Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

Геологічний факультет
Кафедра екологічної та інженерної геології
і гідрогеології

ГІДРОГЕОЛОГІЧНЕ ТА ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ

Конспект лекцій
(для студентів спеціальності
103 – “Науки про Землю”)

Львів 2023

УДК 556.3+624.131.37

Гідрогеологічне та інженерно-геологічне моделювання і прогнозування : конспект лекцій (для студентів спеціальності 103 – “Науки про Землю”) / Укл. П. Волошин, Н. Кремінь. [Електронний ресурс] – Львів : Львівський національний університет імені Івана Франка, 2023. – 116 с.

Укладачі: доц. П. Волошин,
доц. Н. Кремінь

Конспект лекцій з дисципліни «Гідрогеологічне та інженерно-геологічне моделювання і прогнозування» для здобувачів галузі знань 10 «Природничі науки», спеціальності 103 «Науки про Землю» освітньо-професійної програми «Інженерна геологія та гідрогеологія» другого (магістерського) рівня вищої освіти.

Розглянуто і затверджено
на засіданні кафедри екологічної
та інженерної геології і гідрогеології
протокол № 10 від 11.04.23 р.

© П. Волошин, Н. Кремінь, 2023
© Львівський національний університет
імені Івана Франка, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП 3
Тема 1.ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНЕ ТА ГІДРОГЕОЛОГІЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ 4
1.1. Актуальність та практичне значення прогнозування та моделювання при виконання інженерно-геологічних досліджень 4
1.2. Понятійна база інженерно-геологічних прогнозів і моделювання, об'єкт, мета і завдання прогнозування та моделювання 6
1.3. Значення моделювання і прогнозування в управлінні взаємодією людини і геологічного середовища 8
Тема 2.ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГІДРОГЕОЛОГІЧНОГО ТА ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ 8
2.1. Фундаментальні властивості геологічного середовища 8
2.2. Системи і системний підхід в інженерно-геологічному прогнозуванні 11
2.3. Геологічне середовище та інженерні споруди – складні природно-технічні системи 13
2.4. Алгоритм системного інженерно-геологічного прогнозування 15
Тема 3.КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОГНОЗІВ ТА ЇХНІЙ ЗВ'ЯЗОК ЗІ СТАДІЯМИ ПРОЄКТУВАННЯ 19
3.1. Класифікація інженерно-геологічних та гідрогеологічних прогнозів 19
3.2. Стадії проєктування інженерних об'єктів 22
3.3. Завдання і види прогнозів на різних стадіях проєктування та етапах інженерно-геологічних досліджень 23
Тема 4.ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНА ТА ГІДРОГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАЦІЯ ТА ЇЇ ВЛАСТИВОСТІ 25
4.1. Основні поняття та структура гідрогеологічної та інженерно-геологічної інформації 25
4.2. Властивості інженерно-геологічної інформації 27
Тема 5.МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ 30
5.1. Основні поняття і визначення, умови, чинники і закономірності виникнення і поширення землетрусів 30
5.2. Методи прогнозування землетрусів на попередніх стадіях проєктування 36
5.3. Методи прогнозування землетрусів на заключних стадіях проєктування 37
Тема 6.МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗСУВІВ 39
6.1. Основні поняття та визначення, характеристика, причини виникнення зсувів, умови і чинники їхнього розвитку 39
6.2. Методи прогнозування зсувів на попередніх стадіях проєктування 44

Тема 7.МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ КАРСТУ 60
7.1. Основні поняття і визначення, карстові загрози, класифікація, умови і чинники розвитку карсту.....60
7.2. Методи прогнозування карсту на попередніх стадіях проєктування.....70
7.3. Методи прогнозування карсту на заключних стадіях проєктування.....76
Тема 8.МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ АБРАЗІЇ.....79
8.1. Умови, чинники розвитку, поширення абразії та її вплив на господарські об'єкти 79
8.2. Методи прогнозу абразійних процесів на попередніх стадіях проєктування.....83
8.3. Методи прогнозування абразії на заключних стадіях проєктування.....84
Тема 9.МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ПІДТОПЛЕННЯ 91
9.1. Основні поняття і визначення, закономірності розвитку та поширення підтоплення.....91
9.2 Методи прогнозування підтоплення на попередніх стадіях проєктування.....96
9.3. Методи прогнозування підтоплення на заключних стадіях проєктування.....100
Тема 10.МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРУНТІВ.....101
10.1. Механічні властивості грунтів як основа забезпечення стійкості і функціональної придатності будівель і споруд 101
10.2. Методи прогнозування механічних властивостей грунтів на попередніх стадіях проєктування.....104
10.3. Методи прогнозування механічних властивостей грунтів на заключних стадіях проєктування 106
Тема 11.КОМП'ЮТЕРНЕ ГІДРОГЕОЛОГІЧНЕ КАРТОГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ 107
11.1. Принципи цифрового картографічного моделювання 107
11.2. Основні положення гідрогеологічного картування як методу моделювання 109
Тема 12.КОМП'ЮТЕРНЕ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНЕ КАРТОГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ 112
12.1. Основні засади інженерно-геологічного картування як методу моделювання 112
12.2. Карти інженерно-геологічного прогнозування 115
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....116

ВСТУП

Гідрогеологічне та інженерно-геологічне моделювання і прогнозування є надзвичайно актуальним комплексним завданням, яке постає перед низкою проєктних установ і інституцій регіонального і загальнодержавного значення. Висновки даних організацій є вирішальними при виборі методів подальшої підготовки і реалізації проєктів будівництва відповідальних житлових споруд, об'єктів критичної та цивільної інфраструктури тощо.

Власне цю тематику висвітлено у даному конспекті лекцій з дисципліни «Гідрогеологічне та інженерно-геологічне моделювання і прогнозування». Матеріали конспекту можуть бути використані не лише здобувачами спеціальності 103 – Науки про Землю, а і суміжних галузей знань.

Мета вивчення дисципліни: формування у здобувачів, зокрема майбутніх фахівців інженер-геологів і гідрогеологів спеціальних знань з теорії, методології кваліфікованого вивчення поверхневої частини земної кори як середовища життя і діяльності людини, отримання знань з теорії наукового моделювання і прогнозування розвитку небезпечних ендогенних та екзогенних геологічних процесів.

Завдання дисципліни – вивчення теоретичних основ гідрогеологічного та інженерно-геологічного прогнозування і моделювання, основних законів розвитку небезпечних процесів, алгоритму системного прогнозування, оцінки точності і достовірності прогнозів, їх верифікація, принципів і методів моделювання і прогнозування процесів і забруднення складових геологічного середовища

Конспект підготовлено згідно з програмою дисципліни «Гідрогеологічне та інженерно-геологічне моделювання і прогнозування». Він містить 12 тем, які викладені в логічній послідовності, починаючи з сутності основних понять гідрогеологічного та інженерно-геологічне моделювання і прогнозування та завершуючи розглядом сучасних цифрових методів моделювання і прогнозування.

Тема 1
ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНЕ ТА ГІДРОГЕОЛОГІЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

1.1. Актуальність та практичне значення прогнозування та моделювання при виконання інженерно-геологічних досліджень

Науково-технічна революція, яка зумовила бурхливий розвиток продуктивних сил, виникнення великих міст і промислово-міських агломерацій та промислових комплексів, поставила перед суспільством проблему охорони і раціонального використання природного середовища. В системі «природне середовище» важливу роль відіграє її підсистема – геологічне середовище, яке виконує низку екологічних функцій. Його охорона і раціональне використання передбачає розробку і реалізацію комплексу заходів, які забезпечують його оптимальне існування та еволюцію.

Оптимізація взаємодії геологічного середовища з технічними об'єктами потребує передбачення того, як ця взаємодія буде впливати на геологічне середовище, в якому напрямку і з якою швидкістю буде змінюватися її структура і властивості, тобто потребує відповідних прогнозних оцінок. Прогноз несприятливих та небезпечних геологічних процесів, реалізація профілактичних і захисних заходів є зараз важливим та актуальним завданням державного значення.

Відсутність прогнозних оцінок, їхня низька якість чи помилковість суттєво підвищують ризик виникнення техногенних аварій і катастроф, зумовлених розвитком як ендогенних, так і екзогенних небезпечних геологічних процесів. У світі є чисельні приклади завдання масштабних економічних та екологічних збитків, які нерідко супроводжувались людськими жертвами.

Так, наприклад, потужний зсув об'ємом понад 200 млн м ^{3}, який відбувся 9 вересня 1963 р. в Італії в долині р. Пяйве у межах напірної греблі гідроелектростанції Вайонт висотою 265,5. Тут чаша водосховища на ділянці довжиною 2 км протягом 15–30 сек був наповнений породами, що змістилися на висоту до 175 м вище рівня води. Швидкість руху осуву становила 15–30 м/сек. Хвилі, що утво-

рилися внаслідок зміщення порід переливалися через греблю. Їхня висота перевищувала 100 м над нею. Внаслідок цього в долині річки хвилею буди зруйновані міста: Лонжероне, Піраго, Вілланова, Рівальта і Фас. Загинуло близько 3 тис. осіб. Катастрофа з моменту виникнення зсуву до руйнування міст тривала близько 7 хвилин.

Зсувом у м. Чернівці, який відбувся у лютому 1995 р. було зруйновано 30 житлових будинків, недопустимих деформацій зазнали промислові об'єкти, під загрозою руйнування опинилась міська лікарня та залізнична колія міжнародного сполучення. У червні 1997 р. катастрофічним зсувом у Дніпрі у житловому масиві «Тополя-1» було зруйновано 9-ти поверховий житловий будинок, школа, два дитячі садки, декілька одноповерхових будинків та інженерна інфраструктура.

Неякісний прогноз розвитку карсту у писальній крейді в районі будівництва Рівненської атомної станції призвів до загрози руйнування першого енергоблоку, зазнали руйнування декілька цивільних об'єктів. Видобуток сірки з кар'єру поблизу Новояворівська (Львівська область) спровокував утворення понад 1 тисячу поверхневих карстових форм, зумовив виникнення недопустимих деформацій у житлових будинках.

Найнебезпечнішими серед геологічних процесів є звичайно землетруси. У липні 2020 р. в США відбувся найпотужніший за 20 останніх років землетрус у штаті Каліфорнія магнітудою 7,1. У цьому ж році землетрус у Туреччині з магнітудою 6,8 призвів до загибелі більше 40 осіб, травмування понад 1600 осіб, численних руйнувань будівель. 31 січня 2020 р. в Румунії та Україні землетрус магнітудою 6,7. У лютому 2023 р. серія землетрусів у Туреччині і Сирії магнітудою 7,8 призвела до масштабних руйнувань і загибелі кілька десятків тисяч людей. Цей перелік можна продовжувати й далі. Названі процеси можуть мати як природний, так і техногенний характер.

Усе це ставить на порядок денний необхідність розробки науково обґрунтованих прогнозів.

Прогноз у перекладі з грецької мови означає майбутнє. Тривалий час прогнозування було різновидністю пророцтв, передчуттів та передбачень і не мало під собою надійних наукових підвалин. Сьогодні прогностика – це наукова дисципліна, яка охоплює мето-

дологічні принципи прогнозування та особливості та закономірності розробки прогнозів у різних галузях науки.

Загально відомо, що оцінка інженерно-геологічних умов деякої території, навіть змістовна, завжди в явному, або неявному вигляді містить елементи прогнозу, передбачення того, як і у якій формі буде проявлятися взаємодія між геологічним середовищем і проєктованою спорудою, які інженерно-геологічні процеси будуть розвиватися при його будівництві та експлуатації. Перед інженерною геологією стоїть подвійне завдання. Воно полягає в тому, щоб на основі наукових припущень забезпечити вибір місця розташування проєктованої споруди і дати прогноз розвитку інженерно-геологічних процесів. Вибір цього місця передбачає інтерполяцію (рідше екстраполяцію) інженерно-геологічної інформації, отриманої в окремих точках геологічного середовища на всю її область. Тобто, вибір місця розташування споруди містить елементи просторового прогнозу властивостей геологічного середовища. Таким чином, прикладним завданням будь яких інженерно-геологічних досліджень є передбачення (прогноз) взаємодії інженерної споруди з геологічним середовищем в процесі її будівництва та експлуатації.

1.2. Понятійна база інженерно-геологічних прогнозів і моделювання, об'єкт, мета і завдання прогнозування та моделювання

Інженерно-геологічний прогноз – це науково-обґрунтоване передбачення змін структури і властивостей компонентів інженерно-геологічних умов природної чи природно-технічної геосистеми під впливом природних і антропогенних чинників у часі і просторі.

Прогнозування – послідовність операцій з інженерно-геологічною інформацією, які виконуються з метою отримання прогнозу.

Під суттю прогнозування розуміють виконання низки дослідницьких операцій, які базуються на порівняльно-геологічному аналізі та спрямовані на отримання конкретного результату в процесі розробки прогнозу. Висхідною інформацією для здійснення будь яких операцій є результати інженерно-геологічних розвідувань і стаціонарних інженерно-геологічних спостережень у межах досліджуваної території.

Метод прогнозування – спосіб дослідження об'єкта прогнозування, спрямований на розробку прогнозів.

Методика прогнозування – сукупність спеціальних правил і прийомів розробки конкретних прогнозів.

Точність прогнозу означає оцінку довірчого інтервалу його результатів для заданої вірогідності здійснення прогнозу.

Достовірність прогнозу - ступінь його відповідності дійсному стану об´єкта, що прогнозується в майбутньому.

Помилкою прогнозування є величина відхилення результату прогнозу від дійсного стану об'єкта.

Верифікація прогнозу означає оцінку його достовірності, точності і обґрунтованості.

Інженерно-геологічна модель – це абстрактний опис того чи іншого геологічного об'єкту чи процесу, який дозволяє робити передбачення відносно цього об'єкту чи процесу.

Модель має характеризуватися простотою побудови, максимально відображати структуру і властивості об'єкта моделювання, придатністю для використання при розрахунках проєктованих споруд та їхнього підґрунтя, вирішення завдань будівництва експлуатації споруд, охорони та раціонального використання досліджуваної території.

Прогнозна модель – це модель об'єкта прогнозування, дослідження якої дозволяє отримати інформацію про можливі стани об'єктів у майбутньому, шляхах і строках їхньої реалізації.

Об'єктами інженерно-геологічного прогнозування найчастіше виступають складні природно-господарські територіальні системи, або природні геосистеми чи їхні компоненти.

Метою прогнозування є оптимізація взаємовідносин інженерно-господарської діяльності людини з природним (геологічним) середовищем (оптимізація проєктування, будівництва та управління функціонуванням природно-господарських систем).

Головним завданням інженерно-геологічного прогнозування є передбачення впливу господарської діяльності людини на природне у тому числі геологічне середовище, а також вплив природного і техногенно зміненого геологічного середовища на господарські об'єкти, охорона та раціональне використання природних ресурсів.

1.3. Значення моделювання і прогнозування в управлінні взаємодією людини і геологічного середовища

З метою забезпечення нормальних умов життєдіяльності населення необхідно здійснювати управління станом навколишнього природного середовища. Управління природно-природно-технічними системами пов'язане з передбаченням їхнього розвитку, тобто прогнозуванням. Досвід підтверджує, що послідовне використання розробки і використання прогнозів може забезпечити стійке управління розвитком природно-технічних систем.

Управління взаємодією людини з геологічним середовищем здійснюється головно через проєктування. Проєкти екологічно небезпечних об'єктів та будівель високого класу відповідальності, виведення з ладу яких може призвести до загибелі людей мають містити розділ оцінки впливу на довкілля. Така оцінка здійснюється на основі широкого використання прогнозних оцінок. Без таких оцінок жоден проєкт реалізований не може бути. Тому прогнозування взаємодії технічних споруд з природним середовище важко переоцінити.

Тема 2
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГІДРОГЕОЛОГІЧНОГО ТА ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ

2.1. Фундаментальні властивості геологічного середовища

Теоретичною основою геоекологічного прогнозування слугують фундаментальні властивості геологічного середовища, теорія взаємодії геологічного середовища з зовнішнім середовищем у тому числі з її штучними елементами, а також загальна теорія розвитку ендогенних та екзогенних геологічних процесів.

Ключова роль в геоекологічному прогнозуванні належить системному підходу, адже геологічне середовище є класичним прикладом системного об'єкта.

Геологічне середовище – це складна, динамічна система, яка включає мінеральну, органічну, водну та газову складові, а також різноманітні геофізичні поля.

Геологічне середовище має низку фундаментальних властивостей, які великою мірою визначають їхню поведінку при взаємодії з інженерними об'єктами.

Такими властивостями зокрема є:

Мінливість- загальна властивість матерії (її здатність змінюватися у просторі та часі), яка відображає тенденцію її розвитку (еволюцію). Мінливість геологічного середовища (ГС) у часі та просторі відповідає формам існування матерії. Зміни геологічного середовища, які фіксуються як зміна елементів середовища, їхніх відношень та властивостей, є геологічним процесом розвитку Землі як планети.

Зміна геологічного середовища у просторі, його просторова структура відображають просторову мінливість комплексу фізичних полів, під впливом яких формується і змінюється геологічне середовище. Крім фізичних, змінюються також гідродинамічні, гідрохімічні та геохімічні поля.

Мінливість деякого геологічного об'єкта відображає властивості простору і часу цього об'єкта. Вона формує його неоднорідність, яка виявляється у різноманітності властивостей обєкта у різних точках. Неоднорідність є проявом мінливості, її наслідком. Неоднорідність відноситься до мінливості так, як прояв процесу (на деякий момент часу) до самого процесу.

Неоднорідність геологічного середовища виявляється на різних рівнях його організації. Кожному рівню організації відповідає свій рівень неоднорідності. Наприклад неоднорідність на рівні формацій, фацій, генетичних типів, неоднорідність літологічного, або мінерального складу підземних вод, неоднорідність фізико-механічних властивостей грунтів.

Неоднорідність геологічного середовища виявляється в таких важливих її властивостях як ***анізотропія і симетрія***. Анізотропію можна визначити як залежність деякої функції геологічного параметра від перетворення обертання. Ця властивість виявляється на всіх рівнях організації геологічного середовища: у вигляді структурної поверховості, ярусності, фаціальної мінливості, шаруватості, різниці структур, фізико-механічних властивостей грунтів і міри їхнього розсіювання в головних напрямках мінливості і за глибиною. Анізотропія є результатом просторово-часової мінливості структури поля літогенезу. Найяскравішим проявом анізотропії є суттєва різ-

ниця в структурі та властивостях геологічного середовища у плані і за глибиною. Часто, в силу специфіки умов нагромадженя осадків виділити квазіізотропну область можна лише з використанням статистичного апарату і відповідних статистичних критеріїв.

Геологічному середовищу властива найвища форма анізотропії: **симетрія – дисиметрія.**

Симетрія це також одна з фундаметальних властивостей геологічного середовища. Ця властивість виявляється на всіх рівнях організації геологічного середовища, починаючи з рівня мінералів (симетрія кристалічної гратки) і закінчуючи рівнем геооболонок (симетрія шару).

Головні принципи симетрії подані у працях французького вченого П. Кюрі. З принципу П. Кюрі випливає:

- по-перше, диссиметрія, безумовно, повинна виявлятися не тільки в явищах, а й у їхніх причинах, у фізичних полях, які зумовлюють формування структури та властивостей геологічного середовитща, у кінцевому результаті – у полі літогенезу.
- по друге, диссметрія поля літогенезу – результат суми диссиметрій фізичних полів, його компонентів.
- по-третє, диссиметрія геологічного середовища – це стан геологічного простору, який відображає симетрію – диссиметрію поля літогенезу.

Відсутність в середовищі елементів симетрії деякого порядку є проявом диссиметрії, яка створює явище.

Дослідження симетрії є основою вирішення низки наукових і прикладних завдань: реконструкції процесів формування геологічних об’єктів, розробки критеріїв якості моделювання процесів формування геологічних об’єктів, діагностики генези об’єктів, розробки науково обґрунтованих методів розвідки та опробування геологічних об’єктів.

Однією з важливих властивостей геологічного середовища є його дискретність.

Дискретність твердої мінеральної речовини виявляється у вигляді пористості, порожнинності, тріщинуватості, тектонічних порушень. Дискретністю твердої фази зумовлена присутність у геологічному середовищі рідкого, газового та біологічного компонентів. Дискретність твердої мінеральної речовини визначає просторове співвідношення рідкої газової та біологічної складових, го-

ловні властивості геологічного середовища, масштабний ефект у властивостях та їхніх змінах під впливом внутрішніх та зовнішніх чинників.

Від дискретності твердої мінеральної речовинизалежать властивості рідкої і газоподібної фаз, їхня рухомість, структура, фізико-хімічна активність.

Важливою фундаментальною властивістю, яка відрізняє його від інших простих тіл, є **організованість**, що виявляється передовсім у рівнях організації геологічної матерії – мінеральному гірськопородному, формаційному, у наявності структур різних рівнів, які зумовлюють анізотропність, симетрію-диссиметрію.

Фундаментальні властивості геологічного середовища є методологічною та методичною базою інженерно-геологічного та гідрогеологічного прогнозування та моделювання, адже лише на основі знання законів розвитку геологічного середовища можлива розробка науково обгрунтованих прогнозів його змін під впливом природних і техногенних чинників.

2.2. Системи і системний підхід в інженерно-геологічному прогнозуванні

Вирішення багатьох прогнозних завдань практично неможливе без використання системного підходу. Адже геологічне середовище є класичним прикладом складної динамічної системи.

Принципи системного підходу та основи теорії були розроблені австрійським біологом Людвігом фон Берталанфі у 40-х роках двадцятого століття. Це наукова методологія, яка дозволяє вирішувати широкий спектр теоретичних і прикладних проблем.

Під **системою** розуміють впорядковану множину елементів, взаємопов’язаних між собою і утворюючих цілісну єдність.

У зв’язку з тим, що до складу системи входять елементи різних порядків, то між ними встановлюються відносини ієрархії. Це означає, що дана система має входити до складу системи вищого порядку, а будь який її елемент, за винятком останнього, який замикає систему знизу, має виступати в якості системи нижчого порядку у порівнянні з початковою. Система це не просто сукупність окремо взятих елементів, а сукупність взаємовідносин між цими елементами. Це означає, що властивості об’єкта як цілого визначається не

тільки і не стільки властивостями його елементів, скільки властивостями його структури, особливими інтегративними зв'язками об'єкта, що розглядається. Звідси випливає, що властивості системи не є простою сумою властивостей компонентів, що його складають. Вона має нові якості, які відрізняються від властивостей елементів.

Система виникає лише тоді, системоутворюючі зв'язки між елементами перетворюють набір елементів у єдине ціле. Дуже важливою характеристикою системи є її структура, під якою у теорії систем розуміють тип взаємовідносин і взаємодії елементів, зв'язки, їхня впорядкованість і організація, які зберігаються при всіх змінах системи і які руйнуються разом з нею. Структура системи – це сукупність законів, притаманних даній системі, які обумовлюють форму та поведінку її як цілого, підкреслюючи цим постійність структури для конкретної системи Натомість незмінність структури не виключає її динамічності в певних межах.

Будь яка система, згідно У. Р. Ешбі, характеризується системотворними зв'язками додатнього і від'ємного типу. Від'ємні зв'язки спрямовані на забезпечення стану рівноваги системи, додатні – навпаки на виведення її з рівноваги.

Сутність системного підходу полягає в тому, що об'єкт дослідження розглядається як єдине ціле, а елементи, що входять до системи, вивчаються не самі по собі, а з точки зору системи. При цьому ціле вважається важливішим, ніж елементи, що його складають. Основним у системному підході є вимога підпорядкованості цілей і критеріїв підсистем загальносистемним цілям і критеріям.

Системний підхід дає можливість з розмаїття чинників виділити ті, які створюють найбільший вплив на її роботу.

Система, структура якої під впливом зовнішніх сил або внутрішніх взаємодій змінюється у часі, є динамічною. Якщо структура системи не змінюється у часі таку систему називають статичною.

За характером взаємодії з іншими системами розрізняють відкриті та закриті системи. Система, що взаємодіє з іншими системами, якій властивий масоенергообмін із зовнішнім щодо неї середовищем, називається відкритою. У закритій системі відбувається лише енергообмін.

Теорією систем передбачено клас організованих систем. Організована система – це система, яка зберігає свою організованість у часі. Такі системи мають властивість адаптації, яка є процесом змі-

ни характеристик системи, що дають змогу досягти найліпшого або принаймні узгодженого функціонування у змінних умовах.

Важливими властивостями систем є їхня саморегуляція – здатність природної системи до відновлення внутрішніх властивостей і структур після будь-якого природного або антропогенного впливу на них, стійкість – здатність системи за допомогою внутрішніх механізмів саморегуляції чинити опір зовнішнім збурювальним впливам, адаптуватися до них без істотних змін структурно-функціональних параметрів або швидко повертатися до нормального (стійкого) стану, адаптація – здатність системи пристосовуватися до умов навколишнього середовища.

Геологічні системи є динамічними – їхні елементи, відношення та властивості, а отже і структура з тією чи іншою швидкістю змінюються в часі.

Для геологічних тіл, які слугують середовищем і підґрунтям інженерних споруд характерна низка специфічних властивостей, зокрема: а) велика кількість компонентів які їх складають, б) цілісність і функціональна єдність, в) складність поведінки, г) статистичний розподіл у просторі та часі як параметрів тіл, так і впливів на них, д) функціонування під впливом зовнішнього впливу, при якому необхідно враховувати роботу окремих частин тіл (наприклад, під впливом навантаження від споруди змін зазнає головно мінеральна складова грунту, при створенні меліоративних систем чи водозаборів, змінюється переважно водна складова, зокрема швидкість фільтрації та її напрямок).

2.3. Геологічне середовище та інженерні споруди – складні природно-технічні системи

Сукупність об’єктів, створених інженерно-господарською діяльністю людини та частина природного (геологічного) середовища, що знаходиться у сфері їхнього впливу носить назву природно-технічної чи природно-господарської системи (ПТС, ПГС). У таких системах відбуваються взаємодії між природними (гірськими породами, підземними водами, газами) і штучними елементами (спорудами), наслідком яких є зміна стану природно-технічної системи або інженерно-геологічні процеси. Характер цієї взаємодії має забезпечити нормальне функціонування всієї системи. Створюючи

штучні елементи системи, людина заздалегідь, спираючись на дані досліджень і розрахунків, реалізовує управління системою, передбачає (прогнозує) режим поведінки створеної ПТС, інтенсивність і характер змін та відношень між її елементами, зміну її структури. Завдання управління ПТС полягає у досягненні оптимального режиму функціонування технічної підсистеми у межах гомеостазису. Порушення гомеостатичних меж потребує проведення захисних заходів, які забезпечують її стабільність.

Взаємодія інженерної споруди з геологічним середовищем залежить від поєднання типу споруди з типом середовища як принципово різних за матеріалом і поведінкою: ГС існує за природними законами, а інженерні споруди – за технічними.

Природно-технічні системи характеризується низкою законів розвитку, зокрема:

1. *Закон відповідності.* ПТС виникає в результаті взаємодії геологічних гідрогеологічних, геоморфологічних та інших компонентів природного середовища та об'єктів які створюють зовнішній вплив на них. При цьому в даних природних умовах кожний зовнішній вплив формує певну природно-технічну геосистему.
2. *Закон успадкованості.* Поведінка ПТГ при даному зовнішньому впливі повністю визначається історію її розвитку.
3. *Закон взаємозумовленості.* Зовнішній вплив на будь яку складову ПТГ тією чи іншою мірою передається решті складових.
4. *Закон стійкості.* Стійкість природно-технічної геосистеми тим більша, чим менші за розмірами область впливу, величина та інтенсивність зовнішнього впливу.
5. *Закон адаптації.* Будь яка природно-технічна геосистема шляхом саморегуляції прагне прийти до рівноваги із зовнішнім впливом.

Закон відповідності стверджує, що інженерно-геологічні проблеми виникають лише в тому випадку, якщо геологічне середовище стикається з зовнішнім по відношенню до нього впливом, який створюється інженерною спорудою.

Закон взаємозумовленості проявляється через єдність і в той же час специфічність окремих складових геологічного середовища. В залежності від особливостей зовнішнього впливу їхня реакція може виникати не одночасно і відбуватися по різному. Наприклад

при стисненні глинистих порід напруга на скелет передається поступово, в міру витиснення води з пор породи.

У відповідності з законом стійкості чим більші розміри споруди, тим більші порушення в інженерно-геологічній підсистемі воно викликає.

При інженерно-геологічному прогнозуванні важливо прослідкувати спрямованість розвитку інженерно-геологічної підсистеми з точки зору можливостей її адаптації до заданого зовнішнього впливу, виділити складові, які найшвидше реагують і покращення яких призведе до стабілізації системи.

