National University
2, Dvorianska Str., Odesa, 65082, Ukraine