2.4. Алгоритм системного інженерно-геологічного прогнозування

Результатом будь-яких інженерно-геологічних досліджень є прогноз. Так як об'єкт прогнозу належить до складних систем, то і сам прогноз - це складна система висновків. В якості підсистем цієї системи виступають окремі прогнози: геологічної будови, гідрогеологічних умов властивостей порід для різних видів будівництва та експлуатації споруд. Елементами підсистем можуть бути, наприклад, у випадку прогнозу гідрогеологічних умов рівень підземних вод у різні періоди часу, коефіцієнти фільтрації тощо.

Інженерно –геологічне прогнозування виконується з метою передбачення результатів взаємовпливу сукупності компонентів природного середовища, які беруть участь в формуванні інженерно-геологічних умов і зовнішнього впливу, яке створюється в результаті інженерно-господарської діяльності людини. У деяких випадках, наприклад, при прогнозуванні абразії на берегах морів, водосховищ, наслідків сейсмічної активності такий вплив створюється природними силами. Системний характер інженерно-геологічного прогнозування знаходить своє відображення у тому, що воно спрямовано на передбачення поведінки об'єктів прогноз загалом, з врахуванням основних чинників, які формують інженерно-геологічні умови.

Змістовний алгоритм системного інженерно-геологічного прогнозування виглядає наступним чином:

1. Аналіз зовнішнього впливу проводиться на основі технічного завдання на розробку інженерно-геологічного прогнозу. Таке

завдання має вміщувати інформацію про основні характеристики зовнішнього впливу (призначення об'єкта прогнозування, специфіка роботи, проєктованої споруди і його окремих частин, характер та інтенсивність впливу тощо), вимоги завчасності, прогнозних оцінок, їхньої точності і форми подачі результатів прогнозування. У випадку вивчення небезпечних геологічних процесів виявлення зовнішнього впливу, який визначає виникнення і розвиток процесу, часто стає самостійним завданням, вирішення якого передує власне прогнозуванню.

Спираючись на аналіз зовнішнього впливу, можна передбачити головні напрямки прогнозування і вибрати методи розробки прогнозу.

2. Встановлення ієрархії в інженерно-геологічній системі, числа її підсистем та елементів. Ці операції виконуються шляхом аналізу роботи зовнішнього впливу в конкретній природній ситуації і полягає в оцінці поширення впливу об'єкта, який створює вказаний вплив, на кожну з підсистем інженерно-геологічної системи.
3. Визначення меж інженерно-геологічної системи проводиться стосовно даного зовнішнього впливу в природних умовах, що розглядаються.
4. З'ясування значимості окремих підсистем, що входять до складу інженерно-геологічної системи. Значення тієї чи іншої системи залежить головно від її впливу на об'єкт, який формує зовнішній вплив, чи, навпаки, від впливу такого об'єкта на підсистему.
5. Прогнозування кожної з підсистем з врахуванням їхнього взаємовпливу, характеру і швидкості реакції на зовнішній вплив. Слід зазначити, що таке прогнозування здійснюється з позиції інженерно-геологічної системи загалом.
6. Прогнозування роботи інженерно-геологічної системи виконується враховуючи прогноз роботи усіх її підсистем.
7. Верифікація прогнозу (оцінка достовірності) є заключним етапом прогнозування.

Слід зауважити, що побудова ієрархії інженерно-геологічної системи проводиться з метою встановлення тих її компонентів, які визначають її структуру, тобто життєздатність, а відповідно підлягає врахуванню при прогнозуванні.

При прогнозуванні в інженерно-геологічній системі доцільно виділяти геологічну, гідрогеологічну і геоморфологічну підсистеми. У відповідності зі стадією проєктування, масштабом і характером зовнішнього впливу перераховані підсистеми поділяються на підсистеми вищих порядків.

У залежності від зовнішнього пливу ієрархія підсистем всієї системи може бути різною. Наприклад, при проєктуванні наземних і підземних споруд, типу фундаментів (мілкого закладання чи паль), наявність малопотужних прошарків торфу, які сильно впливають на деформаційну поведінку споруди. За даними виконання польових і лабораторних робіт уявлення про ієрархію системи корегуються.

Межі окремих підсистем і всієї системи встановлюються в залежності від особливостей будови геологічного середовища і розмірів області зовнішнього впливу. Наприклад за наявності слабких чи просідаючих грунтів вони мають досліджуватися на усю їхню потужність. При проєктуванні пальових фундаментів - значно нижче глибини їхнього закладання. При дослідженні зсувонебезпечних ділянок межі об’єкта дослідження мають бути нижче залягання потенційних поверхонь ковзання.

Значимість підсистем, що входять в інженерно-геологічну систему і необхідність їхнього врахування при прогнозуванні зумовлена перш за все величиною їхнього вкладу у вплив на роботу всієї системи. Значення підсистем залежить від того, наскільки швидко і відчутно зовнішній вплив передається від однієї підсистеми до іншої. Порушення геоморфологічної підсистеми (підрізка схилу) призводить часто до руйнування геологічної підсистеми. Підйом рівня грунтових вод зумовлює зважуючий вплив на породи на схилі і може викликати його сповзання.

Вивчення гідрогеологічної складової особливо важливе на ділянках розвитку карсту. Адже гідродинамічні та гідрохімічні умови відіграють провідну роль у можливості та інтенсивності розвитку карстового процесу. Загальний прогноз інженерно-геологічних умов будується на базі окремих прогнозів, з врахуванням роботи всієї природно-технічної геосистеми.

При проведенні верифікації прогнозів важливе місце належить ***аналізу можливих помилок***, головні з яких полягають у наступному:

1) неправильні уявлення про розвиток природно-технічної геосистеми,
2) неправильна оцінка взаємовпливу інженерно-геологічної системи і зовнішнього впливу,
3) відсутність достатньої і достовірної інформації про інженерно-геологічну і технічну підсистеми,
4) недостатній досвід прогнозиста, який виявляється через надмірний оптимізм чи надмірну обережність,
5) неправильна інтерпретація отриманих даних, зокрема із-за використання неправомірних чи неадекватних конкретній ситуації теоретичних положень чи методичних прийомів.

Розрізняють наступні ***види верифікації прогнозів***:

а) пряма верифікація, коли оцінка достовірності прогнозу проводиться методом відмінним від використаного при прогнозуванні,
б) непряма верифікація проводиться шляхом співставлення з прогнозами, отриманими з інших джерел інформації,
в) інваріантна верифікація виконується шляхом адекватності прогностичної моделі, з допомогою зворотніх розрахунків (модуля деформації за осіданням споруди, коефіцієнта фільтрації за водопритоками),
г) верифікація опонентом (за критичними зауваженнями опонента),
д) верифікація за допомогою виявлення і обліку джерел регулярних похибок прогнозу.

Процедура прогнозування – це обов’язковий атрибут діяльності проєктувальника та інженера-геолога, геолога та експлуатаційника (див. табл. 1).

Таблиця 1.

Взаємозв’язок етапів господарської діяльності з метою інженерно-геологічного прогнозу

Етап господарської діяльності	**Основна мета діяльності**	**Мета інженерно-геологічного прогнозу**
Проєктування, різноманітних господарських об’єктів	Оптимальне проєктування	Оптимізація проєктування
Будівництво різноманітних господарських об’єктів	Оптимальне будівництво	Оптимізація будівництва
Експлуатація різноманітних господарських об’єктів	Оптимальне управління спорудами	Оптимізація управління ПТС

Геолог не лише отримує інформацію, та розробляє прогнози, але і спільно з проєктувальником розробляє заходи забезпечення нормального функціонування ПТС. Прогноз поведінки ПТГ, розроблений в процесі проєктування, є прогноз інженерно-геологічних процесів і властивостей середовища, які враховуються при проєктуванні споруди. Інженерно-геологічний прогноз при будівництві ПТС полягає у співставленні прогнозних даних про структуру і властивості геологічного середовища і її рух з фактичними даними, отриманими в період будівництва. Прогноз під час експлуатації ПТС передбачає прогноз інженерно-геологічних процесів, які будуть розвиватися у майбутньому, розробляється на підставі даних спостережень за інженерно-геологічними процесами, що розвиваються.

Тема 3
КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОГНОЗІВ ТА ЇХНІЙ ЗВ'ЯЗОК ЗІ СТАДІЯМИ ПРОЄКТУВАННЯ

3.1. Класифікація інженерно-геологічних та гідрогеологічних прогнозів

Класифікація (*від лат. classis – клас та facio – роблю*) – це система розподілу об'єктів за групами відповідно до наперед визначених ознак. У деяких випадках вживають термін категоризація у значенні розподіл об'єктів на категорії.

Прогнозування змін геологічного середовища під впливом тих чи інших господарських об'єктів здійснюється з різною точністю, охопленням різних складових довкілля потребує використання різних методів прогнозування. Головною метою класифікації прогнозів є впорядкування уявлень про можливі класи інженерно-геологічних прогнозів, в основі яких лежать ті чи інші ключові ознаки. Обмежене число таких ознак забезпечує простоту класифікації і в той же час класифікація задовольняє поставлену мету.

Першою і дуже важливою ознакою, за якою поділяють прогнози є характер оцінок. За цією ознакою прогнози поділяються на якісні і кількісні.

Якісний прогноз вміщує якісну оцінку майбутнього стану геосистеми в цілому або оцінку будь-яких її властивостей чи структури у майбутньому.

Оцінка передбачає певні тенденції в розвитку системи, результати її розвитку на деякий більш меш точно встановлений момент часу (або без прив'язки до будь-якого моменту часу) і вірогідність досягнення цих результатів.

Кількісний прогноз полягає в описі майбутньої структури і властивостей геосистеми у кількісних показниках, в отриманні показників (чи функцій), які характеризують структуру і властивості геосистеми у задані моменти майбутнього часу або у деякий кінцевий момент часу. При цьому передбачається, що кількісні показники прогнозу відповідають заданій точності і надійності, або вказуються їхні зміни у часі.

Друга класифікаційна ознака передбачає поділ прогнозів за групами методів прогнозування. Серед існуючих методів прогнозування виділяється чотири групи:

1) метод індикаторів (геологічних, фізико-географічних, антропогенних);
2) інженерно-геологічних аналогій;
3) методи фізичного моделювання;
4) методи математичного моделювання.

Третьою класифікаційною ознакою, за якою поділяють інженерно-геологічні прогнози є їхнє відношення до часу. За цією ознакою виділяється три категорії прогнозів:

1) прогнози безвідносні до часу;
2) строкові прогнози, які даються на конкретний термін,- кількісні за часом;
3) безстрокові прогнози на майбутній час, строк яких не встановлений, або встановлюється шляхом якісних оцінок – прогнози якісні за часом.

Четвертий набір ознак, які враховуються при класифікації, передбачає поділ їх за відношенням до геологічного простору. За цією ознакою інженерно-геологічні прогнози поділяються на окремі (для окремих будівель і споруд), локальні (для групи будівель і споруд, територій міст тощо), регіональні (адміністративних областей, окремих геоструктур, артезіанських басейнів тощо), глобальні, розробляються з метою передбачення змін структури і властивостей

геологічного середовища в масштабі планети (зміни внаслідок аридизації клімату).

П'ятою класифікаційною ознакою є охоплення властивостей геологічного середовища. За ступенем охоплення компонентів інженерно-геологічних умов прогнози поділяються на загальні, які передбачають зміни інженерно-геологічних умов (структури і властивостей геосистеми) загалом і на окремі, метою яких є передбачення однієї властивості, або одного компонента інженерно-геологічних умов.

Перший набір ознак не потребує додаткових коментарів. З другої групи слід зупинитися на методах індикаторів. Це методи прогнозу на основі загальних уявлень, методи евристичного прогнозування. Для прогнозу з використанням цього методу необхідно мати деякі дані, які є індикаторами зміни структури чи властивостей геосистеми, компонентів інженерно-геологічних умов. Це може бути інформація геологічного чи фізико-географічного характеру у тому числі і дані про зміни природного середовища під впливом господарської діяльності людини. Маючи такі дані можна спрогнозувати поведінку системи у майбутньому. Наприклад маючи інформацію про наявність водорозчинних порід та господарську діяльність, пов'язану з впливом на динамічний режим підземних вод можна передбачити активізацію карстового процесу.

Поділ інженерно-геологічних прогнозів за їхнім відношенням до часу є достатньо своєрідним. В метеорології, фізиці моря, гідрології прогнози по завчасності поділяють на короткострокові, малої завчасності і довгострокові.

Так, наприклад, морські прогнози відносять до категорії довгострокових, якщо прогнозування ведуть на строк до 10 діб. При побудові інженерно-геологічної класифікації використовується дещо інший підхід до часового аспекту прогнозу. Відмінність цього підходу полягає в тому він не передбачає встановлення будь-яких термінів пронозу, а виходить з можливості чи неможливості дати оцінку на потрібний термін.

Безстрокові прогнози це прогнози завчасність яких кількісно оцінити неможливо. До них наприклад відносяться прогнози зсувного процесу, які даються еврістично або за результатами розрахунку стійкості зсувного схилу. До цієї категорії відносяться також

передбачення очікуваного осідання споруд, отриманих за результатами відповідних розрахунків.

Строковими слід рахувати інженерно-геологічні прогнози структури і властивостей геологічного середовища на певний наперед визначений термін. Для розробки таких прогнозів використовуються методи фізичного чи математичного моделювання. Методи інженерно-геологічних аналогій дозволяють орієнтовно встановити термін прогнозу. Метод фізичного моделювання дозволяє розробляти строкові прогнози лише за умови виконання критеріїв подібності по часу.

До методів отримання строкового прогнозу можна віднести розрахунки консолідації порід, а також методи розрахунків швидкості абразії.

У категорії строкових прогнозів при потребі можна виділити короткострокові і довгострокові прогнози. Але встановити об'єктивні критерії розділення їх на коротко- і довгострокові, мабуть неможливо.

Як відзначалось раніше, безстрокові прогнози є якісними по часу. Такі прогнози отримують у випадку, якщо метод дозволяє передбачити тенденцію зміни у часі компонентів інженерно-геологічних умов чи властивостей геосистеми, але терміни досягнення певного її стану не ставляться.

Крім того, деякі вчені класифікують прогнози за напрямком прогнозу. За цією ознакою прогнози поділяються на: перспективні ретроспективні, констатуючі.

За спрямованістю прогнози поділяються на пошукові (визначення можливих станів об'єкта прогнозу) і нормативні (визначення шляхів і термінів досягнення того чи іншого стану об'єкта).

3.2. Стадії проєктування інженерних об'єктів

Проєкт – це комплект документів зі всією необхідною інформацією для проведення всіх стадій будівельно-монтажних робіт, від загально будівельних – до введення в експлуатацію.

Проєкт будь якого об'єкту включає набір широкого спектру рішень: архітектурних, соціальних, економічних, функціональних, інженерних, технічних, протипожежних, санітарно-гігієнічних, еко-

логічних, архітектурно-художніх, які забезпечують оптимальне його функціонування.

Проєктування в Україні здійснюється від загального до детального. Це здійснюється на різних територіальних рівнях:

1. На макротериторіальному рівні розробляється Генеральна схема планування території України. Це по суті розробка схеми розміщення продуктивних сил і галузей виробництва. Розрахунковий термін проєктування 20–25 років. Масштаб 1 : 2 500 000–1 : 500 000. Тут також враховується Техніко-економічне обґрунтування доцільності будівництва.
2. На мезотериторіальному рівні розробляються проєкти районного планування. Які передбачають оптимізацію розміщення промислових інфраструктурних, сільськогосподарських та рекреаційних об'єктів на території адміністративних областей. Проєкти розробляються на 20–25 років у масштабі 1 : 300 000, 1 : 100 000.
3. На мікротериторіальному рівні розробляються генеральні плани міст, на перспективу 20–25 років у масштабах 1 :50 000–1 : 2000. У межах цього рівня розробляються також проєкти детального планування, проєкти забудови та робочі проєкти окремих будівель і споруд. Термін випередження від 2 до 5 років. На цих стадіях вирішуються планувальні інженерні, санітарно-гігієнічні, екологічні питання, проєктування конкретних типів фундаментів, комплекс захисних заходів на ділянках розвитку небезпечних геологічних процесів тощо.

3.3. Завдання і види прогнозів на різних стадіях проєктування та етапах інженерно-геологічних досліджень

Будь-яка стадія проєктування та відповідно до неї стадія інженерно-геологічних розвідувань виконується з метою отримання інформації про властивості геологічного середовища такого об'єму і такої якості, яка відповідає меті оптимізації: планування, проєктування, будівництва та управління ПТС.

Деталізація проєктування потребує детальніших інженерно-геологічних досліджень та прогнозування.

У міру деталізації інформації про інженерно-геологічні умови змінюються і вимоги до прогнозних оцінок. На макро- і мезотери-

торіальних рівнях розробляються здебільшого якісні прогнози, на мікротериторіальному – кількісні. Характеристика прогнозів, які розробляються на різних стадіях проєктування наведена в таблиці 2.

Таблиця 2

Основні ознаки прогнозів на різних стадіях проєктування

Стадії проєктування	Основні ознаки прогнозів				
	Характер оцінок	**Методи прогнозування**	**Відношення до часу**	**Відношення до простору**	**Охоплення компонентів**
Стадія ТЕО, ТЕР	Переважно якісний	Індикаторів, аналогій	Переважно безвідносні до часу, безстрокові	Регіона-льні	Загальні
Районне планування	Якісний і кількісний	Індикаторів, математичний	Безвідносні до часу	-**-	Загальний і окремий
Робочий проєкт	Кількісний	Фізичне і математич-не моделювання	Безвідносний до часу, строковий	-**-	Окремий
Будівництво	-**-	Математичне моделювання	Безстроковий, строковий	-**-	-**-
Експлуатація споруди	-**-	-**-	-**-	-**-	-**-

До числа найважливіших властивостей геологічного середовища відносяться фізико-механічні властивості грунтів. Вони, завдяки цьому, практично на всіх етапах робіт входять до числа прогнозованих властивостей геологічного середовища. При цьому вимоги до прогнозних оцінок великою мірою визначаються класом відповідальності споруд та методами їхнього розрахунку. Наприклад, при розрахунку споруд за несучою здатністю використовують показники механічних властивостей, отриманих при довірчому рівні 0,95. При розрахунках за деформаціями – за рівнем – 0,85. При проєктуванні мостів – за рівнем – 0,98.

Тема 4
ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНА ТА ГІДРОГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАЦІЯ ТА ЇЇ ВЛАСТИВОСТІ

4.1. Основні поняття та структура гідрогеологічної та інженерно-геологічної інформації

Планування проєктування, будівництво і експлуатація споруд, та управління їхнім функціонуванням потребує різнобічної інформації. ЇЇ можна розділити на дві групи. До першої входить інформація соціально-економічного плану (характеристика населення, види господарської діяльності тощо). Цю інформацію умовно можна назвати плановою. До другої групи належить інформація про природні умови і ресурси (кліматичні, гідрологічні, рельєф інженерно-геологічні умови та небезпечні геологічні процеси). При проєктуванні на попередніх стадіях провідну роль відіграє планова інформація. В міру деталізації процесу проєктування на поведінку ПТС усе більше впливає природна, зокрема інженерно-геологічна інформація. Вона визначає компоновку (просторове положення) споруд на майданчику, їхній тип, особливості конструкцій і загальну структуру ПТС.

Інженерно-геологічна інформація – це відомості про структуру і властивості геологічного середовища і процеси його розвитку, яка відбирається і використовується для оцінки сучасного стану і прогнозу взаємодії з природними складовими довкілля (атмосферою, поверхневою гідросферою, біотою) та техносферою. Тобто інженерно-геологічну інформацію слід розглядати як дані про геологічне середовище і закономірностях його змін під впливом природних і техногенних чинників, які використовують для забезпечення оптимального функціонування природно-господарських систем різного рівня організації.

Інженерно-геологічна інформація як система даних про компоненти геологічного середовища характеризується структурою.

За часом отримання інженерно-геологічна інформація поділяється на накопичену (ретроспективну) та оперативну інформацію. Накопичена інформація – це інформація, отримана в результаі проведених раніше геологічних робіт, яка міститься в літературі, архівах, інформаційно-пошукових системах державних природничих

картах тощо. Оперативну інформацію отримують в процесі проведених інженерно-геологічних робіт (розвідувань) чи наукових досліджень. Інженерно-геологічна інформація достатньо дорога (до 1–2 % від вартості ПТС). Але лише зараз була усвідомлена необхідність всебічного багаторазового використання накопиченої інформації. Для цього крім традиційних фондів (архівів) створюються банки інженерно-геологічної інформації, ІПС на електронних носіях.

Накопичена та оперативна інформація поділяється на кількісну і якісну. Це не означає, що кількісна інформація принципово відрізняється від якісної. Крім того, для вирішення інженерних у тому числі прогнозних завдань часто потрібна власне якісна інформація (наприклад, дані про генезу порід чи їхній вік). Співвідношення між якісною і кількісною інформацією змінюються в міру деталізації інженерно-геологічних робіт. На початкових етапах розвідувань переважає головно нечисельна інформація, а на наступних етапах, на ділянці розміщення споруди та в процесі її будівництва, великого значення набуває числова інформація.

За відношенням до часу інженерно-геологічну інформацію поділяють на *сингулярну і режимну*. Сингулярна інженерно-геологічна інформація містить дані про структуру і властивості геологічного середовища, прояви екзогенних геологічних процесів на момент проведення інженерно-геологічних робіт. Сингулярну інформацію отримують у процесі інженерно-геологічної зйомки, розвідки та інших разових (сингулярних) робіт.

Інформація режимного характеру містить дані про стан геологічного середовища та його компонентів у різні моменти часу. Таким чином, інформація режимного характеру (моніторингова) містить дані про зміни структури і властивостей геологічного середовища та небезпечні геологічні процеси. Таку інформацію можна отримати лише під час спостережень (моніторингу) за режимом змін геологічного середовища (наприклад, спостереження за режимом абразії берегів водоймища, за рівнем підземних вод, за режимом осідання споруди тощо).

За формою подачі інженерно-геологічна інформація поділяється на такі групи:

1. *описову* (текстова частина звітів, висновків);
2. *графічну* (карти, розрізи, графіки, номограми, діаграми тощо);

3. *цифрову* (показники властивостей геологічного середовища глибини залягання підземних вод, розрахунки гідрогеологічних параметрів тощо);
4. *аналітичну* (аналітичні вирази взаємозв'язків фізичних і механічних властивостей грунтів тощо).

4.2. Властивості інженерно-геологічної інформації

Проблема оцінки властивостей інженерно-геологічної інформації, потрібної для вирішення конкретних прикладних проблем вирішена не повністю. Її повною мірою можна віднести до числа критичних проблем інженерної геології. З цією проблемою тісно пов'язані питання, види та об'єми інженерно-геологічних досліджень, зокрема таких як об'єми інженерно-геологічної інформації необхідної для прийняття оптимальних проєктних рішень та отримання надійних прогнозних оцінок. Головна складність цієї проблеми полягає у тому, що об'єм і якість інженерно-геологічної інформації, необхідної для вирішення тієї чи іншої інженерної задачі, визначається не лише властивостями геологічного середовища, але й цільовим призначенням інженерно-геологічних робіт. Компоненти інженерно-геологічних умов конкретної території є здебільшого унікальними, тому апріорі точно визначити набір методів і встановити обсяги інженерно-геологічних робіт, які дозволяють вивчити ці умови, доволі важко.

Інженерно-геологічну інформацію характеризують такі її **властивості** як замкнутість, повнота, кількість (об'єм), точність і довірча вірогідність. Інженерно-геологічна інформація завжди описує структуру і властивості деякої області геологічного середовища, а також якщо вона належить до динамічних систем – то і їхні зміни протягом деякого часу.

Замкнутість (незамкнутість) інженерно-геологічної інформації визначає відношення просторово-часових меж досліджуваної частини геологічного середовища (геологічний простір) та інженерно-геологічної інформації (простір ознак). Тобто інформація має отримуватися у межах геологічного простору, обмеженого сферою взаємодії техногенного об'єкта. Тобто, якщо межі інженерно-геологічної системи і межі літосистеми співпадають, то інженерно-геологічну інформацію вважають замкнутою.

Наступною властивістю інженерно-геологічної інформації є її повнота за списком властивостей.

Під ***повнотою інженерно-геологічної інформації*** слід розуміти ступінь повноти даних про властивості геологічного середовища – компоненти інженерно-геологічних умов та небезпечних геологічних процесів, необхідних і достатніх для вирішення інженерної задачі при плануванні, проєктуванні, будівництві чи експлуатації ПТС. Інформацію можна вважати *повною за списком властивостей геологічного середовища,* якщо вона вміщує набір даних про властивості геологічного середовища і про його рух, необхідний і достатній для вирішення інженерної задачі. Інформація є *неповною за* списком властивостей геологічного середовища, якщо перелік даних про його властивості – компоненти інженерно-геологічних умов і даних про рух геологічного середовища менше необхідного і достатнього для вирішення інженерної задачі. Інформація буде *надлишковою за списом властивостей геологічного середовища,* якщо набір даних про властивості середовища і даних про його рух перевищує комплекс, необхідний для вирішення інженерної задачі.

Зрозуміло, що одна і та ж інформація може бути повною або неповною за списком властивостей залежно від мети її використання. Наприклад, інженерно-геологічну інформацію, яка не вміщує дані про геоморфологічну будову досліджуваної території слід визнати неповною за списком властивостей, якщо вона призначена для проєктування лінійної наземної споруди (дороги, трубопроводу, лінії електропередач). Та ж інформація може виявитися повною за списком властивостей, якщо її використовують для обґрунтування проєкту будь-якої підземної споруди.

Надзвичайно важливою характеристикою інженерно-геологічної інформації є її ***кількість***. Визначення кількості інформації в теорії інформації дотепер повністю не вирішена.

Для оцінки кількості інформації використовують показник ентропії. Слід зауважити, що шенонівська ентропія – це міра невизначеності наших знань про геологічне середовище. Вона залежить від розподілу ймовірностей деякої випадкової величини, а не від неї самої. Інженерів-геологів з точки зору практичного застосування більше влаштовувала б не формальна міра кількості інформації, яка дорівнює ентропії, а така її кількісна оцінка, яка враховувала б якісну структуру інформації, її цінність.

У практиці інженерно-геологічних досліджень використовують й інші шляхи визначення кількості інформації. Наприклад, згідно вимог Державних будівельних норм використовується нормативний метод визначення кількості визначень показників властивостей, згідно з якими для окремого інженерно-геологічного елементу їх має бути не менше 10.

Загалом їхня кількість залежить від показника мінливості властивостей та класу відповідальності проєктованої споруди.

З кількістю інформації безпосередньо пов'язані такі її властивості як ***ймовірність*** і ***точність***. Проблема точності та довірчої ймовірності інженерно-геологічної інформації знаходиться на початковій стадії розробки. Серед показників інженерно-геологічних умов можна виділити лише показники властивостей грунтів, для яких аспект точності та ймовірності певною мірою вирішений і знайшов відображення в нормативах. Точність лабораторного визначення того чи іншого параметра визначається точністю, яку забезпечує той чи інший лабораторний прилад.

Інженерно-геологічна інформація, яка подається проєктувальникам для здійснення остаточних розрахунків задовольняє ймовірність 0,95 при розрахунках основ фундаментів за несучою здатністю і 0,85 – при розрахунках основ фундаментів за деформаціями та 0,99 – споруд I класу капітальності та унікальних.

Говорячи про кількість інформації слід розглянути й таке поняття як її оптимум. Оптимум інформації становить основу проблеми оптимізації методики інженерно-геологічних досліджень, особливо їхніх об'ємів. Дуже поширеним є твердження про те, що при проведенні розвідувань необхідно отримувати максимум інженерно-геологічної інформації при мінімальних витратах. Насправді слід говорити про мінімально необхідну і достатню для вирішення інженерних завдань кількість інформації, тобто про її оптимум.

Оптимум інженерно-геологічної інформації – мінімально необхідний і достатній для вирішення інженерного завдання об'єм інформації заданої якості, який задовільняє вимоги замкнутості, повноти, точності та ймовірності.

Питання об'ємів інформації, який відповідає критерію оптимуму, є одним з найскладніших і вирішується у кожному конкретному випадку інженером-геологом, проєктувальником та замовником проєкту, який фінансує виконання інженерно-геологічних дос-

ліджень. Важливу роль при цьому відіграє не лише складність і мінливість геологічного середовища але й складність та відповідальність проєктованої споруди.

Тема 5
МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ

5.1. Основні поняття і визначення, умови, чинники і закономірності виникнення і поширення землетрусів

Землетрус – це високочастотне в геологічному відношенні коливання земної кори, внаслідок якого виникають сейсми (грецьк. "сейсмос" – струс).

Щорічно на земній кулі відбувається більше мільйона землетрусів різної сили, в тому числі 100 тис. відчутних, 100 руйнівних та один катастрофічний. На сьогодні більше половини людства мешкає у зонах, де відбуваються землетруси, і якщо до 1976 р. при землетрусах на земній кулі з початку нашого століття щорічно гинуло 10 тис. чол., то за наступні 10 років землетруси внесли у цю моторошну середню статистику суттєві корективи, більш ніж подвоївши кількість жертв. За оцінкою сейсмологів за останні 4 тис. років від землетрусів загинуло понад 13 млн. чол., у тому числі – з часу ашхабадського землетрусу 1948 р. до наших днів у різних країнах світу від підземної стихії загинуло більше мільйона осіб.

Науково обґрунтований прогноз землетрусів є важкодосяжною, але надзвичайно важливою метою, спрямованою, насамперед, на збереження людського життя. У зв’язку з безперервним розвитком урбанізації, збільшенням густоти населення в сейсмоактивних регіонах, будівництвом атомних електростанцій, висотних гребель, вибухо-пожежо-хімічних та інших потенційно небезпечних виробництв питання розробки методів надійного середньострокового і короткострокового прогнозу руйнівних землетрусів, відвернення жертв і зниження економічних збитків від сейсмічних катастроф висуваються в число найважливіших соціально-економічних і науково-технічних проблем. Розробкою цих проблем займаються фахівці багатьох країн, авторитетні міжнародні організації приділяють питанням сейсмобезпеки істотну увагу.

Землетруси за ґенезою поділяються на вулканічні, обвальні, техногенні і тектонічні.

Вулканічні землетруси пов'язані з виверженням вулканів і приурочені до вулканічних поясів. Понад двох третин діючих та згаслих вулканів зосереджені в острівних дугах навколо Тихого океану або на континентальній стороні межі між плитами. Решта вулканів пов'язана з хребтами. Вулканічні землетруси слабосилі і мають локальний характер.

Обвальні землетруси обумовлені обвалами гірських порід, які залягають над порожнинами, що утворились у земній корі. Частіше вони зустрічаються в породах, які розчиняються підземними водами (кам'яна сіль, гіпс, вапняк та ін.). Вони утворюються також при розробці корисних копалин. Незважаючи на те, що порожнини часто досягають великих розмірів, обвальні землетруси, як і вулканічні, відносять до числа слабких. Класичним прикладом обвального землетрусу в Україні є стебницький, який відбувся 30 вересня 2017 року в 0 годин 46 хвилин внаслідок падіння грунту масою 1 млн тон з висоти 100 м у вироблений простір соляної шахти, що генерувало землетрус інтенсивністю орієнтовно 4 бали за шкалою МСК-64.

Техногенні землетруси можуть бути викликані створенням великих водосховищ, під якими тиск води спричинює коливання. Існує поняття наведеної сейсмічності, пов'язане з техногенним впливом людини на навколишнє середовище. Вона може викликатися з заповненням великих водосховищ (Кремасті у Греції в 1965–1966 рр., Койна в Індії у1962–1967 рр., Мід на річці Колорадо у США в 1935 р., Каріба на р. Замбезі в Африці у 1958 р. та ін.); напомповуванням води до свердловин при видобутку нафти і газу, похованні відходів, вилуговуванні солі та ін. Причиною наведеної сейсмічної активності можуть бути підземні ядерні вибухи, особливо в сейсмоактивних зонах.

Найбільшою руйнівною силою відзначаються ***тектонічні землетруси***. Доведено, що вони виникають у результаті деформації міцної літосфери, коли під впливом прикладених до неї напружень межа міцності виявляється перевищеною і, як показали дослідження, землетруси цього типу приурочені до тектонічно активних поясів і зон. Вони мають тектонічну ґенезу і пов'язані з коливальним рухами земної кори і зміщеннями материкових плит. Ці рухи приз-

водять до накопичення напружень у товщах гірських порід літосфери протягом тривалого часу. Коли такі напруження досягають межі міцності гірських порід, відбувається розрив літосфери або її частини (земної кори) і утворюються розломи, її блоки зміщуються, при цьому вивільняється пружна енергія, яка зумовлює різкі раптові коливальні рухи земної кори – її струшування.

Земна кора складена блоками різного розміру і має властивість фрактальності. Блоки характеризуються різною міцністю, різним рівнем і орієнтацією тектонічних напружень. У тих районах Землі, де швидкість накопичення напружень внаслідок відносного руху літосферних плит і ендогенних процесів переважає над швидкістю їхньої релаксації, одночасно існує ряд ділянок земної кори, що знаходяться в стані, близькому до межі довготривалої міцності. Відбитком цього стану є підвищена сейсмічність. Установлено, що найвищі напруги концентруються в місцях перетину або злому геологічних розломів, що розділяють блоки, і до цих же місць приурочені вогнища найсильніших землетрусів. Система розломів також має фрактальну будову. Внаслідок цього в конкретному сейсмоактивному районі одночасно існує значна кількість вогнищ майбутніх землетрусів різної величини, що знаходяться на різній стадії свого розвитку.

Області розриву на глибині Землі, що є безпосереднім джерелом коливальних рухів, називають вогнищем землетрусу або ***гіпоцентром***. Проєкція вогнища землетрусу на земну поверхню називається ***епіцентром***. В міру віддалення від епіцентру на всі боки, коливальні рухи (струшування) і сила поштовхів поступово зменшуються. Лінії у плані, які з’єднують пункти з однаковою силою землетрусів називають ізосейстами. Площа на поверхні Землі, у межах якої землетрус досяг сили, яка загрожує життю і діяльності людини обмежується ізосейстою у 6 балів.

Сильні землетруси можуть спровокувати перерозподіл пружних напружень у вогнищі землетрусу та прилеглих до нього товщ гірських порід літосфери, і може викликати виникнення повторних підземних поштовхів – афтершоків.

Аналіз досліджень показав, що сучасні землетруси головно пов’язані з геологічними структурами, які зазнають сучасних тектонічних рухів. Такі структури приурочені до регіональних тектоніч-

них зон розломів – активних рухомих поясів Землі, які розділяють великі геоблоки Землі – континенти та океани.

На планеті існує два великих сейсмічних пояси: Середземноморсько-Трансазіатський і Тихоокеанський.

Середземноморсько-Трансазіатський пояс бере свій початок біля берегів Перської затоки і закінчується в середині Атлантичного океану. Цей пояс ще називають широтним, так як він тягнеться паралельно до екватора.

Тихоокеанський пояс – меридіональний, він простягається перпендикулярно Середземноморсько-Трансазіатському поясу. Саме на лінії цього поясу розташована величезна кількість діючих вулканів, велика частина вивержень яких відбувається під товщею води самого Тихого океану.

Якщо малювати сейсмічні пояси Землі на контурній карті – вийде цікавий і загадковий малюнок. Пояси, немов облямовують стародавні платформи Землі, а іноді і проникають в них. Вони пов'язані з гігантськими розломами земної кори і древніми, і більш молодими.

Широтний сейсмічний пояс Землі проходить через Середземне море і всі прилеглі до нього гірські європейські масиви, розташовані на півдні континенту. Він тягнеться через гори Малої Азії і Північної Африки, досягає гірських хребтів Кавказу і Ірану, пролягає через всю Середню Азію і Гіндукуш прямо до Коень-Луню і Гімалаїв.

У цьому поясі, найбільш активними сейсмічними зонами вважають гори Карпати, розташовані на території Румунії, весь Іран і Белуджистан. Від Белуджистану зона землетрусів тягнеться до Бірми. У цьому поясі є активні сейсмічні зони, які розташовані не тільки на суші, але і у водах двох океанів: Атлантичного і Індійського. Частково цей пояс захоплює і Північний Льодовитий океан. Сейсмічна зона всієї Атлантики проходить через Гренландське море і Іспанію.

Найбільш активна сейсмічна зона широтного поясу припадає на дно Індійського океану, проходить через Аравійський півострів і тягнеться до самого півдня і південного заходу Антарктиди.

Але, яким би не був небезпечний широтний сейсмічний пояс, все ж велика частина всіх землетрусів (близько 80%), які відбуваються на нашій планеті, припадає на Тихоокеанський пояс сейсміч-

ної активності. Цей пояс проходить по дну Тихого океану, за всіма гірськими ланцюгами, оперізуючи цей найбільший океан Землі, захоплює острови, розташовані в ньому, включаючи Індонезію. Найбільша частина цього поясу – Східна. Вона бере початок на Камчатці, тягнеться через Алеутські острови і західні прибережні зони Північної і Південної Америки прямо до Південно-Антильскої петлі.

Східна гілка непередбачувана і мало вивчена. Вона сповнена різких і звивистих поворотів. Північна частина поясу найбільш сейсмічно активна, що постійно відчувають на собі мешканці Каліфорнії, а також Центральної та Південної Америки. Західна частина меридіонального поясу бере свій початок на Камчатці, тягнеться до Японії і далі.

Під час землетрусів, хвилі від коливань земної кори можуть досягати віддалених районів, які прийнято вважати безпечними щодо сейсмічної активності. У деяких місцях відгомони землетрусів не відчуваються зовсім, а в деяких сягають кількох балів за шкалою Ріхтера.

В основному ці зони, чутливі до коливань земної кори, знаходяться під товщею вод Світового океану. Другорядні сейсмічні пояси планети розташовані у водах Атлантики, Тихого океану, Індійського океану і в Арктиці. Велика частина другорядних поясів припадає на східну частину планети, так, ці пояси тягнутися від Філіпін, поступово спускаючись до Антарктиди. Відлуння поштовхів ще можна відчути в Тихому океані, а ось в Атлантиці майже завжди сейсмічно спокійна зона.

Найбільший вплив на територію України створює сейсмофокальна зона Вранча. Зона Вранча – це сейсмоактивна зона, розміщена на ділянці зчленування Південних (Румунія) і Східних (українських) Карпат. Максимальна магнітуда землетрусів у цій сейсмоактиній зоні досягає 8. Осередки землетрусів розміщені в консолідованій земній корі, а також в мантії на глибинах від 80 до 190 км. Завдяки великим глибинам і магнітудам землетруси зони Вранча проявляються на величезній території – від Греції на півдні до Фінляндії на півночі.

При кожному землетрусі вивільняється пружна енергія, яка поширюється у формі пружних хвиль від вогнища землетрусу на всі боки до поверхні Землі.

Так як енергію, яка випромінюється вогнищем землетрусу визначити важко, у світовій практиці її оцінюють умовною енергетичною характеристикою, яку називають магнітудою М.

$$M=\log\frac{A}{A*},$$

де А – максимальна амплітуда зміщення частинок породи, яка визначається за сейсмограмою при даному землетрусі, мкм;
А* – амплітуда зміщення частинок породи при деякому, дуже слабкому землетрусі, вибраному у якості еталонного, або стандартного, мкм.

Магнітуда змінюється від нуля при слабких землетрусах до 8,8 при дуже сильних – катастрофічних.

Інтенсивність землетрусів на поверхні Землі оцінюється в балах. В Україні використовується шкала сейсмічної інтенсивності MSK-64. Сила землетрусу за цією шкалою оцінюється за величиною сейсмічного прискорення, яке являє собою зміщення поверхні землі в одиницю часу і яке визначається спеціальними приладами акселерометрами. Воно характеризує прискорення, якого набувають частинки породи на поверхні землі під впливом сейсмічних хвиль. Основними ознаками сили землетрусу є ступінь ушкодження будівель і споруд та залишкові явища у гірських породах. Ця шкала включає 12 балів. Наприклад, невідчутній землетрус оцінюється I балом, ледве відчутний – 2 балами, ушкодження будівель – 7 балів, загальне руйнування будівель – 10 балів.

За кордоном розповсюджена так звана шкала Ріхтера, де сила землетрусу визначається за його енергією в ергах, яка обчислюється за амплітудою сейсмічних хвиль і називається магнітудою. Магнітуду визначають у залежності від величини амплітуди коливань грунту та відстані до епіцентру. Наприклад, при амплітуді 2 см і відстані 100 км – М = 7. Максимальне значення – 9 балів.

Знаючи один із основних параметрів землетрусу – інтенсивність (бальність) або магнітуду, можна визначити інший, оскільки існує наближена формула, яка зв'язує інтенсивність (I) з магнітудою землетрусу

$$I = 1,7\ M - 2,2.$$

5.2. Методи прогнозування землетрусів на попередніх стадіях проєктування

Прогнозування землетрусів є складною і до кінця не розв'язаною проблемою.

Її вирішення потребує різноманітної за характером і точністю інформації: про геологічну будову, особливо тектоніку (наявність глибинних розломів, характер та інтенсивність неотектонічних та сучасних тектонічних рухів, історію геологічного розвитку території, її рельєф, фізико-механічні та сейсмічні властивості порід, дані про землетруси, які відбувалися у минулому, їхні макросейсмічні наслідки, періодичність, результати сейсмологічних спостережень на сейсмічних станціях, зміни магнітного та гравітаційного полів Землі, дані математичного та фізичного моделювання сейсмічних процесі тощо.

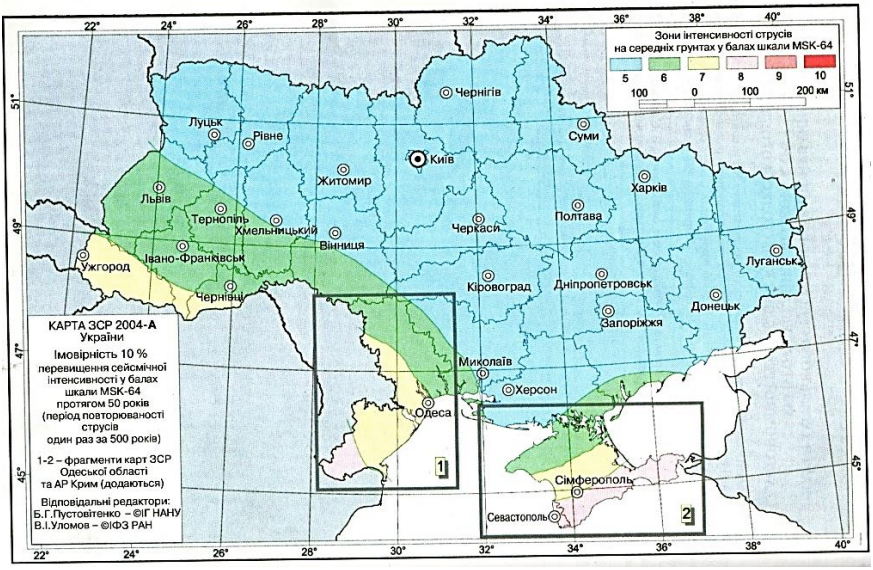


Рис. 1. Карта загального сейсмічного районування території України 10% ймовірності

Прогнозні оцінки сейсмічності для великих регіонів здійснюються за методом аналогій і здебільшого є якісними. Адже спрогнозувати де, коли і з якою інтенсивністю може відбутися землетрус

практично неможливо. Власне у зв'язку з цим вони завдають величезної економічної та екологічної шкоди.

Найпоширенішою практикою регіонального прогнозування землетрусів є розробка картографічних моделей сейсмічної небезпеки, так звані карти загального сейсмічного районування (ЗСР) територій. Карти загального сейсмічного районування (див. рис. 1) розробляються з використанням системного підходу на основі глибокого і всебічного аналізу наведених вище показників.

Зазначена на картах інтенсивність відноситься до ділянок, складених середніми за сейсмічними властивостями грунтами.

Карту ЗСР- 2004 А застосовують при проєктуванні будівель і споруд класу наслідків СС-1,2 (висотою до 73,5 м). Карту ЗСР- 2004 -Б застосовують при проєктуванні будівель і споруд класу наслідків СС-2 (висотою до 73,5 -100 м.) Карту ЗСР- 2004 -С застосовують при проєктуванні особливо відповідальних будівель і споруд класу наслідків СС-3. Але здійснювати проєктування будь яких споруд за даними лише карт сейсмічного районування не можливо.

5.3. Методи прогнозування землетрусів на заключних стадіях проєктування

Розробка робочих проєктів споруд потребує прогнозних оцінок сейсмічної інтенсивності, які враховують не лише загальні показники, але й чинники, що відображають конкретні інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови.

Численними дослідженнями доказано, що сейсмічність окремих ділянок і навіть майданчиків може суттєво відрізнятися від тих, що зображені на картах ЗСР.

Важливу роль при цьому відіграє літологічний склад порід, це скельні породи, піски чи глинисті грунти. Якщо це глинисті грунти то велике значення має їхня консистенція.

Особливе значення мають біогенні грунти (торфи, за торфовані грунти, мули), а також техногенні грунти. Важливе місце має глибина залягання підземних вод. Сейсмічна стійкість окремих територій не є усталеною. Вона великою мірою залежить від властивостей і стану грунтових масивів, особливостей, характеру та інтенсивності антропогенного впливу на них і може змінюватися у часі.

Таблиця 3

Нормативна сейсмічність майданчика будівництва в залежності від категорії грунтів за сейсмічними властивостями (ДБН В.1.1.-12:2014)

Категорія ґрунту за сейсмічними властивостями	Ґрунти	Нормативна сейсмічність майданчика будівництва за сейсмічності району, балів				Швидкості поширення сейсмічних хвиль в грунті, V_s, м/с
		6	7	8	9	
I	Скельні ґрунти усіх видів невивітрілі та слабовивітрілі; великоуламкові ґрунти щільні, маловологі з магматичних порід, які вміщують до 30 % піщано-глинистого заповнювача	5	6	7	8	$V_s > 800$
II	Скельні ґрунти вивітрілі і сильновивітрілі; великоуламкові ґрунти, за винятком віднесених до I категорії; піски гравіюваті, крупні та середньої крупності, щільні та середньої щільності, маловологі та вологі; піски дрібні і пилуваті, щільні і середньої щільності маловологі; пилувато-глинисті ґрунти із показником текучості $I_L \leq 0,5$ при коефіцієнті пористості $e < 0,9$ – для глин і суглинків, та $e < 0,7$ – для супісків	6	7	8	9	$500 < V_s < 800$
III	Піски пухкі незалежно від ступеня вологості та крупності; піски гравіюваті, крупні та середньої крупності, щільні та середньої щільності; піски дрібні та пилуваті, щільні та середньої щільності, вологі та водонасичені; пилувато-глинисті ґрунти із показником текучості $I_L > 0,5$; пилувато-глинисті ґрунти із показником текучості $I_L \leq 0,5$ при коефіцієнті пористості $e \geq 0,9$ – для глин і суглинків та $e \geq 0,7$ – для супісків	7	8	9	10	$200 < V_s < 500$
IV	Піски пухкі водонасичені, схильні до розрідження; насипні та гумусні ґрунти; пливуни, біогенні ґрунти та мули	За результатами спеціальних досліджень				$V_s < 200$

Примітка 1. У випадку неоднорідного складу ґрунти майданчика будівництва відносяться до найбільш несприятливої категорії ґрунту за сейсмічними властивостями, якщо у межах десятиметрового шару ґрунту, починаючи відлік від планувальної відмітки у випадку виймання і чорної відмітки у випадку насипання, сумарна потужність шарів, що відносяться до цієї категорії, перевищує 5 м.

Примітка 2. У разі прогнозування підйому рівня ґрунтових вод та (або) обводнення ґрунтів у процесі експлуатації будівлі, категорії ґрунту слід визначати в залежності від властивостей ґрунту (ступеня вологості, показника текучості) у замоченому стані (за винятком локального аварійного замочування, вплив якого при уточненні сейсмічності майданчика не враховується).

Примітка 3. Пилувато-глинисті ґрунти (зокрема просідаючі твердої консистенції або в твердому стані) при коефіцієнті пористості поблизу значень $e = 0,9$ – для глин і суглинків та $e = 0,7$ – для супісків можуть бути віднесені до II категорії за сейсмічними властивостями, якщо нормативне значення їх модуля деформації $E \geq 15$ МПа, а при експлуатації споруд будуть забезпечені умови непідтоплення ґрунтів основи. За відсутності даних щодо консистенції або вологості глинисті та пісчані ґрунти при положенні рівня ґрунтових вод вище 5 м відносяться до III категорії.

Примітка 4. Переважаючий період власних коливань ґрунтової товщі визначається за результатом мікросейсморайонування. У разі відсутності даних сейсмічного мікрорайонування допускається визначати період власних коливань ґрунтової товщі за додатком В.

Примітка 5. Сейсмічність майданчика визначається в цілих балах. Для ґрунтових умов, за яких можливе визначення категорії ґрунту за сейсмічними властивостями як проміжне, визначення бальності за інтерполяцією не допускається, а остаточне рішення приймається вишукувальною організацією за результатами додаткових досліджень і/або комплексним аналізом.

Примітка 6. Насипні ущільнені ґрунти при їх відсипанні і масиви укріплених ґрунтів залежно від їх зернового складу, показників e, I_L, S_r і величини модуля деформацій можуть бути віднесені вишукувальною організацією до II або III категорії за відповідними вимогами, які сформовані в описовій частині таблиці.

Наприклад, деякі типи грунтів, що характеризуються сенсорними властивостями (леси), можуть істотно змінюватися під впливом техногенних чинників і, таким чином, впливати на сейсмічну стійкість складених ними ділянок у часі. На ділянках, складених сейсмічно нестійкими грунтами (торфи, техногенні грунти) сейсмічна інтенсивність (За картами ЗСР) можуть бути вищими від наведених на картах ЗСР на 1–2 і навіть 3–4 бали. Категорії сейсмічних властивостей грунтів наведено у таблиці 1.

Як видно з таблиці грунти III категорії за сейсмічними властивостями підвищують фонову (за картами ЗСР) сейсмічність на I бал. Якщо ділянка складена грунтами II категорії то її фактична сейсмічність відповідає наведеній на карті ЗСР.

У звітах про інженерно-геологічні розвідування на конкретному майданчику обов'язково подається інформація про категорію грунтів за сейсмічними властивостями тобто прогнозну сейсмічність.

Тема 6
МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗСУВІВ

6.1. Основні поняття та визначення, характеристика, причини виникнення зсувів, умови і чинники їхнього розвитку

Зсув (осув) – це зміщення грунту вниз по схилу під впливом сил гравітації.

Утворення зсувів це результат зсувного геологічного процесу, який проявляється у зміщенні мас гірських порід внаслідок порушення їхньої стійкості. Зсуви дуже різноманітні за розміром, характером та інтенсивністю зміщення, причинами порушення рівноваги динаміки розвитку тощо.

Зсуви належать до категорії небезпечних екзогенних геологічних процесів, які завдають величезних економічних та екологічних збитків.

Кожен зсув утворює зсувну ділянку межі і форма якої в плані визначається розміром зсуву і його типом. Основними складовими елементами зсуву є: зсувний цирк, який обмежує зсув зверху, зсувний уступ, вершина зсуву, тіло зсуву, підошва зсуву, поверхня ковзання, борти зсуву, які обмежують зсувне тіло в плані.

За розміром (об'ємом зсувних мас) зсуви поділяються на малі (100–200 $м^3$, середні (200–1000 $м^3$), великі (1000–100 000–200 000 $м^3$), грандіозні (200 000–1000 000 і більше $м^3$).

За глибиною захоплення порід зсувними деформаціями виділяють зсуви: поверхневі (> 1,0 м), мілкі (>5,0 м), глибокі (<20,0 м), дуже глибокі (>20,0 м).

Класифікація зсувів. Зсуви дуже різноманітні за розмірами, будовою, умовами і причинами виникнення, механізмом, динамікою процесу тому єдиної класифікації немає. Найбільшим поширенням користується класифікація зсувів за їхньою будовою (структурою) Саваренського Ф.П. Згідно цієї класифікації зсуви поділяються на асеквентні, консеквентні та інсеквентні. Асеквентні зсуви розвиваються в однорідних за літологічним складом породах. Їхнє зміщення відбувається головно за кругло-циліндричною поверхнею ковзання. Консеквентні зсуви характеризуються наявністю добре вираженої поверхні ковзання, яка, як правило, формується на контакті різних за літологічним складом порід і має рівну поверхню. Інсеквентні – зустрічаються в неоднорідних грунтових масивах, а поверхня ковзання має складну, нерівну поверхню (рис. 2).

Зміщення гірських порід на схилах чи укосах відбувається під впливом сил тяжіння та інших сил і можливе лише тоді, коли зсувна (сколююча) складова сили тяжіння перевищує міцність порід загалом, або по існуючих чи потенційних поверхнях чи зонах послаблення, коли буде порушення стійкості –межова рівновага мас гірських порід, тобто коли:

$$\sum T = f \sum N + CL$$

$\sum T$ – складова сили тяжіння, спрямована на зміщення гірських порід вниз по схилу чи укосу;

$\sum N$ – сумарна складова сили тяжіння P, спрямована перпендикулярно до існуючої чи потенційної поверхні ковзання, яка спрямована на утримання маси гірських порід у рівновазі;

f – коефіцієнт внутрішнього тертя порід по поверхні чи зоні послаблення.

Якщо така рівновага буде порушена, обов'язково буде відбуватися зміщення порід вниз по схилу.

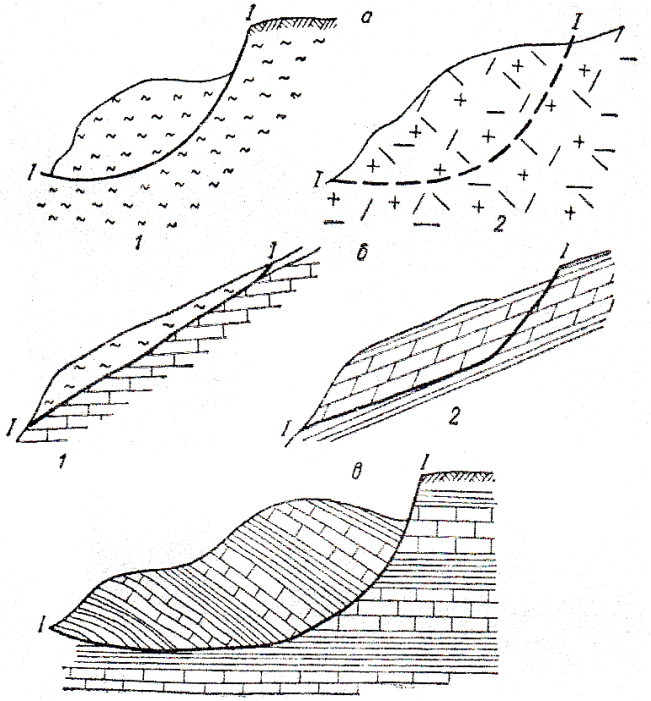


Рис. 2. Схеми типів будови зсувів. а – асеквентний: 1 – в пухких породах, 2 – в скельних породах; б – консеквентний: 1 – в делювії корінних порід, 2 – в моноклінально нахилених шаруватих скельних породах; в – інсеквентний

До причин, які викликають розвиток зсувів відносять:

- збільшення висоти схилу чи відкосу при їхній підрізці, підробці чи підмиві, а також при наданні їм більшої крутизни;
- послаблення міцності порі внаслідок зміни їхнього фізичного стану при зволоженні, набряканні, розущільненні, звітрюванні, порушенні природного стану, а також з розвитком у масиві порід процесів повзучості;
- внаслідок дії гідростатичних і гідродинамічних сил на породи, які викликають розвиток фільтраційних деформацій (суфозію, випір, пливунний стан тощо);
- зміна напруженого стану гірських порід в зоні формування схилу чи укосу;

- зовнішні впливи – навантаження на схил чи укос, а також ділянки, які при лягають до його брівки, сейсмічні коливання тощо.

Зсуви виникають під впливом як окремих чинників, наведених вище, так і при їхньому комплексному впливі.

Під умовами, які сприяють утворенню зсувів, слід розуміти усю сукупність природних і штучних умов, які полегшують дію сил, що порушують рівновагу гірських порід на схилах і укосах. Наприклад, поверхні і зони нахилені до підніжжя схилу, полегшують дію зтинаючих зусиль і навпаки, нахилені в глибину схилу не сприяють такій дії. Ділянки з розчленованим (особливо гірським) рельєфом сприятливіші для розвитку зсувів ніж рівнинні.

Умови розвитку зсувних процесів можна розділити на дві великі групи: лімітуючі умови, тобто ті, за відсутності яких розвиток зсувних процесів неможливий. Супутні умови, які сприяють активізації чи сповільненню розвитку процесу. До супутніх умов відносять:

- геологічна будова схилів і відкосів;
- гідрогеологічні умови;
- склад і фізико-механічні властивості порід;
- кліматичні умови;
- гідрологічний режим водоймищ і річок;
- сучасні та неотектонічні рухи;
- розвиток супутніх екзогенних геологічних процесів;
- інженерно-господарська діяльність людини.

Розглянемо роль кожної умови дещо детальніше. Найважливішою умовою, без виконання якої розвиток зсувів неможливий є рельєф. Яскравим свідченням цього є їхнє географічне поширення.

Дослідження показують, що зсуви найбільше поширені у гірських районах на ділянках найрозчленованішого рельєфу, на високих і крутих схилах річкових долин, на берегових схилах водоймищ, на укосах виїмок насипів, виїмок і кар’єрів. Рельєф місцевості створює запаси потенційної енергії, яка зумовлює розвиток зсувів.

Загальновідомою є також приуроченість зсувів до схилів і укосів певної геологічної будови. У більшості випадків зсуви поширені там, де схили складені глинистими породами або де у товщі порід, що їх складають зустрічаються шари, прошарки, зони глинистих порід, глинисті примазки та інші відміни порід, які утворюють поверхні і зони послаблення (шари вугілля, сажі, поверхні і зони

тріщин, тектонічних порушень тощо), або там де на схилах є значні нагромадження елювіальних, делювіальних, пролювіальних глинистих утворень. Аналіз умов утворення зсувів у скельних породах показує, що в таких випадках глинистий наповнювач тріщин, примазки глинистого матеріалу на їхній поверхні значною мірою полегшує порушення рівноваги мас гірських порід. Найбільша вірогідність утворення зсувів на ділянках, де у геологічній будові схилів та укосів є потенційні поверхні ковзання, орієнтовані вниз по схилу до його підніжжя. Це може бути зволожена покрівля глин, перекритих породами іншого літологічного складу.

Схили складені добре водопроникними породами (галечниками гравієм, пісками тощо) менш сприятливі для розвитку зсувів. Схили у будові яких беруть участь масивні скельні породи також несприятливі для їхнього розвитку.

Одним з важливих чинників, що визначають можливість та активність розвитку зсувів є гідрогеологічні умови. Схили, складені обводненими гірськими породами з насиченими водою комплексами, горизонтами і зонами, з зонами постійного чи тимчасового зволоження, змочування і насичення сприятливіші для утворення зсувів у порівняні зі схилами, збудованими породами, які добре дренують воду, сухими. Тобто, при характеристиці і оцінці стійкості схилів і укосів та умов утворення зсувів підземні води слід розглядати як один із найважливіших природних чинників.

Величезний вплив на розвиток зсувних процесів мають особливості фізико-механічних властивостей гірських порід, які складають схили та укоси загалом чи окремі шари, прошарки, зони тектонічних порушень наповнювачі тріщин і примазки по їхніх площинах. Провідну роль при цьому відіграє міцність гірських порід – опір стинанню чи сколюванню, а також ті властивості які характеризують їхню схильність знижувати міцність під впливом різних чинників і у часі. У цьому плані важливо враховувати мінералогічний склад і будову (структуру і текстуру) гірських порід, їхній фізичний стан (вологість, щільність, звітрілість, тріщинуватість, розмокання, розм’ягчування, гідрофільність), схильність до набрякання і пластичних деформацій, властивість повзучості, довготривалу міцність, яка значно менша ніж миттєва, схильність до прогресуючої повзучості тощо. Усе це потрібно враховувати при прогнозуванні зсувів.

При аналізі геологічної будови важливо враховувати також структурно-тектонічне положення району, так як у районах які зазнають підняття внаслідок сучасних і неотектонічних рухів, постійно поповнюються запаси потенційної енергії, яка сприяє утворенню зсувів. У цьому відношенні особливе місце займають райони з високою сейсмічною активністю.

Надзвичайно важливу роль у розвитку зсувних процесів відіграє клімат. Утворення зсувів і різноманітних зсувних зміщень тісно корелює з періодами дощів, танення снігу тощо. Для зсувних явищ особливо сприятливі райони з тривалими дощами, які сприяють глибокому зволоженню і насиченню водою гірських порід на схилах. В районах зі зливовими дощами значна частина води швидко стікає по поверхні і лише незначна її кількість іде на інфільтрацію. В посушливих районах відбувається інтенсивне випаровування вологи і висушування гірських порід на схилах, що природно, підвищує їхню стійкість. Значно впливає на зволоженість порід на схилах їхня орієнтація. Південні схили підсихають швидше, північні тривалий час зберігають вологу за рахунок меншої випаровуваності.

Кліматичні умови великою мірою впливають і на гідрологічний режим водоймищ і річок, який на багатьох берегових ділянках сприяє зсувному руйнуванню схилів. Наприклад при паводках чи повенях зростає швидкість течії та інтенсивне руйнування берегів. В прибережних районах водойм може суттєво змінюватися висота хвиль і зростати розмив берега та викликана цим активізація зсувів.

У багатьох випадках господарська діяльність людини створює сприятливі умови для розвитку зсувів. Підрізка схилів, штучне збільшення їхньої крутизни, додаткове навантаження, зволоження порід на схилі, створення вібродинамічних навантажень, руйнування рослинного покриву сприяє активізації зсувів. Світова статистика свідчить, що до 70% зсувів тією чи іншою мірою зумовлена діяльністю людини.

6.2. Методи прогнозування зсувів на попередніх стадіях проєктування

Практично усі методи прогнозування зсувів ґрунтуються на детальному вивченні умов і чинників їхнього розвитку. Найпоши-

ренішим методом прогнозування зсувів на попередніх стадіях проєктування є **метод геологічних аналогій**.

Цей метод прогнозування зводиться до вивчення природної ситуації та антропогенних чинників на об'єктах – аналогах та на об'єктах, для яких потрібно розробити прогноз. Слід зауважити, що це якісні прогнози, які дозволяють з певною мірою вірогідності оцінювати можливість виникнення та інтенсивності розвитку зсувів на ділянках прогнозування.

Якісна подібність схилів – аналогів і об'єкта прогнозу означає, що вони мають однакові ознаки прогнозу:

1. Історію геологічного розвитку регіону, району чи ділянки.
2. Геологічну будову, включаючи умови залягання окремих горизонтів гірських порід, їхнє положення у розрізі, потужність, неперервність тощо.
3. Склад, структурно-текстурні особливості, тріщинуватість, водно-фізичні та фізико-механічні властивості .
4. Положення рівнів підземних вод, напірність, водозбагаченість, водопроникність, хімічний склад, умови розвантаження.
5. Характер рельєфу, його розчленованість, крутизна і форма схилів (ввігнутість, випуклість тощо) експозиція, вік.
6. Елементи складчастих структур (крила, замок, ядро складки) чи структурно-тектонічних блоків.
7. Кліматичні умови, кількість опадів, їхня тривалість, товщина снігового покриву, середньорічні температури.
8. Ступінь впливу на породи схилів процесів ерозії, абразії, діяльності людини.

Для порівняння числових значень названих показників використовуються відомі статистичні критерії: Фішера і Стьюдента.

Якщо за більшістю названих вище критеріїв природні умови об'єкта – аналога та об'єкта прогнозування подібні то вірогідність розвитку зсувів на прогнозованій ділянці дуже висока.

Часто для прогнозування зсувів використовуються показники враженості досліджуваних територій зсувами (загальної, площинної, об'ємної).

Методи прогнозу зсувів, які ґрунтуються на експертних оцінках. У випадках надзвичайної складності проблеми, недостатньої кількості наявної інформації, неможливості математичної формалізації процесу за вирішенням проблеми доводиться звертатися за

рекомендаціями до компетентних спеціалістів, які прекрасно знають проблему – до експертів. Їхнє вирішення поставленого завдання, аргументація, формування оцінок, їхня обробка формальними методами отримала назву методу експертних оцінок (*Метод Делфі*). Метод експертних оцінок містить три складові. Перша – інтуїтивно-логічний аналіз завдання. Він ґрунтується на логічному мисленні та інтуїції експертів, базується на їхніх знаннях і досвіді. Друга – вирішення проблеми і видача напівкількісних чи якісних оцінок. Ця процедура – це завершальна частина роботи експерта. Ним формується вирішення з проблеми, що розглядається і надається оцінка очікуваних результатів. Третя – обробка результатів. Отримані від експертів оцінки мають бути опрацьовані з метою отримання підсумкової оцінки проблеми.

Експертні оцінки поділяються на індивідуальні, що ґрунтуються на використанні думки окремих експертів, незалежних один від одного і колективні – ґрунтуються на використанні колективної думки експертів. Спільна думка має більшу точність, ніж індивідуальна думка кожного з фахівців. Найбільше поширення при експертній оцінці зсувної небезпеки отримали наступні способи прогнозу:

- метод асоціацій – ґрунтується на порівнянні схожого за властивостями об'єкта з іншим об'єктом;
- метод фокальних об'єктів – ґрунтується на перенесенні ознак аналогів на досліджуваний об'єкт.

Методи оцінки прояву зсувних процесів. Ці методи ґрунтуються на підрахунку коефіцієнтів враженості зсувами. Серед них виділяють: коефіцієнт загальної враженості Кз, коефіцієнт площинної враженості Кп, коефіцієнт об'ємної враженості K_V, коефіцієнт лінійної враженості *Кл* .

Коефіцієнт загальної враженості – це відношення сумарного числа зсувів до одиниці площі (км^2, гектар тощо):

$$K_з = n/F,$$

де N – сумарна кількість зсувів;
F – одиниця площі

Цей коефіцієнт враховує усі зафіксовані зсуви, які можуть мати різні розміри і по різному впливати на будівлі та споруди.. Для врахування розмірів зсувів у плані використовується коефіцієнт площинної враженості $К_п$. Він являє собою відношення сумарної площі зсувів до одиниці площі:

$$К_п = F/F_1,$$

де F - сумарна площа зсувів;

F_1 – одиниця площі.

Коефіцієнт об'ємної враженості – це відношення сумарного об'єму зсувних мас до одиниці площі:

$$К_V = V/F_1,$$

де V – сумарний об'єм зсувних мас;

F_1 – одиниця площі.

Підрахувавши ці коефіцієнти можна оцінити як загальну можливу інтенсивність зсувоутворення на тій чи іншій ділянці, так і переважаючі розміри зсувів та об'ємів зсувних мас. В окремих випадках, зокрема при проєктуванні лінійних споруд, (нафтопроводів, залізниць тощо) підраховується коефіцієнт лінійної враженості. Він являє собою відношення довжини території, враженої зсувними процесами до загальної протяжності території:

$$Кл = l/L,$$

де l – протяжність території, занятої проявами зсувного процесу;

L – загальна протяжність території.

Статистичні методи прогнозу зсувонебезпечності. До методів прогнозу зсувної небезпеки, які грунтуються на статистичному підході, відносять наступні групи:

- Геодинамічного потенціалу
- Метод регресійного аналізу
- Метод аналізу ритмічності
- Метод множинної статистики

Метод геодинамічного потенціалу

Метод дозволяє передбачити вірогідність того чи іншого числа зсувів у заданий проміжок часу на заданій території. Алгоритм прогнозування полягає у наступному:

1. Отримання фактичного матеріалу для розробки прогнозу (це карти геологічні, гідрогеологічні, геоморфологічні, сейсмічні, інженерно-геологічні, кліматичні, дані режимних спостережень).
2. Побудова карти поширення зсувів за їхніми типами на основі теоретичних передумов.
3. Вибір чинників, які визначають умови розвитку зсувів.
4. Поділ вибраних чинників на класи. Для цього складається спеціальна таблиця 4.

Таблиця 4

Приклад поділу на класи крутизни схилів

Чинник	Клас чинника	Площа класу, км^2	Площа зсувів, км^2	Вірогідність, ρ_{ji}
Крутизна схилів	0-8^0	10	0,1	0,01
	8-15^0	20	0,4	0,2
	15-30^0	5	2,0	0,4
	>30^0	3	1,0	0,3

5. Розрахунок зсувного потенціалу (результуюча ймовірність) кожної виділеної ділянки визначається за формулою:

$$W= 1-\Pi\ (1-\rho_к);$$

де П – знак добутку;

$\rho_к$ – вірогідність ρ_{ji} в сукупності m-класів чинників.

6. Побудова карти районування за значеннями зсувного потенціалу. Величина геодинамічного потенціалу змінюється від нуля до одиниці. При однакових інших умовах в зонах з більш несприятливими для стійкості схилів умовами окремого чинника зсувоутворення мають бути більш високі значення зсувного потенціалу.

7. Враховуючи це, весь діапазон зміни величини потенціалу розбивається на 4–5 інтервалів і ділянки з відомими значеннями інтервалів, які потрапляють в один з цих інтервалів, об'єднуються у відповідні райони, яким присвоюється якісна характеристика. Наприклад :

1) З дуже низькою вірогідністю виникнення чи активізації зсувів.
2) З низькою вірогідністю.
3) З середньою вірогідністю.
4) З високою вірогідністю.
5) З дуже високою вірогідністю.

Метод регрсійного аналиу. Метод регресійного аналізу ґрунтується на визначенні статитичних залежностей будь-якого показника (для регіонального прогнозу зсувів – показників враженості активними зсувами) від кількісних характеристик впливу чинників зсувоутворення і отримання так званих стохастичних (регресійних) рівнянь першого ступеню і більш високих ступенів (головно не вище другого ступеню). Цей метод може застосовуватися для прогнозу ступеню розвитку зсувів при очікуваних змінах інтенсивності чинників зсувоутворення, а також для прогнозування враженості

зсувами на територіях, де раніше зйомка з вивчення зсувів не виконувалась (за наявності аналогії з природною ситуацією, для якої отримані стохастичні рівняння).

Метод регресійного аналізу є більш досконалим порівняно з методом геодинамічного потенціалу і не потребує відносно грубого разподілу кожного чинника на класи. Але метод регресійного аналізу доволі трудомісткий і потребує складної математичної обробки.

Метод аналізу ритмічності зсувного процесу. Метод аналізу ритмічності зсувного процесу ґрунтується на виявленні періодичності активізацій зсувного процесу і його зв'язку з ритмами сонячної активності, випадінням опадів та іншими метеорологічними параметрами. Зазвичай, простежується досить чіткий зв'язок кількості зсувів з сонячною активністю і з атмосферними опадами.

Для використання методу необхідні представницькі і тривалі ряди спостережень за зсувами і достатньо складний аналіз виявлених кореляційних функцій за спеціальними програмами. Виявлені кореляційні функції дозволяють орієнтовно прогнозувати на майбутні роки загальне число зсувів та їхню площу і виявляти час очікуваної підвищеної зсувної активності для досліджуваного регіону.

Використання даного методу ускладнюється відсутністю, у більшості випадків, достатньо представницьких рядів спостережень і складністю необхідної обробки висхідних даних.

Метод множинної статистики. Особливістю методу множинної статистики, разробленого для оцінки зсувної небезпеки від сейсмогенних зсувів, є те, що інвентаризація зсувів напряму пов'язана з сейсмічними подіями, що дозволяє уникнути довготривалих спостережень, не виключаючи при цьому, часового чинника. Перевагою методу є те, що він враховує інтенсивність землетрусів, які є «спусковим гачком» для активізації прогнозованого типу зсувів, на відміну від багатьох інших методик, які використовують низку інших, не менш важливих чинників, таких як гідрологічний режим, водопроникність грунтів, літологічний склад тощо, які не враховують сейсмічний плив. Опробування методики на прикладі сейсмогенних зсувів Тайваню показав, що вона може бути використана з высоким ступенем достовірності.

Важливо відзначити, що даний метод, на відміну від детерміністичних методів, може бути використаний тоді, коли дані, необхідні для побудви детерміністичних моделей недоступні.

Використання ГІС- технологій при регіональній оцінці зсувної небезпеки. За останні роки було розроблено різні методи комплексного аналізу геологічного середовища з метою прогнозування зсувів різної генези. Так як більшість методів потребують комплексного аналізу значних масивів даних, усе більше число дослідників впроваджують свої методики в середовище ГІС, часто розробляючи при цьому специфічне ГІС-орієнтоване програмне забезпечення.

На базі ГІС-технологій в останні роки складається значна кількість карт, безпосередньо пов'язаних з прогнозуванням зсувів . До найбільших груп таких карт можна віднести карти інвентаризації зсувів, на яких відображається положення контурів уже відомих проявів зсувного процесу. До наступної великої групи відносять карти прогнозу зсувів, чи карти, на яких відображають можливість утворення зсувів у будь-який період часу для будь-якої території. Ще одна велика група карт – карти прогнозу збитків, яких завдають зсуви.

В основі усіх без винятку ГІС методів оцінки зсувної небезпеки лежить цифрова модель рельєфу (DEM).

До існуючих детерміністичних методик прогнозування зсувів, які спираються, головно, на стандартні інструменти сучасних ГІС відносяться такі як: методика прогнозування зсувів за допомогою методу логічного повернення до попередніх станів; а також подібна методика, з додатковим залученням ROC аналізу (receiver operating caracteristic curve analysis). Ці методики характеризуються тим, що середовище ГІС використовується не лише для збору даних і виводу результуючих карт. Частина розрахунків також виконується стандартними інструментами ГІС. Обов'язковий набір даних необхідний для аналізу, включає: літологічні характеристики порід; їхню насиченість водою; потужність зсувонебезпечних грунтів; крутизну схилів і їхню експозицію; загальне розчленування рельєфу тощо. В низці випадків для проведення розрахунків використовують не лише стандартні засоби ГІС, але й створюють спеціальні додатки.

Широке використання в зарубіжній практиці оцінки регіональної зсувної небезпеки знайшли геолого-гідрогеологічні методи прогнозування зсувів, що ґрунтуються на даному підході. Вони проводяться на базі моделі безкінечного укосу. На даний час розроблено декілька розрахункових модулів для реалізації геолого-гідрологічного підходу в геоінформаційних системах. Розрахунко-

вий коефіцієнт внутрішнього тертя порід, які утворюють поверхню ковзання, або в зонах, що прилягають до цієї поверхні найвідомішими є модулі Arcview–Sinmap і Shalstab.

Розрахунковий модуль оцінки зсувної небезпеки SHALSTAB був розроблений в Geological Sciences University of Washington, Seattle. Він базується на суміщенні двох моделей :

1. Визначення стійкості схилів методом безкінечного укосу на основі критерію міцності Мора–Кулона.
2. Гідрогеологічної моделі.

В методиці SHALSTAB використовують додаткове припущення про те, що зчеплення грунтів дорівнює нулю. Це наближення, очевидно, неправильне у більшості випадків, але автори методу вважають за можливе введення цього спрощення.

Кінцева оцінка зсувної небезпеки визначається з врахуванням гідрогеологічних умов.

Модель, закладена в модуль SHALSTAB, найкраще працює в областях, де малопотужний чохол розущільнених, різного ступеню обводнених грунтів, залягають на корінних породах. Причому межа між корінними породами і розущільненими грунтами досить різка.

Достатньо близьким, по суті, до методики SHALSTAB є метод регіонального прогнозу зсувної небезпеки за індеком стабільності (SINMAP).

Даний метод (Stability INdex MAPping – картування за індексом стабільності) був розроблений в Університеті штату Юта (США) спільно з консалтинговою фірмою Terratech Consulting Ltd, організацією C. N. Goodwin Fluvial System Consulting, U. S. Forest Service, Rocky Mountain Research Station (США) і організацією Forest Renewal British Columbia (Канада). В його основі також лежить розрахунок стійкості схилів за схемою безкінечного укосу з врахуванням пливу підземних вод, яка визначає коефіцієнт стійкості схилів як відношення меж утримуючими (stabilizing forces) та зсувними (destabilizing forces) силами. Найкращі результати використання методу SINMAP дає при оцінці небезпеки від неглибоких зсувів.

Дещо інший підхід для аналізу зсувної небезпеки, грунтується *на морфометричних критеріях схилів*, був використаний в розрахунках модуля ARCVIEW – SMORPH (slope morphology model).

Обчислювальна модель оцінки зсувної небезпеки SMORPH ґрунтується на уявленнях, що морфологічні особливості схилів (тобто градієнт нахилу і форма кривизни поверхні) є найважливішими чинниками при розвитку дрібних зсувів. При цьому градієнт нахилу визначає з одного боку співвідношення утримуючих і зсуваючи сил, а з другого – впливає на потужність зсувних відкладів і одночасно з формою кривизни схилу на гідрологічні процеси (швидкість руху поверхневих вод), що, як наслідок, визначає ступінь водо насичення грунтів. Таким чином, модель оцінки зсувної небезпеки SMORPH відображає сприйнятливість рельєфу до зсувного процесу.

Незалежне тестування теорії, яка пов'язує морфометричні критерії з потенціалом розвитку зсувного процесу, виконані в штаті Вашингтон, показало, що 90 % усіх існуючих на даній території зсувів мілкого закладання можуть бути ідентифіковані на основі моделі SMORPH .Вхідними даними для аналізу є: топографічна основа і дані морфометричного аналізу території, що піддається зсувному процесу. Для отримання цієї інформації як правило використовуються легкодоступні цифрові моделі місцевості (DEM), що, безумовно, є великою перевагою методу.

На основі спільного аналізу градієнту нахилу поверхні схилу і його кривизни (ввігнутий, плоский, випуклий) створюється «морфометрична матриця» зсувної небезпеки території. Математично, поверхня схилу може бути задана як функція, яка в свою чергу може бути апроксимована поліномом четвертого порядку.

Кривизну поверхні схилу можна отримати як другу похідну від приведеного вище поліному, при цьому, якщо вона від'ємна – схил випуклий, а якщо додатна – схил ввігнутий.

Кількість і градації класів градієнту нахилу поверхні схилу першочергово встановлюються на основі даних дистанційного зондування і польових досліджень або визначається об'єктом-аналогом для кожної ділянки території однорідного в геоморфологічному відношенні і потім екстраполюється на всі подібні ділянки в межах геологічної області. На другому етапі кожному елементу морфометричної матриці, з врахуванням даних польових досліджень ставиться у відповідність певний рівень зсувної небезпеки.

Модель SMORPH добре працює при прогнозі зсувів неглибокого закладання (менше 10 м), які формуються в елювіально-

делювіальних відкладах, коли генеза відкладів тісно пов'язана з формами рельєфу.

6.3. Методи прогнозування зсувів на заключних стадіях проєктування

Локальні прогнози належать до певних типів силових процесів, до місць їхнього прояву і, головно, у взаємодії з конкретними спорудами. Із-за своєї великої конкретності, локальні прогнози мають дуже велике практичне значення, як правило, здійснюються комплексом методів і найліпше оцінюють природу і механізм зсувного процесу.

Локальний прогноз стійкості кожного схилу здійснюється у два послідовних етапи:

- прогноз змін чинників зсувоутворення (навантажень на схил, властивостей порід, гідрогеологічних та інших умов на схилі, що вивчається);
- аналіз стану схилу та окремих його морфологічних елементів у залежності від змін рельєфу, зовнішніх навантажень і впливів, а також до прогнозних змін інженерно-геологічної ситуації.

При прогнозі зсувної небезпеки можуть вирішуватися два види завдань:

- розрахунки стійкості з метою оцінки небезпеки розвитку зсувного процесу у залежності від змін чинників зсувоутворення;
- оцінка динаміки змін стану схилу (в тому числі оцінка швидкості зміщення зсувних мас), залежно від зміни чинників зсувоутворення.

Прогноз змін чинників зсувоутворення має враховувати вплив планованої інженерно-господарської діяльності під час експлуатації схилу, а також результати впливу природних екзогенних геодинамічних процесів (ерозійних, абразійних, зсувних, звітрювання тощо) на досліджуваний схил.

При вивченні локальної стійкості зсувів часто використовують наступні класи методів:

- методи фізичного моделювання;
- методи математичного моделювання.

Методи фізичного моделювання. Фізичне моделювання передбачає відтворення в фізичній моделі тих же самих чи аналогіч-

них фізичних полів, що діють і в об'єкті натури, лише змінених за своїм абсолютним значенням у відповідності з масштабом моделювання. Однією з основних переваг фізичного моделювання є можливість здійснення прямих спостережень за досліджуваними процесами.

Разом з тим, при побудові будь якого виду моделей відтворюються лише ті загальні, принципово суттєві особливості досліджуваних процесів і чітко відбираються діючі чинники, які в процесі модельних досліджень можна змінювати.

Теоретичною основою моделювання фізичних явищ є вчення про подібність. Основну властивість подібних явищ було сформовано Ж. Бертраном в 1848 р. Згідно з існуючими уявленнями «подібними називаються явища, які відбуваються в геометрично подібних системах, якщо у них у всіх точках відношення відповідних величин є постійними числами». Для того щоб отримати коректні результати необхідно забезпечити наступні *види подібності моделі і натурного об'єкта:*

а) подібність геометричних властивостей систем;
б) пропорційність фізичних констант, які відіграють суттєву роль у досліджуваному процесі;
в) подібність початкового стану систем;
г) подібність умов на межі систем протягом усього періоду процесу, що розглядається;
д) рівність визначальних критеріїв, при цьому визначальними критеріями подібності є ті, які мають суттєве значення у процесі, що вивчається.

Для забезпечення умов механічної подібності моделі і натурного об'єкта можна використовувати штучні матеріали, механічні характеристики яких, в прийнятому геометричному масштабі моделювання, еквівалентні по відношенню до гірських порід, що моделюються. Цей метод носить назву методу еквівалентних матеріалів.

Суть методу еквівалентних матеріалів полягає у заміні природних грунтів їхніми лабораторними аналогами, основні показники яких повинні задовільняти вимогам механічної подібності і забезпечувати аналогію деформацій, під дією власної ваги в натурному об'єкті і на моделі. Моделювання на еквівалентних матеріалах – це достатньо тривалий і трудомісткий процес, однак при грамотному

його використанні можуть бути отримані хороші результати. Метод еквівалентних матеріалів дозволяє з великим ступенем детальності прослідкувати процеси деформування, які відбуваються в грунтах при зсувному процесі, що зазвичай недосяжно при використанні інших методів.

До основних переваг методу можна віднести можливість його використання для вирішення особливо складних завдань, а також вести спостереження за деформаціями, що розвиваються за межами теорії пружності. Основними недоліками методу є його трудомісткість і тривалість у виготовленні моделі.

Зараз, для моделювання процесів деформування масивів гірських порід під навантаженням, використовується модифікація методу еквівалентних матеріалів – метод термопластичних матеріалів (з регулюванням міцності і деформативних властивостей в процесі випробувань шляхом нагріву). Ця технологія забезпечує адекватність деформаційної поведінки і процесів руйнування моделі та натурного об'єкта, дає можливість дослідження практично усіх можливих типів деформацій гірських порід.

До методів моделювання також належать оптичні моделі, дослідження моделей на відцентрових установках, натурні моделі тощо.

Загалом експериментальні методи моделювання дають хороші результати переважно в однорідних чи рівномірно шаруватих масивах. Для складних інженерно-геологічних умов моделі, які дозволяють з достатнім ступенем надійності оцінювати стійкість схилів до тепер не створені. Тому, не дивлячись на свою наглядність, ці методи не стали універсальними і в багатьох випадках потребують перевірки і підтвердження отриманих даних. Слід відзначити, що їхнє використання при моделюванні зсувних процесів доволі важко. Тому використання розрахункових методів оцінки зсувної небезпеки в останні роки набирає усе більшої актуальності.

Методи математичного моделювання. На відміну від фізичного моделювання математичне передбачає побудову деяких ідеалізованих схем, чи математичних моделей досліджуваних процесів. Враховуючи це, методи математичного моделювання відносять до теоретичних методів досліджень.

Головним завданням яке вирішують за допомогою математичного моделювання є розрахунок стійкості схилів. Історія розраху-

нку стійкості схилів нараховує понад 250 років. Її початок було покладено Шарлем Кулоном, який сформулював у 1773 р. умову міцності грунту:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c ,$$

де τ – опір зсуву грунту,
σ – нормальна напруга,
φ – кут внутрішнього тертя,-
с – питоме зчеплення грунту.

Прогноз розвитку зсувних процесів методами розрахунку стійкості схилів складна і трудомістка задача. Але винайдення потужних персональних комп'ютерів на початку 80-х рр. зробило створення програмного забезпечення для розрахунку стійкості схилів економічно доцільним і виправданим, що у свою чергу, привело до широкого використання і аналізу стійкості схилів в інженерній практиці.

Використання того чи іншого методу великою мірою визначається будовою зсувонебезпечних схилів. Зсуви по чітко фіксованій рівній поверхні ковзання, зсуви в однорідних за літологічним складом породах, зсуви в неоднорідних породах.

Метод розрахунку коефіцієнта стійкості схилів з нахиленою поверхнею ковзання (рис. 3). Умови рівноваги зсуву по площині 1–1 визначаються рівнянням:

$$T = N \operatorname{t}\varphi + CL,$$

де Т –складова сили тяжіння (загальної ваги породи (Р), яка складає зсув і спрямована на зміщення грунтів, $T = P \sin \alpha$, тс;
N – складова сили тяжіння спрямована на утримання порід на схилі, $N = P\cos \alpha$. тс;
$\operatorname{tg} \varphi = f$ –розрахунковий коефіцієнт внутрішнього тертя порід, які утворюють поверхню ковзання, або зони, що прилягає до цієї поверхні;
С – розрахункове зчепленя порід, які утворюють поверхню ковзання, або складають зону, що прилягає до цієї поверхні, тс/м^2;
L – довжина поверхні ковзання I–I, м;
α – кут нахилу поверхні ковзання.

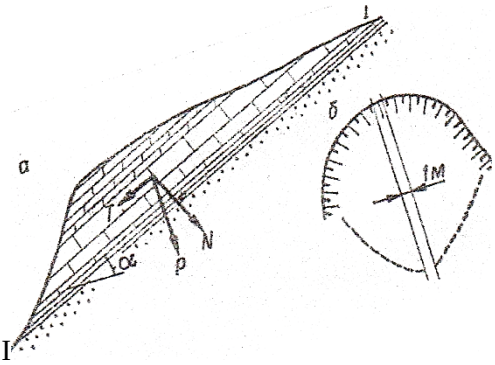


Рис. 3. Розрахункова схема зсуву з нахиленою плоскою поверхнею ковзання: а)розрахунковий геологічний розріз, б) – план зсувної ділянки

Розрахунок ведеться не для усього об'єму зсуву, а для масиву порід, шириною 1 м, виділеного по лінії розрахункового геологічного розрізу. Визначивши по геологічному розрізу площу S ($м^2$) і відповідно об'єм виділеного масиву, визначають його вагу

$$P = V\gamma,$$

де V – об'єм виділеного масиву, V 1 $м^3$;
γ – розрахункова щільність порід, що складають зсув, тс/ $м^3$.

За отриманими даними розраховують коефіцієнт стійкості:

$$\eta = N \operatorname{tg} \varphi + CL/T$$

Якщо коефіцієнт стійкості менше одиниці, породи на схилі знаходяться у нестійкому стані і можуть зміститися. Якщо коефіцієнт дорівнює одиниці, породи на схилі знаходяться у стані нестійкої рівноваги. Якщо коефіцієнт більше одиниці, породи на схилі знаходяться у стійкому стані.

При прогнозуванні стійкості схилів складених однорідними породами використовують *метод так званої круглоциліндричної поверхні ковзання.* Суть методу розрахунку стійкості схилів і відкосів вказаним методом полягає у наступному.

Передбачається, що зміщення порід, може відбутися по одній з кругло-циліндричних поверхонь з радіусами різної довжини у напрямку від головного уступу до його підошви. По кожній із таких поверхонь ковзання перевіряють стійкість схилу. За найбільш віро-

гідну поверхню ковзання приймають ту, по якій коефіцієнт стійкості буде мати найменшу величину.

Розрахунок коефіцієнта стійкості проводиться як і у попередньому випадку для масиву шириною 1 м, виділеного по геологічному розрізу. Враховуючи те, що поверхні ковзання різних радіусів будуть мати різні кути нахилу, зсувний масив розбивають на окремі блоки (рис. 4) з таким розрахунком, щоб їхня ширина дорівнювала приблизно 0,1 радіусу кривої ковзання.

Визначають площу S, об'єм V і вагу P кожного блока описаним вище способом. З центру тяжіння кожного блоку на поверхню ковзання опускають перпендикуляр і до точки перетину проводять дотичну, кут нахилу якої характеризує середній кут нахилу поверхні ковзання у межах кожного блоку.

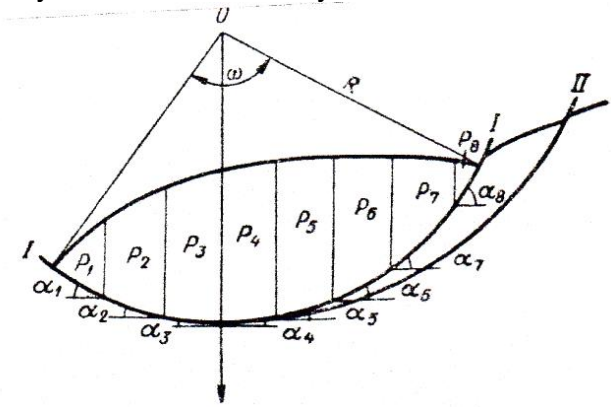


Рис. 4. Розрахункова схема зсуву з ввігнутою круглоциліндричною поверхнею ковзання. I–I, II–II поверхні ковзання.

Цей кут можна визначити також за формулою:

$$\sin \alpha = x/R,$$

де R – радіус кривої ковзання, x – відстань від точки перетину кривої ковзання (проєкції центру тяжіння на криву ковзання) до вертикального радіусу (рис. 5). Визначають довжину кривої ковзання I–I.

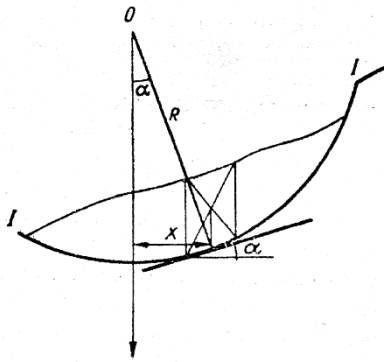


Рис. 5. Схема визначення середнього кута нахилу поверхні ковзання у межах кожного блоку

Довжину кривої ковзання можна також визначити з виразу:

$$L = \pi/180\ R\ \omega,$$

де ω – центральний кут (рис. 4).

За отриманими даними розраховується коефіцієнт стійкості за формулою:

$$\eta = \sum f\ N_i + C\ L / \sum T_i\ .$$

Як видно з рисунку4, поверхня ковзання у межах блоків 1,2,3 нахилена в глибину схилу, відповідно ці блоки будуть стримувати зсування решти зсуву. Тому при складанні рівняння рівноваги сили N_1, N_2, N_3. T_1. T_2. T_3 приводять зі знаком мінус, а при обчисленні $\sum N_i$ і $\sum T_i$, використовують метод алгебраїчного додавання сил, які діють по поверхні ковзання. Розрахунок здійснюють для кожної з намічених поверхонь ковзання, з яких виявляють найвірогіднішу.

Найвірогіднішою поверхнею ковзання буде поверхня, для якої коефіцієнт стійкості буде найменшим.

Крім наведених вище, вітчизняними та зарубіжними вченими, розроблено та активно використовується низка ефективних, але складних і трудомістких у виконанні методів, які дозволяють прогнозувати стійкість схилів зі складною інженерно-геологічною будовою та широким спектром зовнішнього впливу. Вони ґрунтуються на різних теоретичних засадах. Серед них, зокрема, слід назвати:

- методи межової рівноваги;

- методи кінематичного аналізу;
- методи статистичного аналізу обвалів;
- методи, що ґрунтуються на механіці суцільного середовища;
- методи, що ґрунтуються на механіці дискретного середовища;
- гібридні методи.

У зв'язку з обмеженістю часу вони розглядатися не будуть.

Тема 7
МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ КАРСТУ

7.1. Основні поняття і визначення, карстові загрози, класифікація, умови і чинники розвитку карсту

Карст – це геологічний процес розчинення водорозчинних порід, який призводить до утворення підземних та поверхневих форм рельєфу. Карст належить до небезпечних екзогенних геологічних процесів, прояви якого завдають величезних економічних та екологічних збитків. Головним збиткоутворюючим чинником для інженерних споруд є утворення поверхневих карстових форм (карстових провалів, лійок, колодязів, блюдець тощо) (рис. 6–9).

Карст один з найскладніших і важкопрогнозованих небезпечних геологічних та інженерно-геологічних процесів. Утворення поверхневих карстових форм відбувається, як правило, майже миттєво (протягом лічених хвилин). Карстові процеси розвиваються у різних за літологічним складом породах, які залягають у різноманітних інженерно-геологічних умовах.Карстові явища у межах України охоплюють понад 60% її території (рис. 10).

Водорозчинні породи (гіпси) у м. Львові охоплюють територію понад 30 км^2.В окремих районах карстові явища розвиваються дуже інтенсивно, особливо під впливом техногенних чинників. Так наприклад за 10 років експлуатації Язівського кар'єру з видобутку самородної сірки утворилося понад 900 поверхневих карстових форм діаметром від 3–5 до 20–80 м.

Наведені дані вказують на дуже високий ризик виникнення недопустимих деформацій і тим більше повного руйнування інженерних споруд потребує розробки прогнозних оцінок можливості та інтенсивності його розвитку.

Рис. 6. Карстові провали (18 і 12 м у діаметрі), наповнені водою поблизу вул. Кульпарківської у м. Львові (березень 1992 р.)

Рис. 7. Карстовий провал діаметром 30 м в с. Воля Старицька , поблизу м. Новояворівськ Львівської області (березень 1995 р.)

Рис. 8. Карстовий провал діаметром 20 м в околицях м. Львова (с. Піски, березень 2006 р.)

Рис 9. Карстові провали діаметром 100 і 300 м поблизу м. Стебник Львівської області (30.09.2016 та 15.03.2020 рр.)

Рис. 10. Картосхема поширення карсту в Україні (geoinf.kiev.ua)

За ступенем розчинності гірських порід карст поділяється на карбонатний (вапняки, доломіти, писальна крейда), сульфатний (гіпси, ангідрити) та соляний (натрієві та калійні солі) карст. Швидкість розчинення вказаних типів порід (породотвірних мінералів) суттєво відрізняється. Розчинність кальциту становить при температурі 16 °С 0,013 г/л, гіпсу – 2,02 г/л, галіту при 10° – 357,2 г/л. За цією ознакою породи поділяються на важкорозчинні, (карбонати), середньо розчинні (гіпси, ангідрити), легкорозчинні (солі). Розвиток карбонатного карсту у природних умовах відбувається дуже повільно (головно, у геологічному часі), сульфатного – значно швидше, у солях катастрофічно швидко. За умовами залягання водорозчинних порід карст поділяється на голий, або відкритий та покритий.

Голий карст поширений переважно в Середземномор'ї, де на поверхню часто виходять корінні породи, здебільшого вапняки. Голий карст виник безумовно під впливом господарської діяльності людини в історичний час. Ліси в багатьох місцях по-хижацькому були вирубані, а дощі майже повністю змили там ґрунтовий покрив. Це і сприяло розвитку карстових процесів. Для голого карсту характерні форми рельєфу: карри і понори (рис. 11).

Покритий (середньоєвропейський) карст – це такий карст, в якому породи, що карстуються, прикриті нерозчинними відкладами, генетично не пов'язаними з карстовою товщею. В районах розвитку покритого карсту форми поверхневого вилуговування відсутні, а переважають лійки, колодязі, шахти, блюдця карстові долини тощо (рис. 11). Карстові блюдця і долини утворюються під час механічного виносу піщано-глинистого матеріалу водою, цей матеріал просочується з покривної товщі вглиб через тріщини і понори в карстових породах. Виділяють ще задернований карст, де карстові породи прикриті лише ґрунтово-рослинним шаром. Тут поширені всі форми голого карсту за винятком каррів. Він трапляється по сусідству з голим карстом. Якщо карстові породи прикриті породами, що не карстуються або слабо карстуються, такий карст називається броньованим. Він трапляється на Поділлі, Буковині та в інших районах.

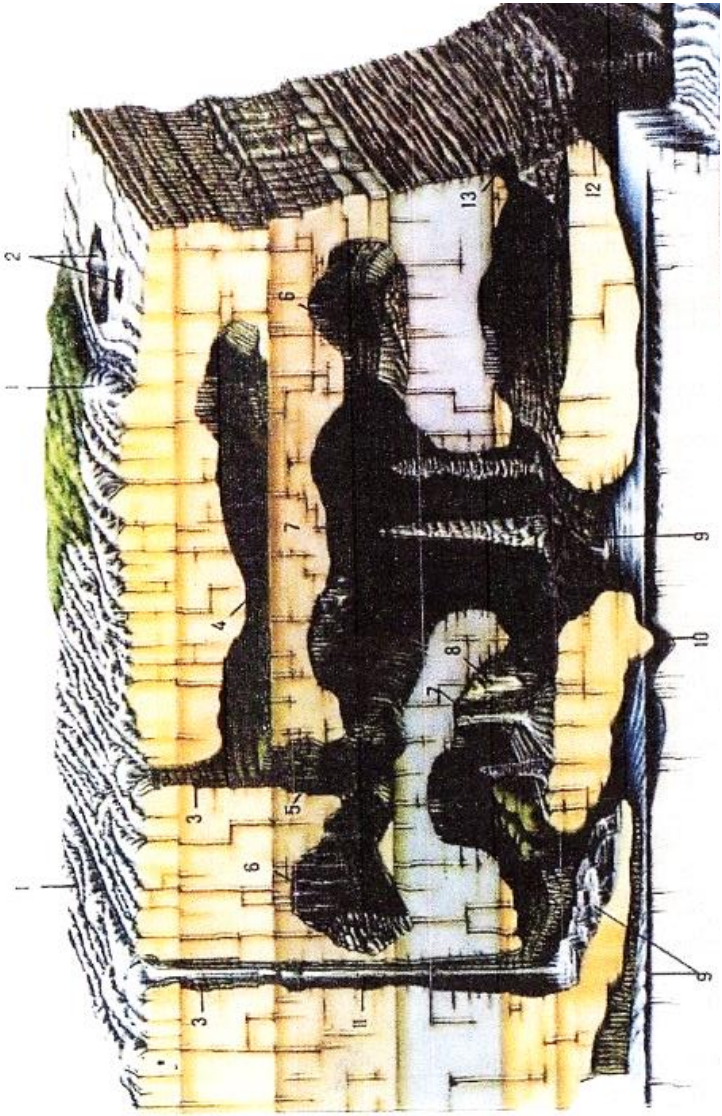


Рис. 11. Схема основних карстових форм рельєфу у породному масиві 1 – карри, 2 – лійки, 3 – природні шахти і колодязі, 4 – печерна галерея, 5 – вертикальна печерна порожнина, 6 – сталактити, 7 – сталагміти, 8 – натічні форми, 9 – підземні водотоки, 10 – сифон, 11 – підземний водоспад, 12 – грот з карстовим джерелом, 13 –вхід в печерну систему

Розміри провальних форм рельєфу коливаються у широких межах, вони великою мірою залежать від розміру підземних порожнин та глибини їхнього залягання (див. рис.6–9).Характерним проявом карсту на глибині є присутність у товщі водорозчинних порід широкого спектру підземних карстових форм: каналів, гілчастих порожнин, проходів, галерей, залів, печер тощо, сумарна довжина яких вимірюється десятками і сотнями кілометрів. Часто утворюються складні лабіринти. Як відомо, на Поділлі виявлено найдовші гіпсові печери. До їхнього числа належить печера «Оптимістична». Сумарна закартована довжина її ходів становить понад 260 км. Печера до кінця не розвідана. Вона займає площу близько 2 га, що зумовлено численністю та звивистістю ходів. Ходи залягають на глибині близько 20 м від поверхні. Печера сильно замулена глиною. Вона занесена до Книги рекордів Гіннеса як найдовша у світі гіпсова печера, найдовша печера Євразії та п'ята за довжиною серед печер світу.

Виникати і розвиватися карст може лише за поєднання певних природних умов. Таке поєднання визначається одночасною наявністю: 1) породи, яка відносно легко розчиняється у воді, 2) проникності цієї породи, 3) води, яка рухається у породі, 4) розчинною здатністю води. Розглянемо детальніше кожний із факторів, що обумовлюють утворення карсту.

За ступенем розчинності можна виділити наступні основні групи порід: а) карбонати (вапняки, доломіти); б) гіпси та ангідрити; в) галоліти (хлористі і сірчанокислі солі натрію, калію і магнію). Розчинність найголовніших сполук залежить від будови кристалічної гратки, розмірів кристалів, наявності домішок. Дрібніші зерна розчиняються швидше у порівнянні з великими. Водні розчини у породі можуть бути недосиченими по відношенню до дрібних зерен, насиченими щодо зерен середніх розмірів і перенасиченими стосовно великих. В результаті в один і той же час дрібні зерна можуть розчинятися, а великі рости. Це є причиною значної нерівномірності й примхливості розподілу в карбонатних породах каверн і пор розчинення.

Розчинність порід залежить і від домішок. Розрізняють два види домішок: більш важкорозчинні у порівнянні з даною сіллю та більш легкорозчинні. Перші гальмують процес розчинення внаслідок того, що вони в процесі самого розчинення вкривають поверх-

ню кристалу колоїдною плівкою, яка перешкоджає розчиненню солі. До таких домішок належать глинисті частки і розсіяні бітумінозні речовини. Більш легкорозчинні домішки, наприклад, кам'яна сіль або гіпс, що містяться у породах, переходячи у розчин, значною мірою впливають на розчинну здатність природних вод.

Розчинна здатність води залежить від температури, тиску, наявності в природних водах вуглекислоти, наявності у водних розчинах солей та ін. Вплив температури на розчинність солей у дистильованій воді порівняно невеликий. Причому, розчинність кам'яної солі й кальциту підвищується з ростом температури від 0 до 100°С, а ангідриту і гіпсу підвищується лише приблизно до 35°, а при більш високих температурах знижується.

Розчинення карбонатів у вуглекислих водах може відбуватися лише тоді, коли порушується карбонатна рівновага

$$CO_2 \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow (Ca,Mg)(HCO_3)_2 \leftrightarrow (Ca,Mg)CO_3$$

Кожному певному вмісту у воді CO_2 відповідає строго визначена кількість інших компонентів рівняння, яка відображає рухливість хімічних реакцій. Із зростанням вмісту CO_2 збільшується кількість H_2CO_3, яка реагує з твердою фазою карбонатів і переводить їх у розчин у формі гідрокарбонатів. Із зменшенням вмісту CO_2 в розчині зменшується вміст H_2CO_3 та розчинних гідрокарбонатів і частина карбонатного матеріалу випадає в осад. Та кількість вільної вуглекислоти, яка визначає вміст у воді H_2CO_3, що знаходиться у рівновазі з твердим карбонатом, називається рівноважною вуглекислотою. Якщо вміст вільної вуглекислоти у воді буде більшим ніж це необхідно для рівноваги, то рівновага порушується і починається розчинення карбонатів.

Агресивність поверхневих і підземних вод є однією з основних геохімічних причин виникнення і розвитку карбонатного карсту. На швидкість розчинення водорозчинних гірських порід і, відповідно, на швидкість розвитку карсту суттєво впливає швидкість руху водних потоків – швидкість водообміну.

Визначення ступеню агресивності підземних вод по відношенню до карбонатних порід, ґрунтується на тому, що кількість карбонату кальцію, яка може перейти у водний розчин, що вивчається, має бути не більшою певної величини. Якщо встановиться дефіцит насичення підземних вод цією сполукою, води будуть аг-

ресивні у відношенні до карбонатних порід, що карстуються. Кількість карбонатів кальцію, здатного перейти в розчин, визначається з рівняння добутку розчинності карбонату кальцію, який отримують за результатами хімічного аналізу проб води, відібраної з товщі карбонатних порід. До агресивних відносяться води, які вміщують понад 10 мг/л агресивної CO_2.

В умовах розвитку сульфатного карсту визначення стану хімічної рівноваги між підземними водами і сульфатним породами виконують шляхом порівняння добутку активностей іонів кальцію і сульфатів. Якщо добуток активності іонів кальцію і сульфатів менший добутку розчинності сульфатів, це означає, що рівновага відсутня і розвиток корозійного процесу неминучий.

В умовах соляного карсту стан хімічної рівноваги між підземними водами і породами, що карстуються визначається шляхом порівняння ступеню мінералізації вод з величиною максимальної розчинності солі в даному водному розчині. Якщо мінералізація підземних вод нижча від цієї величини, це означає, що рівновага відсутня і буде відбуватися процес розчинення. Пересічно до агресивних відносяться підземні води з мінералізацією менше 360 г/л.

Утворення карсту залежить від водопроникності гірських порід. Проникаючи в гірські породи по порах і тріщинах, рухаючись по них, інколи вкрай повільно, вода може розчиняти породи і тим самим збільшувати їх пористість, що в свою чергу призводить до посилення водообміну. Однак рух води по пустотах і вилуговування порід не завжди веде до збільшення розміру пустот. Наприклад, при вилуговуванні вапняків, що містять глинисті частки, останні можуть закупорювати тріщини і карстові порожнини і тим самим сприяти зменшенню фільтрації води і затуханню карстового процесу. Чим більшою є тріщинуватість гірських порід, тим кращі умови створюються для виникнення карстових явищ. Зв’язок карстових проявів із тріщинуватістю порід підтверджується витягнутістю «ланцюжків» карстових лійок вздовж переважних систем тріщинуватості, приуроченістю карстових печер і порожнин до великих тріщин.

Одна із основних умов розвитку карсту – водообмін. Умови руху підземних вод та інтенсивність водообміну змінюються по вертикалі. В областях з потужними розчинними породами можна виділити чотири вертикальні зони, відмінні одна від одної за умовами руху підземних вод і, відповідно, за умовами розвитку карсту:

I – зона аерації, де має місце переважно вертикальна фільтрація, що призводить до формування вертикальних карстових каналів;

II – зона сезонного коливання рівні підземних вод; тут у періоди підйому рівня вода фільтрується в горизонтальному, а в період його спадання – у вертикальному напрямку (розвиваються вертикальні і горизонтальні порожнини в розчинній породі);

III – зона повного насичення, яка перебуває у сфері дренувального впливу гідрографічної сітки (карст розвивається у дні річкових долин і в берегах);

IV – зона глибинної циркуляції, де рух води відбувається по за безпосереднім дренуючим впливом гідрографічної мережі і зумовлений тектонічною структурою та окремими осередками розвантаження. Вилуговування порід у цій зоні відбувається повільно.

Розчинна здатність підземних вод зменшується з глибиною, тому що з глибиною збільшується насичення води різними сполуками, які інколи перешкоджають розчиненню. З глибиною затухають біохімічні процеси, в результаті дії яких утворюється вуглекислота, що сприяє розчиненню.

За віком карст можна розділити на: а) сучасний, або активний, що розвивається вище від сучасного рівня корозії; б) древній, або пасивний, розвинений нижче сучасного рівня корозії. Древній карст може бути похованим, коли поверхня закарстованих порід перекрита (похована) більш пізніми відкладами. Карст перестає розвиватися після припинення надходження води в карстові порожнини (наприклад, внаслідок заповнення карстових порожнин печерною глиною).

На утворення карсту впливають також і геоморфологічні умови. Наприклад, поблизу крутих ерозійних і абразійних схилів створюються сприятливі умови для водообміну, тому що на цих ділянках тектонічні тріщини бувають розширеними за рахунок вивітрювання, утворення зсувів, осідання порід тощо. Дуже впливає на розвиток карсту клімат, бо від нього залежать кількість, характер і розподіл сезонних опадів, характер і інтенсивність процесів вивітрювання, температурний режим у верхніх частинах земної кори.

Найважливішими особливостями областей розповсюдження закарстованих порід є:

- інтенсивне поглинання поверхневих вод;
- підвищена водозбагаченість закарстованих порід;
- нерівномірна водопроникність;

- наявність локальних, стійких у часі поздовжніх прирічкових депресій рівня підземних вод.

Головними інженерно-геологічними (техногенними) умовами карстових районів є такі:

1) масштабне відпомповування підземних вод з карстових масивів і прискорення водообміну;
2) інтенсивне поповнення підземних вод за рахунок поверхневого стоку;
3) глибокий дренаж ряду родовищ корисних копалин;
4) можливість підвищених витоків води з каналів і водосховищ, як через їхні борти і дно, так і в обхід гребель;
5) посилене живлення річок за рахунок тріщинно-карстових вод;
6) збагачене обводнення тріщинно-карстовими водами будівельних котлованів, тунелів, шахт.

7.2. Методи прогнозування карсту на попередніх стадіях проєктування

Прогнозування ступеню закарстованості та інтенсивності розвитку карсту має величезне значення у зв'язку з великою вірогідністю виникнення аварій і катастроф. На попередніх стадіях проєктування використовуються, головно, методи якісного рідше кількісного прогнозу.

При прогнозуванні карстової небезпеки використовуються методи описані для прогнозу зсувонебезпечності, зокрема: метод експертних оцінок, метод аналогій, методи оцінки ступеню враженості території поверхневими і підземними формами карсту. У зв'язку з абсолютною ідентичністю з описаним вище метод експертних оцінок розглядатися не буде.

При використанні методу аналогій практично зберігається загальний алгоритм прогнозних оцінок, дещо іншими є показники для порівняння об'єкта аналога та об'єкта прогнозування. Для порівняльної характеристики вибираються наступні чинники:

- геоструктурне положення об'єктів і тектоніка;
- літологічні типи водорозчинних порід;
- глибина залягання водорозчинних порід у відношенні до базису ерозії;
- літологічний склад порід, що перекривають водорозчинну товщу;

- фільтраційні властивості перекривних порід і порід, що карстуються;
- фізико-механічні властивості перекривної товщі та порід, що карстуються;
- гідрогеологічні умови об'єктів;
- гідрохімічний і гідродинамічний режим підземних вод;
- рельєф та кліматичні умови;
- ступінь враженості карстом окремих районів;
- техногенні умови.

Якісна і кількісна оцінка подібності дозволить спрогнозувати карстонебезпечність ділянки майбутнього господарського використання.

Методи прогнозу карстової небезпеки на основі аналізу показників інтенсивності карстових провалів. Ці методи ґрунтуються на підрахунку коефіцієнтів враженості поверхневими формами карсту. Серед них виділяють: коефіцієнт інтенсивності утворення карстових провалів λ, коефіцієнт площинної враженості $К_п$, коефіцієнт об'ємної враженості K_V, коефіцієнт лінійної враженості *Кл*.

Коефіцієнт загальної враженості це відношення середньорічної кількості провалів на 1 км ^{2}):

$$\lambda = n/At,$$

де n – число карстових провалів, що утворилися на площі А, км ^{2}, за t років.

Цей коефіцієнт враховує усі зафіксовані провали, які можуть мати різні розміри і по різному впливати на будівлі та споруди. Для врахування розмірів провалів у плані використовується коефіцієнт площинної враженості $К_п$. Він є відношенням сумарної площі зсувів до одиниці площі:

$$К_п = \sum As/A,$$

де $\sum As$ – сумарна площа площа карстових лійок на поверхні землі.

Коефіцієнт об'ємної враженості K_V:

$$K_V = \sum Vs\ /At$$

де $\sum Vs$ – сумарний об'єм лійок на площі А.

Лінійний коефіцієнт внутрішньої закарстованості *Кл:*

$$Кл = \sum h_c / \sum l_b$$

де h_c – вертикальний розмір карстової порожнини;
l_b – довжина проходки свердловин у товщі водорозчинних порід.

Підрахувавши ці коефіцієнти можна спрогнозувати як загальну можливу інтенсивність карстоутворення на тій чи іншій ділянці, так і переважаючі розміри поверхневих форм карсту та об'ємів карстових форм рельєфу. Для оцінки ступеню підземної закарстованості використовують коефіцієнт лінійної закарстованості. Він являє собою відношення сумарної висоти карстових порожнин до загальної потужності водорозчинних порід:

$$Кл = \sum h_c / \sum l_b,$$

де h_c — вертикальний лінійний розмір порожнин;
l_b — потужність водорозчинних порід.

Іноді використовується показник сучасної активності карстових процесів Н.В. Родіонова:

$$K_a = U_{dis}/V_m,$$

де V_m – об'єм масиву водорозчинних порід;
U_{dis} – об'єм розчиненої породи, що виноситься підземними водами з карстового масиву за 1000 років.

Для оцінки стійкості території відносно карстових провалів використовується коефіцієнт λ наведений у таблиці:

I категорія – дуже нестійкі території
II – нестійкі території
III – недостатньо стійкі території
IV – пониженої стійкості
V – відносно стійкі
VI – стійкі території.

Відповідні категорії виділяються і за розміром карстових провалів (табл. 5, 6).

Статистичні методи прогнозування карстової небезпеки.

Вихідними даними для прогнозування є: карта карстових провалів і карти різноманітних природних чинників, які впливають на можливість та інтенсивність розвитку карсту (глибина залягання водорозчинних порід, їхня потужність, літологічний склад порід, що перекривають водорозчинні породи, потужність перекриваючої товщі, фільтраційні властивості водорозчинних порід і перекриваючої товщі, глибина залягання підземних вод, хімічний склад підземних вод тощо).

Таблиця 5

Категорії стійкості території відносно карстових провалів залежно від інтенсивності провалоутворення

Інтенсивність провалоутворення, км^2/рік, випадки:	**Категорії стійкості території відносно карстових провалів:**
понад 1,0	I
від 0,1 до 1,0	II
від 0,05 до 0,1	III
від 0,01 до 0,05	IV
до 0,01	V
можливість провалів виключена	VI

Таблиця 6

Категорії стійкості території відносно карстових провалів залежно від діаметрів карстових провалів

Середні діаметри карстових провалів, м:	**Категорії стійкості території відносно карстових провалів:**
понад 20	А
від 10 до 20	Б
від 3 до 10	В
до 3	Г

Вплив кожного з чинників на інтенсивність розвитку карсту різна і проявляється у вигляді тенденції, яка кількісно може бути виражена системою коефіцієнтів зв'язку які мають наступний вигляд:

$$Q_i = n_i(A-A_i) – (n-n_i)A_i/n_i(A-A_i)+(n-n_i)A_i;$$

де А – загальна площа території поширення даного чинника;
A_i – площа і-ї ознаки чинника;
n_i – кількість карстових провалів на площі А;
n –загальне число карстових провалів на площі А.

Величина Q_i змінюється від -1 (провали неможливі при і-й ознаці досліджуваного чинника) до +1 (провали можливі тільки при і-й ознаці).

Розглянемо приклад. В карстовому районі гіпси залягають на різній глибині і мають різну потужність глин, що їх перекривають. Потрібно порівняти вплив цих двох чинників на частоту утворення

карстових провалів від глибини залягання водорозчинних порід і потужності глин над цими h_i.

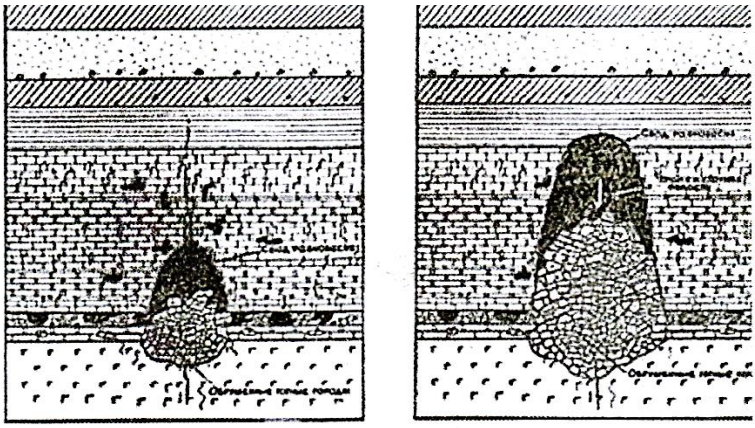
Таблиця 7

Таблиця для визначення коефіцієнтів зв'язку

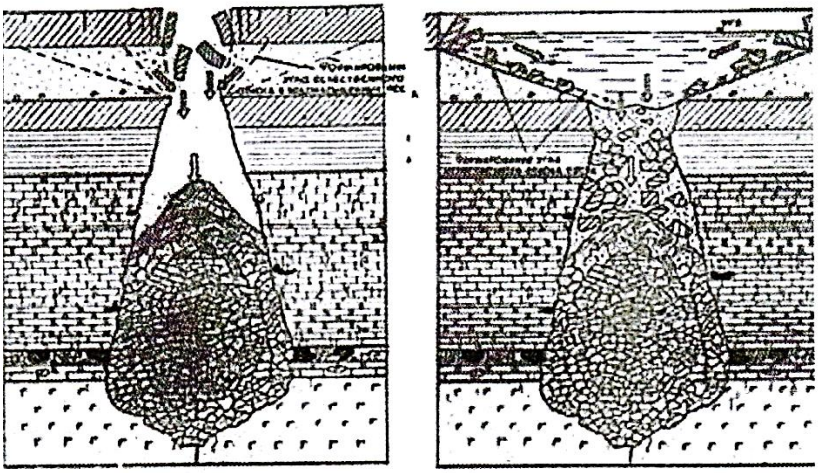
Досліджуваний чинник	**Площа території A_i**	**Число провалів, n_i**	**Q_i**
Глибина залягання гіпсів, м:			
10–30 30–50 > 50	1090 3256 6794 ∑11140	511 1220 1275 3006	+ 0,31 + 0,25 - 0,36
Потужність глин над гіпсами, м:			
0–5 5–10 10–15 >15	1370 1660 2360 1110 ∑ =6400	432 490 654 181 1757	+ 0,10 + 0,06 + 0,02 - 0,24

Аналізуючи характер зміни коефіцієнтів Q_i з таблиці 7 можна зробити наступні висновки.

Із збільшенням глибини залягання водорозчинних порід тенденція утворення провалів відповідно зменшується. Це пояснюється тим, що із збільшенням глибини залягання порожнин виникають сприятливіші умови для заповнення порожнини продуктам обвалювання і, відповідно, її подальший розвиток призупиняється. Із збільшенням потужності глин, що перекривають водорозчинні породи, в інтервалі до 15 м існує незначна тенденція у зменшенні інтенсивності провалів. При більшій потужності (> 15 м) вона проявляється різкіше. Це пояснюється тим, що уже сам факт наявності в покрівлі водорозчинних порід слабо проникних глин (майже незалежно від їхньої потужності), створює передумови, за яких процес розчинення порід, що карстуються і відповідно утворення провалів ускладнений. При більшій потужності глин, крім того, істотно зростає стійкість покрівлі карстової порожнини. Крім прогнозу стійкості територій щодо карстових провалів великий вплив на карстову небезпеку має діаметр провалів. Тому їх прогнозування є однією з важливих інженерних завдань.



Утворення склепіння у вапняках



Руйнування склепіння у м’яких породах

Виположування провалу у шарі водоносного піску

Рис. 12. Послідовність утворення карстових провалів

Існує декілька шляхів прогнозування діаметра провалів, основними із них є вірогіднісно-статистичний і метод моделювання.

Вірогіднісно-статистичний метод. Цей метод ґрунтується на статистичному аналізі розмірів карстових провалів і полягає у побудові кривої розподілу і оцінці статистичних параметрів, необхід-

них для визначення розрахункового розміру карстових провалів: математичного очікування M_d ($d_{сер.} \approx M_d$), дисперсії σ^2, максимального діаметра d_{max}, коефіцієнта варіації K_{var}.

Для підвищення достовірності прогнозування діаметра карстових провалів необхідно підбирати теоретичні криві розподілу за емпіричними графіками розподілу (гістограмами) діаметра провалів. У багатьох випадках (особливо для відносно великих за площею територій, де значення основних природних чинників, що впливають на діаметр провалів істотно змінюється розподіли діаметрів провалів підпорядковуються логарифмічно нормальному закону.

Чим однорідніша територія з точки зору постійності чинників, які впливають на діаметр карстових провалів, тим більшою мірою закон розподілу діаметрів наближається до нормального закону, а коефіцієнт варіації зменшується.

При визначенні статистичних закономірностей діаметрів провалів слід мати на увазі, що після утворення карстового провалу на поверхні землі його діаметр збільшується із затухаючою у часі швидкістю.. Спочатку, головно, за рахунок зміщення (зсування) схилів, який відповідає їхній стійкості, а потім за рахунок ерозії до деякого практично стабільного діаметра (див. рис. 12).

Механізм карстових провалів великою мірою залежить від геологічної будови порід, що перекривають водорозчинні породи.

7.3. Методи прогнозування карсту на заключних стадіях проєктування

На заключних стадіях проєктування та у процесі експлуатації будівель і споруд використовуються, як правило, кількісні методи прогнозування, зокрема розрахунково-теоретичні методи та методи моделювання. Використання вказаних методів має спиратися на детальну інформацію про інженерно-геологічні, гідрогеологічні та гідрохімічні умови майданчика забудови, а також фізико-механічні властивості як водорозчинних, так і покриваючих порід. Особливе місце при цьому займають дані про підземну закарстованість масиву, яка визначає можливі розміри (діаметр) карстових провалів. На жаль ця проблема дотепер однозначно не вирішена, так як методів,

які б дозволяли однозначно виявляти порожнини різного розміру немає. У зв'язку з цим , поряд з оконтуреними бурінням порожнинами можуть існувати порожнини не зафіксовані буровими свердловинами. Пошук і оцінка розмірів карстових порожнин є проблемою і фінансово-часовою, адже отримання достовірної інформації потребує великих обсягів бурових робіт.

Один з розрахунково-теоретичних методів розроблено В. В. Толмачовим, який дозволяє визначити діаметр круглоциліндричного карстового провалу d_0 і діаметра лійки зі стійкими схилами, що враховує навантаження від споруди, форму, розміри і глибину закладання фундаменту H_z і місце передбачуваного провалу.

$$d_0 = (\sum c_i \Delta z_I + \sum \Delta f_i) / q_i,$$

де Δz_I – товщина і-го шару грунту з заданими значеннями питомого зчеплення c_i, кута внутрішнього тертя ϕ_i та питомої ваги γ_i,
n – число розрахункових елементів товщиною Δz_I.

$$\Delta f_i = (\alpha_i i\, p_0 + \sum \gamma i\, \Delta z_I) k_i \operatorname{tg} \phi_i \Delta z_I$$

$$K_i = 1 - \sin \phi_i$$

$$q_i = p_0 + \sum \gamma_i \Delta z_I$$

де α_i – коефіцієнт розподілу напружень за глибиною підґрунтя;
p_0 – середній тиск під підошвою фундаменту споруди, з урахуванням діючого тиску від ваги грунту.

У процесі експлуатації споруд, особливо при розробці соляних родовищ часто виникає проблема прогнозування розвитку техногенного карсту. Потрапляння агресивних вод у підземні гірничі виробки часто викликає катастрофічний розвиток техногенного карсту, що потребує прогнозування місць утворення карстових провалів та їхніх можливих розмірів.

Зокрема, з метою прогнозування характеру і швидкості розчинення міжкамерних соляних ціликів на руднику № 2 Стебницького гірничо-хімічного комбінату «Полімінерал» проводилось спеціальне фізичне моделювання карстового процесу. У моделях використовували сіль, відібрану з гірничої виробки і воду хімічний склад, якої відповідає шахтним водам, моделювалась також динаміка водного потоку і характер перебігу процесу.

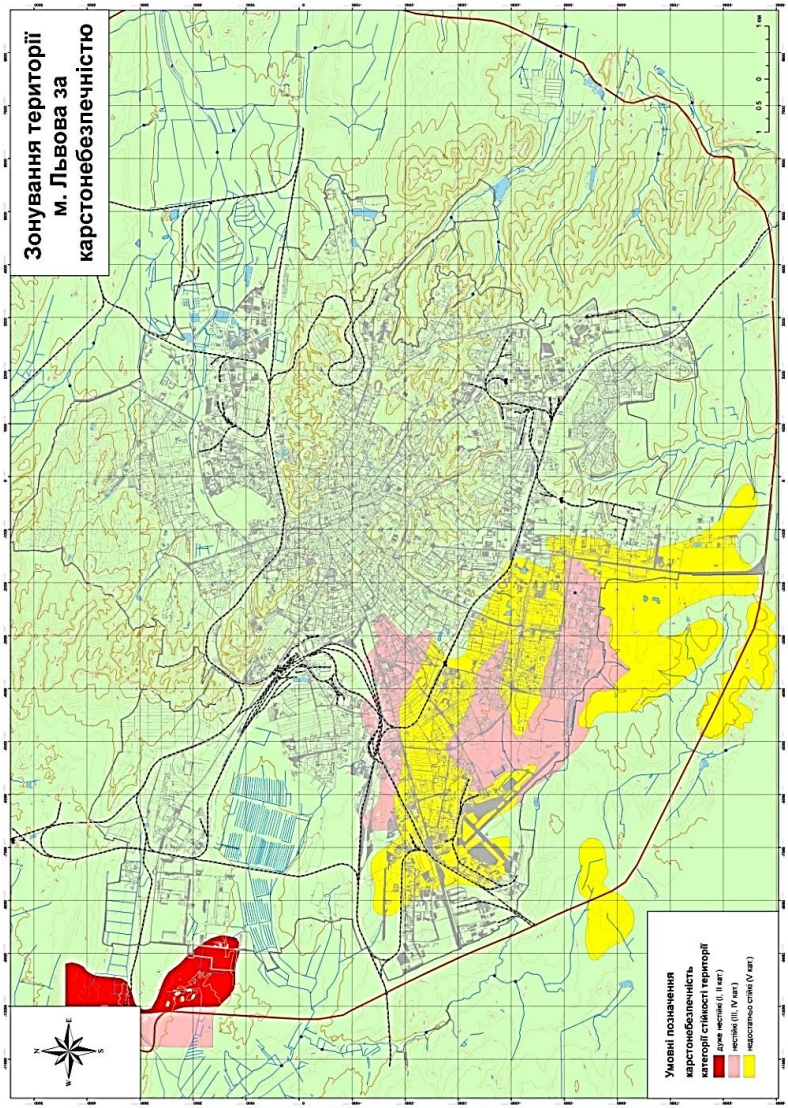


Рис. 13. Зонування території м. Львова за карстонебезпечністю

На основі виконаного моделювання було передбачено не лише місце майбутнього провалу (див. рис. 9) і його розміри, але й

час утворення. Іноді, при проєктуванні особливо відповідальних споруд, прогноз карстової небезпеки проводиться на моделях з використанням еквівалентних матеріалів. За показником інтенсивності розвитку карсту λ , нами здійснено прогноз та зонування території м. Львова за карстонебезпечністю (див. рис. 13).

Тема 8
МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ АБРАЗІЇ

8.1. Умови, чинники розвитку, поширення абразії та її вплив на господарські об'єкти

Абразія (лат. *abrasio* – зішкрябувати, стирати; англ. *abrasion,* нім. *Abrasion f, Abschleifung f, Abtragung f, Abtrieb f*) – це геологічний процес руйнування берегів і знесення гірських порід у береговій зоні водойм хвилями і прибоєм. Суттєва абразія характерна для великих водойм — океанів, морів, озер чи великих водосховищ. Україна відноситься до держав де цей процес розвивається дуже активно і завдає величезної економічної та екологічної шкоди. Його розвитку активно сприяють природні умови. Слід зауважити, що береги Чорного та Азовського морів простягаються сумарно на понад 2000 км. Із них понад 1400 км є абразійними.Розвиток абразії на берегах Чорного, Азовського та Балтійського морів зображено на рис. 14–18.

Розвиток абразії у багатьох випадках супроводжується розвитком зсувів, що суттєво підвищує масштаби збитків. Щороку Україна втрачає понад 65 га прибережних земель, а в роки з екстремальними штормами, коли приплив хвильової енергії перевищує середній у декілька разів то втрати сягають понад 200 га. Не менш активно розвивається абразія і на берегах водосховищ дніпровського каскаду. За даними А. Б. Авакяна і В.А. Шарапова на Каховському водосховищі через рік після його наповнення ширина руйнування берега, складеного дуже легкорозмиваними лесами місцями досягала 30-45 м , а за чотири роки – 90–100 м. На Дніпровському водосховищі ширина зони руйнування берега за 13 р. експлуатації досягала місцями 140–180 м. Важливим є те, що разом із береговою територією повністю руйнуються або виводяться з ладу низка берего-

вих об’єктів (рис. 17). Втрати від цього щорічно складають понад 2 млрд доларів США.

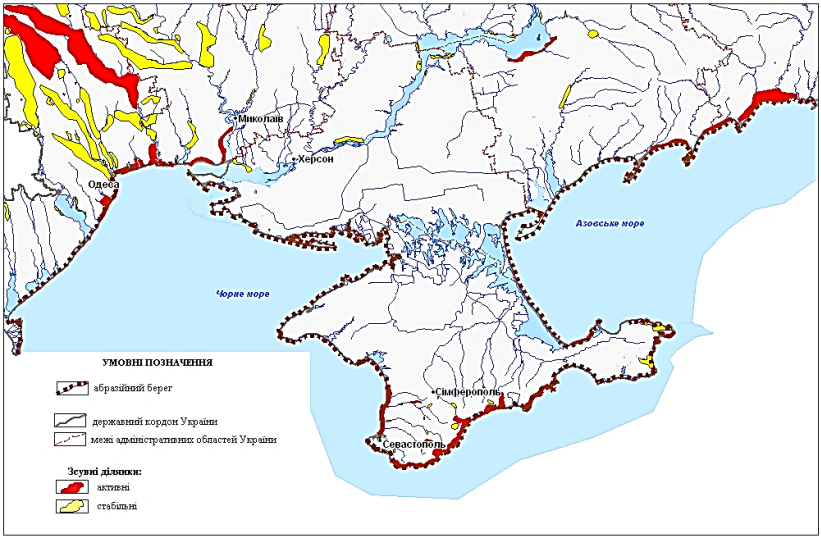


Рис.14. Абразійні береги Чорного і Азовського морів на території України (geoinf.kiev.ua)

Рис.15. Розвиток процесів абразії, ускладненого зсувами, на берегах Чорного моря

Рис. 16. Розвиток процесів абразії на берегах Азовського моря

Рис.17. Абразійне руйнування будівель в районі м. Одеса

Рис.18. Абразійний берег Балтійського моря в районі м. Сопіт (Польща)

Основними умовами, які визначають можливість та інтенсивність розвитку абразії є:

1) геоморфологічні: рельєф берега (висота, форма, крутизна, рельєф підводного берегового схилу, орієнтація берегової лінії, положення акумулятивних форм рельєфу, сучасні геологічні процеси, їхні прояви та активність;
2) гідрологічні: розміри водної поверхні, режим рівня води, інтенсивність хвилеприбійних явищ, викликаних панівними вітрами, рухом пароплавів, паводковими явищами, напрямок прибережних течій тощо;
3) геологічні: літологічний склад та ступінь розмиваності гірських порід, умови їхнього залягання, орієнтація тектонічних структур, неотектонічні та сучасні тектонічні рухи земної кори, розподіл пухкого матеріалу у прибережній зоні і його склад;
4) господарська діяльність людини : будівництво споруд у береговій зоні, підрізка схилів, зміна розмірів пляжу, частота змін рівня води (для водосховищ).

Серед геоморфологічних чинників провідна роль належить висоті, формі та крутизні схилу, а також рельєфу берегової відмілини.

Найважливішим геологічним чинником є показник розмиваності порід. Стійкість берегів значною мірою залежить також від умов залягання порід. При горизонтальному чи нахиленому у бік водойми заляганні осадових гірських порід різного петрографічного складу. Якщо на рівні прибою хвиль виходять слабкі породи (наприклад прошарки піску) у них дуже швидко виробляється хвилеприбійна ніша, утворюються нависаючі карнизи і виступи, які призводять до масових обвалів.

Провідну роль в інтенсивності розвитку абразії відіграють деякі гідрологічні чинники зокрема енергія (висота) хвиль. У різних районах узбережжя цей показник суттєво відрізняється.

Наприклад, у північно-західному районі Чорного моря при штормах південно-східного та південного напрямків висота хвиль відкритого моря 5% забезпеченості не перевищує 3,5-4,5 м, натомість у глибоководній частині моря шторми східних та північно-східних напрямків, які впливають на береги Криму , у відкритому морі збуджують хвилі 5% забезпеченості висотою 10–12 м. Так біля Ялтинського узбережжя максимальна зареєстрована висота хвилі становила – 8 м.

Хвилювання на Азовському морі обмежене його невеликими розмірами і складною конфігурацією берегів. Біля північного узбережжя максимальна висота вітрової хвилі складає 1,6–2,0 м, біля південного – від 2,8 до 3,3 м. Але враховуючи те, що береги у багатьох місцях складені легкорозмиваними породами (лесами) відбувається їхнє активне руйнування.

Не менший вплив на інтенсивність абразії створюють техногенні чинники, перш за усе активна забудова, яка здійснюється у безпосередній близькості від берега.

Забезпечення стійкості і функціональної придатності господарських об’єктів, які будуються на берегах водойм потребує надійних прогнозних оцінок їхнього розвитку на усіх стадіях проєктування, а також експлуатації.

8.2. Методи прогнозу абразійних процесів на попередніх стадіях проєктування

Для прогнозування абразії на попередніх стадіях проєктування тобто для регіонального прогнозування так як і при прогнозу-

ванні зсувів і карсту використовуються методи експертних оцінок, які ґрунтуються на відповідних знаннях фахівців про особливості природних і техногенних умов регіону.

При використанні методу аналогій мають аналізуються показники, які визначають можливість та інтенсивність абразійних процесів, зокрема:

- рельєф берега, його висота, крутизна і форма, а також рельєф берегової відмілини;
- швидкість руйнування берега на об'єкті аналізі;
- основні гідрологічні показники водоймиш, та параметри хвилювання;
- геологічні чинники, перш за все розмиваність порід об'кта аналога та прогнозованих ділянок. Обов'язково враховується ступінь звітрілості та тектонічної порушеності масивів гірських порід.
- враховується також характер планованої господарської діяльності, яка може суттєво вплинути на інтенсивність абразії (необґрунтовано близьке від берегової лінії будівництво, зволоження грунтів на схилі, підрізка схилів для розширення пляжів.

На основі порівняльної оцінки природних умов об'єкта прогнозування та об'єкта аналога прогнозується можливість та інтенсивність розвитку абразійних процесів.

Загалом з питань усебічного вивчення зазначеної проблеми вийшло немало наукових праць, однак надійних прогнозів і досі не знайдено. Причини – у складності й різноманітності численних явищ із цілою низкою особливостей, також через обмаль безпосередніх спостережень за динамікою розвитку конкретного явища.

8.3. Методи прогнозування абразії на заключних стадіях проєктування

Для забезпечення стійкості та експлуатаційної надійності споруд, що проєктуються на берегах водоймищ мають використовуватися переважно кількісні методи.

Кількісний метод прогнозування абразії берегів вперше запропонував Ф.П. Саваренський (1935). Надалі низку методів розробили М.Є. Кондратьєв, Г.С. Золотарьов, Є.Г. Качугін, Є.К. Гречищев, Л.В. Розовський та ін. Так, М.Є. Кондратьєв, Є.К. Гречищев і Б.А. Пишкіна, вивчаючи руйнування берегів при експлуатації во-

досховищ, значну увагу приділили гідрогеологічним чинникам, а Є.Г. Качугін – зокрема енергії хвилювання води і розмиваності гірських порід, Г.С. Золотарьов зосередився в своїх наукових прогноза на геологічних, геоморфологічних і гідрологічних умовах.

У практиці проєктних організацій нині найчастіше використовують методи Г.С. Золотарьова та Є.Г. Качугіна.

Метод Г.С. Золотарьова. Оскільки цей метод застосовують для рівнинних і гірських водоймищ, розташованих в різних географічних умовах, його вважають досить універсальним. Так, руйнування берега можна прогнозувати на два терміни: через 10 років після наповнення водосховища і на кінцеву стадію, тобто коли швидкість руйнування берега вже не матиме великого значення.

Мета методу. Для всіх типових за інженерно-геологічною будовою ділянок готують топографічну основу і розрахункові геологічні розрізи з нанесенням їх показників. На топографічному профілі (рис. 19) – дані про геолого-літологічну структуру й гідрогеологічні умови з фіксацією фізико-геологічних явищ: окрім суфозійних, це обвали, зсуви тощо. На профілі ставлять позначку найвищого проєктного горизонту *(НПГ)* та значення амплітуди коливань рівня води у водному об'єкті (висота зони спрацювання), визначені в результаті гідрологічних спостережень і гідротехнічних розрахунків.

Від лінії *НПГ* відкладають (угору) висоту накату хвилі $h_н$. Цю величину розраховують за формулою М. М. Джунківського:

$$h_н = 3{,}2\, K\, h_в \operatorname{tg}\alpha,$$

де K – коефіцієнт, що залежить від ступеня шорсткості укосу (для гладких поверхонь він дорівнює одиниці, а для горизонтів із каменю – 0,775);
$h_в$ – висота хвилі, м; α – кут нахилу укосу.

Як засвідчили досліди, висота накату підвищується із збільшенням кута нахилу укосу і досягає максимальної величини, коли кут матиме 45−60°. Зростання шорсткості укосу призводить до того, що ця висота зменшується.

Розрахунок висоти хвилі – за формулою В.Г. Андреянова:

$$h_в = 0{,}0208\ \sqrt[4]{W}\ \sqrt[3]{D},$$

де W – швидкість вітру, м/с;

D – довжина розгону хвилі за даним напрямком, км.

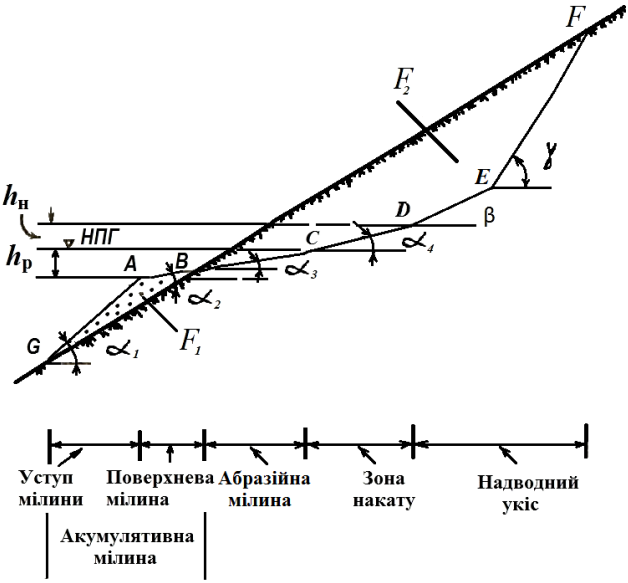


Рис. 19. Схема для розрахунку процесу руйнування берега за методом Г.І. Золотарьова (на 10-річний термін)

При розрахунках (у середньому) висоти хвилі на 10-річний термін на профіль наносять половину її значення (0,5*hв*), обчисленого за формулою М. М. Джунківського, а для кінцевої стадії – повну висоту.

Від лінії *НПГ* (для кінцевої стадії – від горизонту спрацювання) проводять лінію (униз), що відповідає глибині розмивання берега, м.

Розраховуючи стан піщано-глинистих берегів на 10-річний період, за глибину розмиву беруть:

- для легкорозмивних порід ±*hр* =1,5*hв* ;
- для дуже легкорозмивних порід (лес) ±*hр* = 2*hв* .

Під час розрахунків для кінцевої стадії руйнування берега за глибину розмивання беруть *hр* = 2*hв* та *hр* = 3*hв* відповідно.

На лінії розмивання позначають довільно вибрану точку *A*, що відповідає брівці уступу підводної мілини, де передбачається різка зміна її форми (рис. 19). Від точки *A* проводять дві лінії: лінію

уступу мілини *AG* і лінію поверхні мілини *AB*. Кути їх нахилу залежать від складу накопичень самої мілини. Кут нахилу уступу мілини α_1 беруть таким, що дорівнює 10–12° для піщано-глинистих відкладів, і 18–20° – для гравійних і крупнопіщаних. Кут нахилу поверхні мілини α_2 може змінюватися від 1,5° для тонких пісків і до 10–12° – для галечника й щебеню. Величини кутів установлюють на основі польових спостережень або – за рекомендаціями фахівців.

Визначивши кут α_1, лінію уступу мілини переносять з точки *A* (униз) до перетину з лінією топографічного профілю в точці *G* . Якщо відомий кут α_2 , то з точки *A* (угору) виводять лінію поверхні мілини до її перетину з топографічним профілем у точці *B* , з якої слід провести пряму під кутом α_3 до її перетину в точці *C* із горизонтальною лінією на позначці *НПГ*. Лінія *BC* обмежує абразійну частину мілини. Кут нахилу, що залежить від складу порід цієї частини мілини та хвильового режиму, визначають дослідним шляхом (вимірюють кути нахилу мілини, утворені за аналогічних умов).

Із точки *C* пряму направляють під кутом α_4 до її перетину з горизонтальною лінією (точка *D*) на позначці висоти накату хвилі. Кут нахилу зони накату хвилі (табл. 8) також залежить від складу порід і висоти самої хвилі.

За даними натурних спостережень, із урахуванням геологічної будови схилу формується профіль його надводної частини. При відсутності даних від точки *D* до точки *E* (на третині висоти берега) проводять відрізок *DE* під кутом β (30−33°), а від точки *E* до точки *F* – відрізок *EF* під кутом φ (60−70°). Після побудови названого профілю встановлюють співвідношення площ акумулятивної частини мілини F_1 і частини розмивного схилу F_2. Коли співвідношення $F_1 / F_2 = K$ відповідає відсотку акумуляції за табл. 8, побудову та прогноз вважають досить виправданими, якщо ж ні, – будують повторно.

Переміщенням точки *A* ближче до берега або подалі від нього можна досягти потрібного співвідношення площ акумуляції та розмиву, чим і обґрунтувати місцезнаходження точки *A* на профілі прогнозу. На ділянках із глинистими легкорозмивними породами або там, де хвилі та спрямовані течії змивають розущільнений матеріал, $K = 0$. У такому разі точку *A* треба розташовувати на перетині з лінією первинного схилу (рис. 19). Після побудови потрібного профілю визначають ширину зони руйнування берега *Lпер* .

Таблиця 8

Кути природного укосу для побудови прогнозованого профілю під час переробки берегів водосховищ
(за даними Г.С. Золотарьова і Д.Н. Раші)

Породи	Кут укосу мілини,	Кути нахилу мілини α_2 і α_3 для стадій, град.		Кути нахилу зони накату α_4 для стадій, град.		Акумуляція за об'ємом, %
		10-річної	кінцевої	10-річної	кінцевої	
Піски тонко та дрібні	10-12	1,5	1	5	3	5-10
Піски різно-середньозернисті		3	2	6	4	10-15
Піски грубозернисті та гравій		5	3	10	6	15-20
Галечник і щебінь з піщаним наповнювачем	18-20	10-12	8-10	18-20	15-18	20-35
Галечник і щебінь з глинистим наповнюववачем		8-10	6-8	15-18	14-16	20-35
Супіски		1,5	1	4	3	3-5
Суглинки		1,5	1	4	2-3	3
Леси		1,5	1,5	4	2	3
Глини		2	1,5	6	8	0

Метод Є. Г. Качугіна. В основі розробленої методики прогнозу руйнування берегів водоймищ покладено емпіричну формулу:

$$Q = E\,Kp\,Kб\,t\,,$$

де Q – кількість розмивної породи берега за час t (рік) на 1 м його довжини, м ^{3};

E – енергія хвилювання води (у середньому) в даному пункті;

Kp– коефіцієнт розмиваності порід (табл. 9);

$Kб$ – коефіцієнт, який ураховує висоту берега;

t – час розмиву, рік;

$в$ – показник ступеню менше одиниці залежно від швидкості припинення розмиву.

Таблиця 9

Значення коефіцієнта розмиваності порід *Кр*

Породи	***Кр, м***
Дуже легкорозмивані: піски дрібні, супіски легкі, леси	0,0065-0,0030
Легкорозмивані: піски середньозернисті, і суглинки зі щебенем	0,0030-0,0010
Середньорозмивані: суглинки важкі, суглинки з валунами, глини і піски з гравієм та галькою	0,0010-0,0005
Важкорозмивані: пісковики глинисті, і піски з валунами, глини з прошарками опок	0,0005

Під коефіцієнтом розмивності порід *Кр* розумість об'єм розмитої породи, м^3, який припадає на одиницю енергії хвилювання води протягом першого року експлуатації після наповнення водосховища, тобто до формування прибережної мілини, а саме: $Кр = Qi / Ei$.

Згаданий вище коефіцієнт пропонують визначати за табл. 2. Коли берег складений породами різної розмиваності, *Кр* дорівнює середньозваженій величині з урахуванням потужності гірських порід.

Руйнування берегів уздовж берегової лінії зазвичай призводить до утворення мілини, навколо якої хвилі втрачають чимало енергії. Як виявлено в результаті спостережень, при постійній енергії хвиль ширина мілини обернено пропорцій-на висоті берега. Тому коефіцієнт *Кб*, що враховує висоту берега, на мілині непрямо відображає величину втрати енергії хвиль. Цей коефіцієнт розрахований емпірично і чисельно дорівнює добутку середньої висоти берега проєктованої ділянки на коефіцієнт *С* :

$$Кб = hб\ C\ .$$

Величина *С* змінюється від 0,003 для дуже легкорозмивних порід до 0,005 – для важкорозмивних. Якщо висота берега понад 30 м, *Кб* дорівнює одиниці.

Розрахунок руйнування берега виконують для певного моменту, що збігається з часом розмивання берега *t* (рік). Показник ступеня *в* при величині часу розмивання характеризує відношення ширини абразійної частини мілини до ширини всієї мілини (акумулятивної й абразійної), тобто швидкість уповільнення розмиву. У середньому він становить 0,7, а якщо мілина абразійна, то досягає

0,95. У разі ж значної ширини акумулятивної частини мілини величина *в* зменшується до 0,45.

Слід відзначити, що величину енергії хвилювання води знаходять для кожної типової ділянки берегової зони, попередньо встановивши висоту хвиль за методом О. П. Браславського з 0,1%-ною забезпеченістю, а за графіками (рис 20) – величину енергії хвилювання води з введенням даних про тривалість дії вітру.

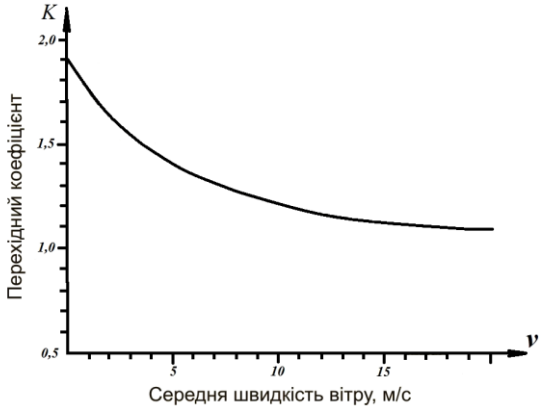


Рис. 20. Крива визначення перехідного коефіцієнта при розрахунку швидкості вітру над водною поверхнею (за даними О.П. Браславського)

Висоту хвиль установлюють, використовуючи графіки О. П. Браславського, побудовані за умови постійної швидкості вітру для піщаного дна водойми, а при проміжних значеннях цієї швидкості – шляхом інтерполяції (рис. 21).

Ширину зони руйнування берега визначають за допомогою графічної побудови, для чого на розрахунковий геологічний розріз наносять лінію найвищого проєктного горизонту, верхню і нижню межі розмиву (*ВМР, НМР*). За верхню межу Є.Г. Качугін рекомендує приймати положення високого рівня води у водосховищі з 2–4%-ною забезпеченістю.

За нижню межу розмиву приймають положення низького рівня води з 96– 98 %-ною забезпеченістю у безльодовий період.

Побудову профілю здійснюють аналогічно наведеному вище, тобто за методом Г. С. Золотарьова з урахуванням відношення *F2/F1=k* для різних періодів часу.

Наведені методи прогнозування за своєю суттю є ***методами графоаналітичного моделювання.***

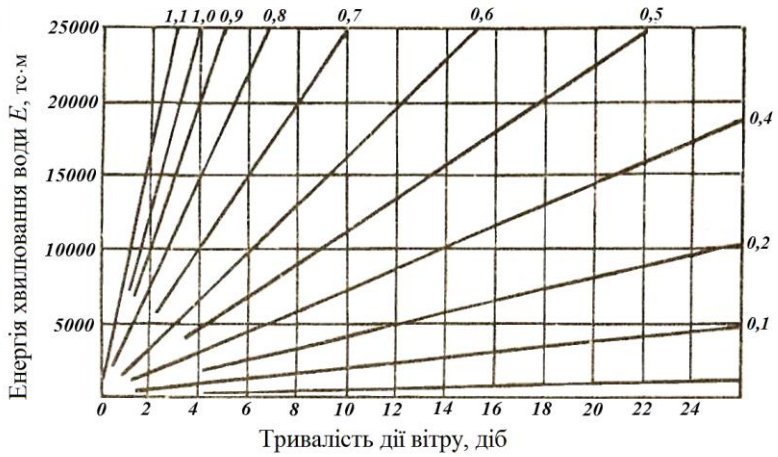


Рис. 21. Графіки для визначення енергії хвилювання води за тривалістю дії вітру і висотою хвилі з 0,1%-ною забезпеченістю

Тема 9
МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ПІДТОПЛЕННЯ

9.1. Основні поняття і визначення, закономірності розвитку та поширення підтоплення

Підтоплення – комплексний природно-техногенний процес підвищення рівня ґрунтових вод і збільшення вологості порід зони аерації.

Гранична глибина залягання грунтових вод – глибина від поверхні землі до максимального рівня грунтових вод, допустимого (за проєктом або прогнозом) на весь період експлуатації територій, будівель та споруд.

Підтоплення (грунтовими водами) – це інженерно-геологічний процес, який має прояви у певних умовах природного середовища (у тому числі на міських територіях) внаслідок спільного впливу причин і чинників як природного, так і техногенного походження, коли за розрахунковий період часу відбувається збіль-

шення вологості грунтів або підняття рівня грунтових вод до граничних значень, за якими порушуються умови будівництва й експлуатації будинків та споруд, відбувається пригнічення та загибель зелених насаджень, засолення та заболочування земель сільськогосподарського призначення.

Підтоплювані території – усі схильні до підтоплення і затоплення ділянки територій міст і селищ, на яких підвищення вологості грунтів, підняття рівня грунтових вод або затоплення вже призвели або можуть призвести в майбутньому (за прогнозом). На окремих ділянках підтоплюваних територій спостерігаються різні стадії процесів підтоплення (затоплення) і відповідно до цього виділяються підтоплені території (у тому числі ті, що потребують термінового захисту) та потенційно підтоплені території.

Підтоплені території – ділянки, на яких постійно або тимчасово на досить тривалий період (місяць і більше) грунтові води підіймаються вище граничних глибин залягання або відбувається затоплення, або коли підвищення вологості грунтів, істотно впливають на роботу об'єктів економіки в регламентованому режимі. При цьому не враховуються випадкові аварійні ситуації.

Техногенне підтоплення та затоплення – підтоплення та затоплення територій та споруд внаслідок будівництва або виробничої діяльності.

Підтоплення, за динамікою розвитку та територіальним поширенням, є найбільш переважаючим серед екзогенних геологічних процесів для України. Це комплексний процес, що характерний переважно для господарсько освоєних територій. Внаслідок порушення водного режиму і балансу територій відбувається підвищення рівня підземних вод. Підтоплення спричинює несприятливі зміни геологічного середовища та активізацію небезпечних геологічних процесів. Зокрема, через підтоплення відбуваються зміни фізико-механічних властивостей порід і зменшення їхньої несучої здатності, призводить до активізації небезпечних геологічних процесів (карсту, зсувів, суфозії), що призводить до непередбачуваних осідань будівель і споруд та їхнього руйнування, агресивності підземних вод, підвищення сейсмічної бальності територій, погіршується якість ґрунтів, відбувається заболочування ділянок, забруднення поверхневих і підземних вод затоплення і погіршення санітарно-гігієнічних умов заглиблених інженерних споруд.

За даними ООН, нині у світі загальна площа земель, що втратили родючість внаслідок діяльності людини, у тому числі й від підтоплення, досягла 2 млрд га, що в 1,5 рази перевищує площу орних земель в Європі. Щороку у світі 200–300 тис. га зрошуваних земель внаслідок заболочення і засолення вилучаються із сільськогосподарського обігу. З часом всі зрошувані землі опустелюються через заболочення, засолення, деградацію ґрунтів.

В Україні площа підтоплених внаслідок, як нині виявилось, непродуманої меліорації, втрат води та впливу інших природних і техногенних чинників за даними РНБО становить 129,6 тис. км², або 21,5 % загальної площі території України.

Підтоплення зазнають більше 2 тис. міст, селищ і сільських населених пунктів з населенням до 16 млн. жителів. Особливо загрозливого характеру процеси підтоплення набули у Миколаївській (52 % загальної площі області), Одеській (40 %), Херсонській (36 %), Найбільший ризик підтоплення урбанізованих територій властивий Дніпропетровській, Донецькій, Житомирській та Одеській областям. Соціально-економічні збитки від цього явища у сільській місцевості вираховуються кількома десятками тисяч гривень.

Підтоплення земель завдає шкоди майже 12 тис. архітектурно–історичних пам’яток України. Площа підтоплених земель сільськогосподарського призначення становить близько 118 тис. га.

Починаючи з 1982 р., площа підтоплення у Херсонській та Миколаївській областях зросла у 17 разів, а в Одеській – у 10 разів, Дніпропетровській – 7 разів. За період з 1982 р. по 2004 р. середньорічний розмір збільшення площі підтоплення території Херсонської області склав 450 км^2 за кожен рік.

Значною мірою порушено унікальну українську екосистему, що створювалося протягом сотень і тисяч років. Ця система мала потужні можливості для самоочищення, формування запасів питної води, нейтралізації всіляких стоків і забруднень.

При чому, і це найстрашніше, цей процес набуває в окремих випадках незворотних процесів.

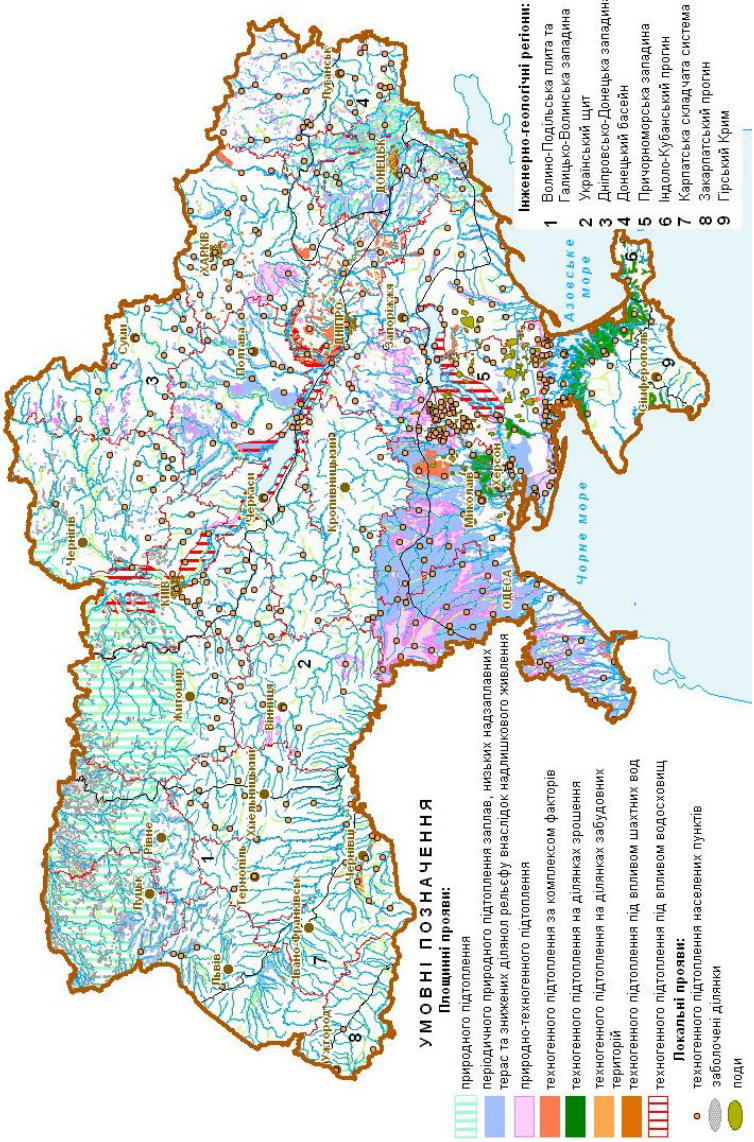


Рис. 22. Зони підтоплення території України (geoinf.kiev.ua)

Основні чинники підтоплення земель в Україні давно визначені, їх поділяють на глобальні, регіональні й місцеві чи об'єктові. Однак, якщо глобальні в значній мірі залежать від природної циклічність періодів підвищеної та низької водності та глобальних змін клімату, то вже регіональні мають виключно техногенне походження. Основними природними умовами, в яких формується процес підтоплення, є наявність слабо проникних грунтів і їх прошарків, розташування водотривких шарів відносно близько до поверхні землі, слабка тренованість територій. На міських територіях до природних чинників додаються потужний техногенний вплив, який призводить до активізації процесів підтоплення. Серед них є такі, що за нинішніх умов не можуть бути вирішені у коротко- чи середньостроковій перспективі.

Це, зокрема стосується розташування населених пунктів у низинах, на днищах і схилах балок, а також у приморській смузі, які є зонами розвантаження підземного стоку та акумуляції поверхневих вод; або порушення природного стоку та зниження природної дренованості території внаслідок зарегульованості великих та частини середніх річок водосховищами та ставками (всього 1,1 та 28,5 тис. відповідно), що спричиняє підпір рівня ґрунтових вод і зниження природної дренованості території.

Більшість місцевих (об’єктових) чинників підтоплення теж має техногенне походження:

- незадовільне функціонування чи повна відсутність у населених пунктах зливової мережі, інших систем водовідведення;
- значні втрати в системах водопостачання та водовідведення (до 20–40 % загального обсягу водокористування) у населених пунктах з централізованим водопостачанням;
- украй незадовільний стан експлуатації більшості захисних дренажних систем;
- недостатньо обґрунтоване розміщенням шламонакопичувачів, водосховищ, недосконалість технологій ведення гірничодобувних робіт, перекриття природного стоку внаслідок спорудження інженерних комунікацій та приватних будівель.

Важливу роль у запобіганні економічних та екологічних збитків від підтоплення відіграє їхній прогноз.

Зони підтоплення території України зображено на рис. 22.

9.2 Методи прогнозування підтоплення на попередніх стадіях проєктування

Для прогнозування техногенного підтоплення використовуються, головно, методи якісного прогнозу. Прогнозування виконується перш за усе на урбанізованих територіях де з одного боку техногенний вплив на підземні води найбільший, а з іншого підтоплення у містах завдає великої шкоди. До найпоширеніших методів відносяться метод аналогій та методи аналізу геолого-гідрогеологічної ситуації та техногенного впливу.

Метод аналогій ґрунтується на накопиченні і аналізі фактичного матеріалу по підтопленню конкретних територій і перенесенням у майбутньому цих даних на прогнозовані об'єкти. Для можливості такого перенесення геолого-гідрогеологічні умови і характер техногенного впливу на грунтові води на обидвох територіях мають бути однакові або близькі між собою. Даний метод використовується, головно, у тих випадках, коли повністю виключається можливість розробки прогнозів підтоплення територій на основі точніших методів. Але у багатьох випадках точні прогнози і непотрібні, достатньою є лише наближена оцінка можливості підтоплення території з метою постановки спеціальних гідрогеологічних досліджень. У таких випадках метод аналогій виявляється задовільним.

Таблиця 10

Поділ об'єктів галузей промисловості за питомими витратами води

Група підприємства	**Питома витрата води, м^3/ добу на 1 га**	**Галузі промисловості, характер забудови**
А	15 000-80 000 і більше	Целюлозо-паперова, енергетична, металургійна
Б	15 000-5 000	Хімічна, нафтохімічна, гірничозбагачувальна
В	5000-500	Машинобудівна, трубопрокатна,
Г	500-50	Текстильна, легка, харчова будматеріалів
Д	< 50	Борошномельна, житлова забудова

Суть другого методу полягає у спряженому аналізі геолого-гідрогеологічної інформації і прогнозованого техногенного впливу. Прогнозування відбувається на основі даних про геологічну будову ділянок майбутнього будівництва і характеру та інтенсивності техногенного навантаження. Головним чинником техногенного навантаження є питомі витрати води у м ^{3}/ добу на 1 га. За цими ознаками виділяється низка об'єктів (див. табл. 10)

Таблиця 11

Характеристики літологічних розрізів типових гідрологічних зон

Номер схеми	Типові літологічні розрізи	Товщина шару, м	Глибина залягання підземних вод, м	Гідрологічні зони
1	Шар-1 – лесові супіски і суглинки просідні, фільтраційно анізотропні Шар-2 – водотриви, глини, аргіліти, вапняки	До 25	15–25	Зона мінливого, зволоження (Степовий Крим, Азово-Чорноморська смуга)
2	Шар-1 – суглинки, супіски, піски флювіогляціальні Шар-2 – (відносний водотрив) глини і суглинки моренні	До 15	До 10	Зона надмірного зволоження
3	Шар- 1- супіски і суглинки поривні, малопотужні Шар-2 – водотриви (глини набрякаючі)	1 -5	Більше 15	Зона недостатнього та частково змінного зволоження
4	Шар-1 – суглинки, супіски, пилуваті та грубозернисті піски, галечники Шар-2 – (водотрви)скельні породи	До 10	5–10	Зона мінливого зволоження
5	Шар-1– суглинки і супіски просідні і засолені (гіпс) Шар-2 –відносний водотрив	До 15	15–20	Зони недостатнього зволоження
6	Шар-1 – суглинки лесовидні просідні (шар великої потужності)	Більше 15 м	30–50	Зона недостатнього зволоження

Таблиця 12

Характеристики типів підтоплюваності територій промислових підприємств

<table>
<tr><th rowspan="2">Тип підтоплюваності</th><th rowspan="2">Схема природних умов</th><th rowspan="2">Група підприємств за кількістю води, що використовується</th><th colspan="4">Швидкість підйому рівня грунтових вод</th></tr>
<tr><th>За перших 10 років, м/ рік</th><th>Від 10 до 15 років. м/рік</th><th>Від 15 до 20 років, м/рік.</th><th>Від 20 до 25 років, м/рік</th></tr>
<tr><td rowspan="3">I</td><td>1</td><td>А,Б,В</td><td rowspan="3">0,5 -1 і більше</td><td colspan="3">0,3-0,6</td></tr>
<tr><td>2</td><td>А,Б</td><td rowspan="2">0,25-0,5</td><td rowspan="2">0,2-0,4</td><td rowspan="2">0,15-0,30</td></tr>
<tr><td>3</td><td>А,Б</td></tr>
<tr><td rowspan="4">II</td><td>1</td><td>Г,А</td><td rowspan="4">0,3-0,5</td><td rowspan="2">0,1-0,2</td><td rowspan="2">0,1-0,15</td><td rowspan="2">0,08-0,13</td></tr>
<tr><td>2</td><td>В</td></tr>
<tr><td>4</td><td>А,Б</td><td colspan="3" rowspan="2">0,18-0,30</td></tr>
<tr><td>5</td><td>А,Б</td></tr>
<tr><td rowspan="6">III</td><td>1</td><td>$Д_3$</td><td rowspan="6">0,1-0,3</td><td rowspan="3">0,03-0,1</td><td rowspan="3">0,025-0,08</td><td rowspan="3">0,02-0,06</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Г,$Д_1$,$Д_2$,$Д_3$</td></tr>
<tr><td>3</td><td>В,Г,Г,$Д_1$,$Д_2$,$Д_3$</td></tr>
<tr><td>4</td><td>В,Г,$Д_1$</td><td colspan="3" rowspan="3">0,06-0,18</td></tr>
<tr><td>5</td><td>В</td></tr>
<tr><td>6</td><td>А,Б</td></tr>
<tr><td rowspan="3">IV</td><td>4</td><td>$Д_2$,$Д_3$</td><td rowspan="3">0,1</td><td>0,025</td><td>0,02</td><td>0,01</td></tr>
<tr><td>5</td><td>Г,$Д_1$,$Д_2$,$Д_3$</td><td colspan="3">0,06</td></tr>
<tr><td>6</td><td>В,Г,$Д_1$,$Д_2$,$Д_3$</td><td colspan="3"></td></tr>
</table>

Примітка: Для підприємств з малими витратами води (Група Д) врахована відносна площа поширення грунтів з порушеною структурою, які характеризуються вищою фільтраційною здатністю (відносна площа планувальної підсипки), і виділені підгруп: $Д_1$ – території з відносною площею підсипки від 25 до 50%, $Д_2$, - від 10 до 25%, $Д_3$ – від 0 до 10%.

Геологічну будову характеризують типові літологічні розрізи (геолого-літологічні комплекси), які різною мірою піддаються підтопленню. Найбільш підтоплюваними є території, складені маловодопроникними, фільтраційно анізотропними, просідаючими грунтами (лесами), а також забудовані спорудами або підприємствами, які використовують велику кількість води. Найменш підтоплюва-

ними є території з глибоким заляганням грунтових вод, складені добре водопроникним породами і забудовані підприємствами з сухим технологічним процесом , або житловою забудовою. Типові літологічні розрізи наведені у табл. 11.

У залежності від поєднання схеми природних умов з групою підприємств за кількістю води, яка використовується усі території промислових підприємств, за потенційною підтоплюваністю розділяють на чотири типи (див. табл. 12). За таблицею для різних природних і техногенних умов визначаються можливі (найвірогідніші) швидкості підйому рівнів грунтових вод.

Найбільшу вірогідність значного підвищення рівня підземних вод чи утворення нового техногенного водоносного горизонту слід очікувати на територіях I і II типів. Наприклад, на території з близьким заляганням водотриву, збудованої просідаючими грунтами, за відсутності природних дрен і з проєктованою забудовою підприємствами хімічної, металургійної або енергетичної промисловості (Теплоелектростанцій), які використовують велику кількість) води. При цьому слід враховувати існуюче чи очікуване зниження рівня грунтових вод під впливом водозабірних споруд чи дренажів.

За ***критичний рівень підтоплення*** підземними водами приймається таке його положення, на ділянці, що підлягає забудові і в заданий момент часу, за якого виникають:

а) підтоплення заглиблених приміщень і комунікацій та затоплення котлованів і траншей при будівництві;

б) обводнення грунтів в активній зоні, яке призводить до зменшення міцнісних і деформативних властивостей грунтів, осідання, просідання, набрякання грунтів;

в) інтенсифікації існуючих чи виникнення нових інженерно-геологічних процесів (зсуви, карст, суфозія);

г) корозії металу і бетону підземних споруд і конструкцій;

д) засолення грунтів (у тому числі і вторинне), яке викликає загибель рослин, погіршення санітарних умов, яке потребує підтримки потрібної вологості в підвальних і заглиблених приміщеннях.

9.3. Методи прогнозування підтоплення на заключних стадіях проєктування

Прогнозування підтоплення на заключних стадіях проєктування здійснюється двома основними методами: аналітичним і моделюванням на аналогових та цифрових обчислювальних машинах, а також експериментально.

Метод математичного моделювання грунтується на вирішенні диференціальних рівнянь динаміки підземних вод на забудованих територіях і тих, що мають забудовуватися з використанням АОМ і ЕОМ. Цей метод може вирішувати найскладніші гідрогеологічні завдання наприклад при багатошаровій будові товщ і складних формах границь водоносних пластів. Моделювання проводиться на основі детального вивчення геолого-гідрогеологічних умов та фільтраційних властивостей грунтів.

Використання методів математичного моделювання потребує відповідного узагальнення, представлення оцінки гідрогеологічних умов і техногенних чинників у вигляді розрахункової геофільтраційної схеми. Схема включає в себе уявлення про форму і розміри досліджуваної області фільтрації, геоморфологічної і геологічної будови, фільтраційних властивостей водоносних горизонтів, техногенних чинників, внутрішніх і зовнішніх граничних умов і є гідрогеологічною основою математичного моделювання.

У зв'язку з цим, методологія прогнозу гідрогеологічних умов при підтопленні міських територій включає в себе крім основних положень методології оцінки природних умов і техногенних чинників положень, пов'язаних з їх модельною апроксимацією і безпосереднім відтворенням на АВМ и ЕОМ процесу підтоплення. До цих положень належать:

а) встановлення розрахункової схеми модельованої області фільтрації;
б) математичний опис модельованого фільтраційного процесу у відповідності з прийнятою розрахунковою схемою;
в) побудова моделі досліджуваної області фільтрації;
г) перерахунок моделі досліджуваної області фільтрації при моделюванні на АОМ;
д) перенесення моделі досліджуваної області фільтрації на АОМ;

е) встановлення функціональної надійності розрахункової схеми модельованої області фільтрації;
є) відтворення процесу підтоплення досліджуваної області фільтрації на ЕОМ в стаціонарній постановці;
ж) відтворення процесу підтоплення досліджуваної області фільтрації на ЕОМ в нестаціонарній постановці з метою побудови перерахованих вище імітаційних моделей.

Серйозним недоліком цього методу є, те що вирішенню завдань прогнозу передує доволі тривалий етап збірки моделі і розробки програмного забезпечення для ЕОМ.

Аналітичні методи прогнозу підтоплення не поступаються, а часто і перевершують за точністю метод моделювання. Точність аналітичних методів залежить лише від достовірності висхідної гідрогеологічної інформації і точності вирішення диференціальних рівнянь фільтрації.

Тому, головним кількісним методом прогнозування підтоплення на заключних стадіях проєктування є аналітичний. Хоча для отримання більш диференційованих у просторі даних про перебіг процесів підтоплення можуть використовуватися і методи моделювання.

Використанню вказаних методів передують детальні інженерно-геологічні та гідрогеологічні дослідження схематизація основних чинників, які впливають на розвиток підтоплення. Загалом ці методи є дуже складними у виконанні і використовуються лише для прогнозу підтоплення дуже відповідальних господарських об’єктів (атомних, теплових електростанцій, металургійних та хімічних підприємств тощо).

Тема 10
МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРУНТІВ

10.1. Механічні властивості грунтів як основа забезпечення стійкості і функціональної придатності будівель і споруд

Під механічими властивостями слід розуміти здатність гірських порід чинити опір зовнішньому впливу. Тобто механічні влас-

тивості гірських порід характеризуються їхньою деформативністю та міцністю під впливом зовнішніх зусиль (навантажень від будівель і споруд). Зокрема, за величиною міцності визначаються допустимі навантаження від споруд, а деформативні властивості дозволяють визначити величини осідань цих споруд при визначеному навантаженні. Механічні властивості залежать від характеру породи. Розрізняють три групи порід: з жорсткими структурними зв'язками – тверді (скельні та напівскельні), зв'язні – глинисті та незв'язні – піщані та великоуламкові (галечники, гравій тощо). Механічні властивості основних груп порід різні.

Властивість гірської породи змінювати під навантаженням форму і об'єм називається **деформацією**. У залежності від характеру структурних зав'язків деформації бувають пружними (скельні грунти) і пластичними (глинисті та піщані).

Характер деформацій твердих – скельних порід в силу жорстких зв'язків між зернами подібний за механічними властивостями з деформаціями звичайних твердих тіл. Вони, як відомо, підпорядковуються закону Гука – закону пропорційності між діючими навантаженнями і деформацією:

$$a = Ee \text{ кг/см}^2,$$

де а – напруга, що передається на тіло;
е – відносна деформація тіла;
Е – модуль пружності (кг/см ^{2}, МПа).

Модуль пружності дорівнює напруженню в кілограмах на квадратний сантиметр, яке викликає відносну деформацію, що дорівнює одиниці.

Піщані і глинисті грунти характеризуються модулем загальної деформації, який визначається за формулою:

$$E = 1 + e/a,$$

де Е – модуль загальної деформації (кг/см^2, МПа);
е – коефіцієнт пористості породи;
а – коефіцієнт ущільнення, який визначається за формулою:

$$a = e_n - e_0 / p_n - p_0,$$

де e_n – коефіцієнт пористості породи при вертикальному навантаженні p_n;
e_0 – коефіцієнт пористості породи у природному заляганні;

p_n – максимальне вертикальне навантаження;
p_0 – мінімальне вертикальне навантаження.

Міцність породи з жорсткими структурними зв'язками характеризується опором на одновісне стиснення і визначається за формулою:

$$R = P/F;$$

де R – опір одновісному стисненню (кг/см ^{2}, МПа)

P – максимальне навантаження на взірець породи (кгс/см^2, МПа), при якому вона руйнується;
F – площа взірця (см^2).

Міцність піщано-глинистих порід характеризуються кутом внутрішнього тертя і питомим зчепленням. Залежність між вертикальним і стинаючим навантаженням виражається рівнянням прямої лінії (законом Кулона-Мора)

$$\tau = P \operatorname{tg} \phi + C$$

де τ – стинаюче навантаження (кг/см ^{2});
P – вертикальне навантаження (кг/см ^{2});
tg ϕ – тангенс кута нахилу прямої залежності вертикального і стинаючого навантажень;
C – питоме зчеплення (кг/см^2) (його величина визначається характером та міцністю структурних зв'язків).

Найчастіше прогнозні оцінки розробляються при проведенні інженерно-геологічних розвідувань у районах поширення грунтів із специфічними властивостями, зокрема лесів, набрякаючих, засолених, структурно нестійких та слабких грунтів. Названі грунти суттєво змінюють свої фізико-механічні властивості під впливом як природних, так і техногенних чинників. Для прийняття оптимальних проєктних рішень, при прогнозуванні отримуються показники величини просідання при різних навантаженнях, прогнозується за якої природної вологості починається процес просідання, при якому вертикальному навантаженні розпочинається цей процес і т. д. Прогнозні значення міцнісних характеристик використовуються при розрахунку стійкості схилів, тобто при прогнозуванні зсувів.

У моделюванні механічних властивостей грунтів використовується, головно, два види моделювання: фізичне та математичне.

Суть **фізичного моделювання** полягає у дослідженні поведінки взірців грунту під впливом тих чи інших зовнішніх чинників

(зволоження, вібрації, вплив хімічних розчинів тощо). При моделюванні поведінки скельних порід, влаштовуються штучні тріщини, без наповнювача чи з ним. Можуть використовуватися різні літологічні його типи з різним станом (зі зволоженням чи без нього). За необхідності моделюються різні траєкторії вертикального та дотичного навантаження на грунт. При моделюванні набрякання підбираються умови, які максимально наближені до умов роботи грунту під фундаментами.

Суть **математичного моделювання** полягає у знаходженні кореляційних зв'язків між фізичними та механічними властивостями грунтів з використанням методів парної чи множинної кореляції. Наприклад, між вологістю і щільністю грунту та його деформаційними (модуль деформації) і міцнісними (кут внутрішнього тертя і питоме зчеплення) властивостями, між показником консистенції глинистих порід і механічними властивостями і т. і. Загальною вимогою до поведінки моделі є її максимальне наближення до реальних умов взаємодії грунту та інженерної споруди.

10.2. Методи прогнозування механічних властивостей грунтів на попередніх стадіях проєктування

Необхідність прогнозування показників механічних властивостей виникає майже постійно. Фізико-механічні властивості, як відомо великою мірою залежать від фізико-географічних умов їхнього формування, діагенетичного перетворення та віку. Тому орієнтовні їхні значення можна отримати на основі аналізу умов їхнього формування.

Найпоширенішими методами прогнозування є метод експертних оцінок, геологічних аналогій та математичного моделювання.

Метод експертних оцінок. Даний метод використовують при прогнозуванні показників фізико-механічних властивостей грунтів за відсутності чи недостатньому об'ємі матеріалів дослідження порід. За таких умов характеристики їхніх властивостей визначаються спеціалістом який відіграє роль провідного експерта, враховуючи його знання, досвід та інтуїцію. У багатьох випадках це завдання виконується колективом експертів.

Метод геологічних аналогій. В основі методу геологічних аналогій лежить закон успадкованості. З гідно цього закону, склад і

фізико-механічні властивості повністю визначаються історією тектонічного розвитку даного регіону, яка у свою чергу зумовлює геологічну будову та гідрогеологічні умови, рельєф і певною мовою клімат. Звідси випливає, що породи геологічна історія яких однакова, мають одні й ті ж показники складу і властивостей. Наприклад, леси, еолові піски тощо, які формувалися в сухих-холодних, чи сухих спекотних умовах.

Кожний генетичний тип характеризується притаманним йому набором показників складу і властивостей, які визначають їхні властивості. Важливим чинником у багатьох випадках є умови залягання. Характер залягання порід на схилах визначають умови їхнього дренажу і вологість, щільність і залежні від цього показники міцності і деформативності. Крім того, особливості залягання визначають глибину проникнення агентів звітрювання. Дуже важливими прогностичними ознаками, які використовується в методі геологічних аналогій, є речовинний (мінералогічний склад), їхні структурно-текстурні особливості, які виступають в якості підґрунтя показників фізичних і механічних властивостей.

У свою чергу, показники фізичних властивостей також слугують для прогнозу механічних властивостей.

Крім того, надзвичайно важливими є прогнозування гідрогеологічних властивостей, адже властивості грунтів суттєво залежать від ступеню зволоження грунтів.

Метод математичного моделювання (вірогіднісно-статистичний метод**)**. Даний метод використовується головним чином для прогнозу показників одних властивостей, експериментальне вивчення яких пов’язано з технічними труднощами, за іншими, які легко визначаються. Такий прогноз виконується за допомогою кореляційно-регресійного аналізу, по залежностях, які встановлюються на основі дослідів, в ході яких паралельно отримують одні та інші показники. При цьому регресійна модель може вміщувати одну або декількох змінних. В останньому випадку для знаходження коефіцієнтів регресійного рівняння слід проводити складніші обчислення, але оцінки точності прогнозованих величин будуть значно точнішими. Регресійні рівняння можуть пов’язувати фізичні та механічні властивості грунтів. Пошук кореляційних зв’язків може проводитися лише для грунтів однієї генези і віку.

10.3. Методи прогнозування механічних властивостей грунтів на заключних стадіях проєктування

На заключних стадіях проєктування найчастіше використовується **метод моделювання**. Цей метод використовується при прогнозуванні фізико-механічних властивостей з використанням результатів лабораторних і польових експериментів. Лабораторне моделювання виконують на зразках, які відбирають практично з будь якої точки підґрунтя фундаментів будівлі. Моделювання проводять таким чином, щоб відобразити роботу грунту при різноманітних зовнішніх впливах. У польових умовах моделювання проводять в грунтових масивах, у яких відібрати зразки породи непорушеної структури практично неможливо. При польових експериментах об'єм породи, яка випробовується набагато більший ніж при лабораторних випробуваннях, натомість значно менший ніж масив, що взаємодіє з фундаментами. Для отримання результатів, що максимально відображають поведінку об'єкта прогнозу необхідно, щоб виконувалася подібність фізико-механічних властивостей об'єкта і моделі і зовнішнього впливу на них.

При перенесенні даних, отриманих при лабораторних і польових випробуваннях обов'язково має враховуватися масштабний ефект. Чим більші розміри об'єкту прогнозування тим точніший прогноз.

Якщо характеристики міцності та реформованості розраховані за результатами спостережень за осіданнями, чи розрахунками зсувів то при співпадінні названих критеріїв подібності ці характеристики можуть бути використані як аналоги.

Метод натурних аналогій. При прогнозуванні показників властивостей вказаним методом в якості аналогів можуть слугувати уже вивчені породи, на яких були побудовані споруди, або залучені у зсув чи обвал. Якщо характеристики міцності та реформованості розраховані за результатами спостережень за осіданнями, чи розрахунками зсувів то при співпадінні названих критеріїв подібності ці характеристики можуть бути використані як аналоги.

Метод розрахункових аналогій. Цей метод використовують при прогнозуванні фізичних, водних і механічних властивостей порід. Найчастіше виконується розрахунок щільності за щільністю сухого грунту і вологості, що доцільно використовувати при ступе-

ню наповнення пор водою більше 90%. Є багато формул, які дозволяють вирахувати коефіцієнт фільтрації пухких порід за показником гранулометричного складу і фізичних властивостей. Але при прогнозуванні показників водопроникності розрахунковими методами слід мати на увазі, що отримані значення коефіцієнта фільтрації часто істотно відрізняються від дійсних через складність явищ, які відбуваються під час руху води в породах.

Тема 11
КОМП'ЮТЕРНЕ ГІДРОГЕОЛОГІЧНЕ КАРТОГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ

11.1. Принципи цифрового картографічного моделювання

Стрімке зростання швидкості обчислень і можливостей обробки великих обсягів даних (а також збільшення доступності обчислювальної потужності у вигляді ПК) дозволило розробити нові методи геотехнічного аналізу, зокрема використовуючи картографічне моделювання.

Картографічне моделювання – процес створення, аналізу та перетворення карт як моделей об'єктів, явищ і процесів із метою отримання систематизованих та нових знань про реальний світ. Картографічні твори дозволяють візуалізувати різноманітні проєкти щодо ведення різних видів господарської діяльності з урахуванням оцінки впливу на довкілля.

Наприкінці XX ст карту почали розглядати як просторову, математично визначену і генералізовану образно-знакову модель дійсності. Сьогодні за способом створення й представлення графічної інформації карти поділяють на аналогові, цифрові і електронні образно-знакові моделі.

Сучасні цифрові методи збору, опрацювання і зберігання інформації дозволяють автоматизовувати процес створення картографічного зображення. Так у автоматизованому режимі можна здійснювати прогнозування небезпечних геодинамічних процесів і явищ за заданими параметрами із відображенням на відповідних цифрових картографічних моделях. Зокрема цьому сприяє використання географічних інформаційних систем (GIS, ГІС).

Геоінформаційне картографування – галузь картографії, що займається автоматизованим складанням і використанням карт на основі геоінформаційних технологій і баз географічних (геологічних, екологічних, гідрогеологічних та ін.) знань.

Географічна інформаційна система (GIS, ГІС) – система, що забезпечує збирання, зберігання, опрацювання, доступ, відображення й поширення просторово координованих даних.

У ГІС моделі просторових об'єктів визначають процес перетворення об'єктів реального світу у набір дискретних об'єктів; способи опису просторових об'єктів і організації просторових даних у комп'ютерних середовищах – побудові цифрових моделей просторових об'єктів, які засновані на поняттях геометрії та просторової розмірності.

Моделі просторових даних – цифрові подання даних у базах геоданих, що відбивають логічні правила формалізованого цифрового опису об'єктів (векторного, растрового, пошарового).

Переваги використання **GIS при побудові картографічних моделей**

1. висока якість виконаних робіт (графічних матеріалів),
2. економія затрат часу та фінансів на опрацювання матеріалів,
3. підвищення швидкості та гнучкості збору, зберігання, пошуку, аналізу, комунікації та презентації даних.

Сьогодні продукти GIS представлені такими програмними пакетами: AutoCAD MAP, Autodesk World, MapGuide (Autodesk); ArcGIS (ESRI), MapInfo Pro (Precisese), GeoMedia (Intergraph Corp.), Digitals (Геосистема), K-MINE (НВП –КРИВБАСАКАДЕМІНВЕСТ) тощо.

Чільне місце займають GIS і під час здійснення гідрогеологічного і інженерно-геологічного проєктування, оскільки дозволяють візуалізувати, моделювати і прогнозувати у масштабі розвиток небезпечних екзогенних і ендогенних геологічних процесів, площі поширення горизонтів підземних вод, площі ризику забруднення водоносних горизонтів, складових геологічного та суміжних середовищ, тощо.

Традиційно візуалізація гідрогеологічної і інженерно-геологічної інформації здійснювалася у формі карт, картосхем, планів, розрізів тощо. Функціональні можливості ГІС дозволяють користувачеві створювати нову інформацію, комбінуючи та маніпу-

люючи існуючими даними. Багато продуктів ГІС дозволяють здійснювати візуалізацію процесів (явищ) у кількох вимірах (2D-,3D-моделювання). Зокрема, у гідрогеології і інженерній геології 2D-моделювання за допомогою ГІС займає усталену позицію як корисний інструмент для зберігання, обробки та візуалізації геотехнічних даних із геоприв'язкою.

Перспективи використання ГІС порівняно із класичним картографуванням полягають швидкій візуалізації, широких можливостях використання різних масштабів, маніпулювання значними обсягами просторової, у тім числі гідрогеологічної чи інженерно-геологічної інформації.

Однак, на точність моделювання впливає достовірність самих вихідних даних, які зібрані під час польових гідрогеологічних і інженерно-геологічних дослідженнях та у результаті лабораторних аналізів.

Складання карт передбачає визначення їхнього змісту, вибору умовних знаків і способів картографічного зображення. Зміст проєктованої карти визначений її призначенням, тематикою, масштабом і вимогами основних користувачів.

Проєктування змісту карти передбачає таке:

1) розроблення науково-технічного проєкту;
2) вибір переліку елементів і об'єктів, їхню класифікацію;
3) розроблення легенди карти;
4) вибір способів картографічного зображення.

Предметом дослідження у сфері гідрогеологічного і інженерно-геологічного картографування є картографічне представлення й моделювання гідрогеологічних і інженерно-геологічних умов певної території.

11.2. Основні положення гідрогеологічного картування як методу моделювання

Гідрогеологічна карта – це картографічна модель узагальненої інформації щодо гідрогеологічних умов досліджуваної території. На ній вказано умови залягання, склад водовмісних порід, їхнє стратиграфічне положення, особливості живлення і розвантаження, напрямки руху, хімічний склад підземних вод тощо. Для складання гідрогеологічних карт застосовують матеріали польових дослі-

джень, спеціальних вишукувань, гідрогеологічних та інших знімань, опрацьовані результати спостережень, що їх отримують за даними стаціонарних моніторингових свердловин, колодязів, місць розвантаження водоносних горизонтів.

При використанні GIS для побудови гідрогеологічних та комплексних карт можуть використовувати окремий гідрогеологічний інформаційний шар (наприклад, шар «підземні води»).

Метою розробки цього шару є представлення інформації про глибину та коливання залягання підземних вод і можливості господарського забезпечення підземними водами. Шар гідрогеологічної інформації, залежно від потреб, може складатися з кількох інформаційних тем, що стосуються: порядку або глибини залягання підземних вод (гідроізогіпси, гідроізобати тощо) з урахуванням максимального і мінімального станів або амплітуди коливань, наявність придатних для використання горизонтів з урахуванням меж, якості води, літології водоносного горизонту та потенційної ефективності типової свердловини тощо.

Гідрогеологічна зйомка – комплексне польове дослідження гідрогеологічних умов з метою їх картування. За її допомогою обґрунтовують вибір ділянки водозабору й виявляють запаси підземних вод, дають оцінку гідрогеологічних умов території водоймищ, басейнів і ін., вивчають загальні гідрогеологічні умови району тощо.

Найбільш поширеною є модель **зведеної гідрогеологічної карти**, яка ґрунтується на матеріалах чотирьох карт: карти фактичного матеріалу, карти основних водоносних горизонтів, карти водоносності порід дочетвертинного віку і карти водоносності четвертинних відкладів.

На *карті фактичного матеріалу* вказують пункти відбору проб води (свердловини, колодязі, джерела). Біля кожного водопункту ліворуч записується його номер, праворуч – глибина до рівня води і позначка статичного рівня.

Карта основних водоносних горизонтів виділяють контури їхнього поширення, вказують літологічний склад і опорні гідрогеологічні свердловини.

Карти водоносності порід дочетвертинного і четвертинного віку вказують гідрогеологічні райони, вік, літологічний склад і водоносність порід, позначають опорні свердловини, колодязі, джере-

ла. Вік гірських порід зображають кольорами, що відповідають кольорам геологічної карти, а літологічний склад порід – умовними позначками чорного кольору.

Гідрогеологічні райони, що характеризують розподіл певних водоносних горизонтів на території досліджень, глибину, умови їхнього залягання, водоносність порід, хімічний склад підземних вод і інші гідрогеологічні характеристики, оконтурюють потовщеними лініями з цифровими позначеннями району.

На гідрогеологічній карті позначають розвідані родовища питних підземних вод, ділянки зниження рівнів підземних вод (т.зв. депресійні ділянки), райони їх техногенного забруднення.

Спеціальні гідрогеологічні карти виконують з певною метою. Їх зміст залежить від мети досліджень. Це можуть бути гідродинамічні, гідрогеохімічні, карти, карти запасів і ресурсів підземних вод тощо. Карти доповнюють пояснювальною запискою.

Карти гідроізогіпс складають у масштабах від 1 : 10 000 до 1 : 200 000 відповідно до характеру і стадії гідрогеологічних досліджень. Перетин гідроізогіпс вибирають залежної від прийнятого масштабу карти, густоти пунктів спостережень за рівнем ґрунтових вод, уклону їхньої поверхні. Звичайно беруть перетини 0,25; 0,5; 1,0; 2,0 і 5,0 м.

За картою гідроізогіпс вирішують важливі практичні завдання, серед яких такі:

- проєктування водопостачання на базі ґрунтових вод,
- розроблення системи осушувальних заходів,
- вибір ділянок під промислові чи цивільні споруди тощо

Для побудови карти гідроізогіпс у ряді водопунктів на площі поширення водоносного горизонту встановлюють глибини залягання поверхні ґрунтових вод шляхом безпосереднього заміру. Як водопункти можуть бути використані свердловини, шурфи, колодязі, джерела і водомірні пости на річках.

Оскільки рівень ґрунтових вод постійно змінюється під впливом різних природних і штучних факторів, то карту гідроізогіпс можна складати тільки за результатами одночасних чи близьких за часом (один-два дні) вимірів. Якщо по свердловинах ділянки проводилися тривалі спостереження за рівнем ґрунтових вод, можна скласти кілька карт гідроізогіпс за сезонами року (у межень, паводок тощо).

Карти гідроізобат. Крім карт гідроізогіпс для цілей проєктування і будівництва можуть складати карти глибин залягання поверхні ґрунтових вод. Залежно від необхідної точності глибину залягання рівня ґрунтових вод показують гідроізобатами через визначені інтервали глибин – 2-5, 5-10, частіше через 0,5 м (до глибини 10 м), що відповідає деяким загальним вимогам різних галузей народного господарства (закладення фундаментів, меліорація земель тощо).

Для одержання даних, необхідних для побудови гідроізобат, зазвичай бурять велику кількість спеціальних свердловин, рівномірно розташованих по всій території.

Карти гідроізоп'єз. Характер п`єзометричної поверхні водоносного горизонту на гідрогеологічних картах відображають п`єзоізогіпсами (гідроізоп'єзами). Карта гідроізоп'єз відображає форму п'єзометричної поверхні артезіанських вод. У зв'язку з цим за картою можна визначити важливі гідрогеологічні параметри водоносного пласта та особливості його будови. Форма п'єзометричного рівня артезіанських вод характеризується згущуванням або розрідженням гідроізоп'єз, що свідчить про зміну водопроникності порід водоносного пласта або його потужності.

Так, із зменшенням водопроникності порід вниз за течією п'єзометрична поверхня стає стрімкіша, а гідроізоп'єзи згущуються. І навпаки, якщо водопроникність порід збільшується за потоком, то п'єзометрична поверхня стає більш пологою – гідроізоп'єзи розріджуються.

Оцінка території за умовами водопостачання на базі підземних вод може бути дана за допомогою ***карти гідрогеологічного районування.***

Тема 12
КОМП'ЮТЕРНЕ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНЕ КАРТОГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ

12.1. Основні засади інженерно-геологічного картування як методу моделювання

Створення та використання інженерно-геологічних моделей має бути фундаментальною діяльністю для будь-якого геотехнічно-

го проєкту. Такі моделі є важливим інструментом для контролю якості проєктування та забезпечують прозорий спосіб ідентифікації специфічних для проєкту, критичних інженерно-геологічних проблем і параметрів. Моделі також повинні бути основою для розробки обсягу, методу та оцінки ефективності дослідження місця будівництва.

Інженерно-геологічна карта виступає у якості графічної моделі інженерно-геологічних умов літосфери, що відображає її просторові структури і властивості. Інженерно-геологічні картографічні моделі часто доповнюють інженерно-геологічними розрізами, стратиграфічними колонками, таблицями, в яких наводять дані лабораторних досліджень властивостей грунтів, а також хімічний склад і агресивні властивості підземних вод.

Інженерно-геологічне картування передбачає виконання графічного зображення найбільш важливих інженерно-геологічних факторів у межах території вивчення, які слід враховувати під час проєктування, будівництва, експлуатації конструкцій, споруд та здійснення інших інженерних заходів.

Отже, **інженерно-геологічні карти** – це вид геологічних карт, на яких показані всі найважливіші геологічні чинники, які враховують при плануванні, проєктуванні, будівництві, експлуатації споруд, проведенні інших інженерних заходів, а також при прогнозі змін стану геологічного середовища під впливом інженерно-господарської діяльності.

Здійсненню інженерно-геологічне картографування передує збір і графічна обробка всіх геологічних спостережень і явищ, що відбуваються в зоні надр, які можуть бути важливими з точки зору умов і потреб будівництва. Проведення картографування на відповідному рівні дає змогу здійснити первинну характеристику надр і спланувати подальші дослідження з урахуванням вибору відповідного методу та наявної ділянки.

Для складання інженерно-геологічних карт застосовують матеріали польових досліджень, спеціальних вишукувань, інженерно-геологічних, гідрогеологічних та інших знімань.

Аналіз інженерно-геологічних карт дозволяє зменшити обсяги вишукувань, найбільш повно ураховувати природні умови, вибирати економічні та технічно раціональні варіанти будівель і споруд, забезпечувати високу їх стійкість, надійну експлуатацію.

На інженерно-геологічних картах відображають такі параметри, як вік, генезу, умови залягання, склад, будова і фізико-механічні властивості грунтів і їх поширення, геоморфологічну характеристика території, гідрогеологічні умови, геодинамічні явища тощо. Карти супроводжуються розрізами, таблицями, текстовими поясненнями.

Основні **завдання інженерно-геологічного картування**:

- вивчення просторового розповсюдження інженерно-геологічних умов будівництва;
- звірка архівних матеріалів і топографічних карт з умовами, зафіксованими на місцевості;
- попередня геологічна характеристика зони надр, що дає можливість проєктування досліджень і вибору відповідних методів дослідження;
- виявлення та опис геодинамічних явищ і процесів;
- виявлення та опис природних та антропогенних впливів;
- перевірка доцільності проведення запланованих геологічних робіт з точки зору наявності земельної ділянки, розташування перешкод природного (круті схили, заболочені території, заліснення) та антропогенного (щільна забудова та інфраструктура, необхідність отримання дозволів на в'їзд на ділянку від власників земельних ділянок) характеру.

За призначенням інженерно-геологічні карти бувають загальні і спеціальні. Загальні карти є багатоцільовими і містять інженерно-геологічну інформацію, необхідну для обґрунтування різних видів інженерно-господарського освоєння територій, в той час як на спеціальних картах вказують окремі інженерно-геологічні характеристики.

Карти інженерно-геологічного районування характеризують інженерно-геологічні райони різного порядку. Загальні карти цього типу є багатоцільовими. Вони відображають інженерно-геологічні території різних рівнів та використовуються для планування та проєктування масових видів будівництва. На спеціальних картах вказують інженерно-геологічні райони з конкретними параметрами природних умов, сприятливими певних видів будівництва.

Карти інженерно-геологічних умов будують для усіх видів наземного будівництва. Використовують їх для загальної оцінки природних умов, у яких проєктується будівництво. На них відобра-

жають комплекс параметрів або окремі характеристики, які використовують для вибору методів вишукувань, проєктування, зведення та експлуатації інженерних споруд. Загальні карти цього типу відображають комплекс факторів, що визначають інженерно-геологічні умови територій та є картами багатоцільового призначення. Спеціальні карти відображають групи факторів інженерно-геологічних умов, які необхідні для проєктування певних видів будівництва (дорожнього, гідротехнічного, підземного тощо).

12.2. Карти інженерно-геологічного прогнозування

Прогнозні інженерно-геологічні карти відображають прогноз зміни інженерно-геологічних умов територій у ході їхнього господарського освоєння та експлуатації інженерних споруд. Вони можуть бути складені у двох варіантах: карти комплексного прогнозу; карти тематичного (спеціального) прогнозу.

Прогнозні карти поділяють на загальні и спеціальні. Загальні карти можуть відображати прогнозування змін геологічного середовища під впливом основних видів масового освоєння території. Спеціальні карти відображають прогнозовані зміни під впливом конкретного виду будівництва.

Детальність вивчення і масштаби цього виду карт визначають вимогами проєктування та складністю інженерно-геологічних умов. Залежно від цього виділяють інженерно-геологічні карти:

- *оглядові* – М 1 : 1000 000 і дрібніше, складають для загальної інженерно-геологічної характеристики великих регіонів;
- *дрібномасштабні* – М 1 : 500 000–1 : 100 000, використовують при плануванні конструкцій, споруд, передпроєктних робіт, при проєктуванні детальних інженерно-геологічних робіт, регіональних прогнозах;
- *середньомасштабні* – М 1 : 50 000–1 : 25 000), застосовують для оптимального вибору будівельних майданчиків, прийняття принципових проєктних рішень, складання локальних прогнозів;
- *великомасштабні* (М 1 : 10 000 і крупніше), використовують для інженерно-геологічного обґрунтування умов будівництва і експлуатації конкретних споруд (наприклад, шахт, кар’єрів тощо).

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Богобоящий В. В., Курбанов К. Р., Палій П. Б., Шмондій В. М.* Принципи моделювання та прогнозування в екології: Підручник. - Київ: Центр навчальної літератури, 2004. – 216 с.
2. *Вижва З.О.* Статистичне моделювання випадкових процесів та полів у науках про Землю. *Математичні моделі в природознавстві*: Навч. посіб. з дисц. «Математичні моделі в природознавстві» для студ. мех.-мат. ф.-ту / К.: ВГЛ «Обрії», 2007. – 160 с.
3. *Волошин П. К.* Курс лекцій з дисципліни "Гідрогеологічне ті інженерно-геологічне моделювання і прогнозування» (для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 101 – Екологія та 103 Науки про Землю) / П .К. Волошин. – Львів: Видав. Центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2020. – 46 с.
4. *Диняк О. В.* Навчальний посібник з навчальної дисципліни «Інженерно-геологічне моделювання» /О.В Диняк – Інтернет-ресурс Київського нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. – geol.univ.kiev.ua – 149 с.
5. *Заграй Я.А., Ковтенко О.М.* Моделювання і прогнозування довкілля. навч. посібник. – Київ, 2007. – 117 с.
6. *Іванік О.М., Назаренко М.В., Хоменко С.А.* Моделювання геологічних процесів і структур. Практикум. Київ: ВПЦ Київ. ун-ет;, 2014. – 119 с.
7. *Кілінська К. Й.* Основи географічного прогнозування. Навч – метод. Посібник. Чернівці: "Рута". 2003. – 486 с.
8. *Книш І.* Основи картографії : навч.-метод. посіб. (для студ. спеціальності 101 – "Екологія" та ін. природничих спец.) / І. Книш, Н. Кремінь – Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2021. – 236 с.
9. *Ковальчук П. І.* Моделювання і прогнозування стану навколишнього середовища: навч. посібник. / П. І. Ковальчук. – Київ : Либідь, 2003. – 208 с.
10. *Кошляков О.Є.* Гідрогеологічне моделювання : Підручник.- К.: ВПЦ " Київський університет", 2003. – 113 с.
11. *Мелконян Д. В.* Методичні основи застосування натурного моделювання у геологічних дослідженнях: метод. вказівки. Одесса: ПЕРСЕЙ, 2010. – 44 с.
12. *Рудаков Д. В.* Моделювання в гідрогеології [Текст]: навч. посіб. / Д. В. Рудаков. – Д.: Нац. гірничий університет, 2011. – 88 с.