УДК 624.131

<https://doi.org/10.31996/mru.2020.1.15-26>

Г. І. РУДЬКО, д-р геол.-мінерал. наук, д-р геогр. наук, д-р техн. наук, професор (Державна комісія України по запасах корисних копалин), office@dkz.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7752-4310>,

Є. О. ЯКОВЛЕВ, д-р техн. наук, головний науковий співробітник (Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України), yakovlev@niss.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6934-618x>

G. RUDKO, Doctor of Geology and Mineralogy, Doctor of Geographical Sciences, Doctor of Technical Sciences, professor (State Commission of Ukraine on Mineral Resources), office@dkz.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7752-4310>,

Ye. YAKOVLEV, Dr. of Technical Sciences (Institute of Telecommunications and Global Information Space, NAS of Ukraine), yakovlev@niss.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6934-618x>

СУЧАСНІ ЧИННИКИ РЕГІОНАЛЬНИХ ГРАНИЧНИХ ЗМІН ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВ УКРАЇНИ

MODERN FACTORIES OF REGIONAL ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS OF UKRAINE CHANGES

У статті наведено аналіз сучасних регіональних змін інженерно-геологічних умов України внаслідок комплексного впливу техногенезу і глобальних змін клімату. Крім того, уточнено вплив різноманітності структурно-геологічної будови й природно-техногенних змін складу небезпечних екзогенних геологічних процесів на динаміку перетворення інженерно-геологічних умов регіонів.

Насамперед це пов'язано з переважанням лесових і лесово-суглинистих порід у верхній частині геологічного розрізу (до 65 % території держави) під час формування техногенно-геологічних систем “техногенний об'єкт – геологічне середовище”. Регіональна зарегульованість поверхневого стоку (каскад водосховищ р. Дніпро, до 38 тис. ставків, мережа каналів) суттєво порушила водо-енергообмін порід верхньої зони геологічного середовища, активізувала регіональні зміни геомеханічних параметрів (міцність на стискання, зчеплення, кут скошу тощо), підвищила чутливість до чинників глобальних змін клімату (збільшення величини й нерівномірності опадів, потепління тощо). Автори виконали оцінку нових процесів змін інженерно-геологічних параметрів лесів і лесово-суглинистих порід унаслідок порушення їхнього фізико-хімічного стану, впливу сейсмонапружень, комплексних перетворень геологічного середовища промислово-міських агломерацій (ПМА).

Аналіз засвідчив, що зміни інженерно-геологічних умов найактивніше розвиваються в межах ПМА, що зумовлено комплексним впливом утрат води й тепла з інженерних мереж, змінами рельєфу, геодинамічними впливами транспорту, будівельних робіт. Максимальні зміни інженерно-геологічних умов спостерігаються в містах і селищах розвинених (“старих”) гірничодобувних районів під час затоплення шахт, осідання поверхні, підтоплення й затоплення великих площ.

Показано, що потрібна нова модель Державної інженерно-геологічної карти України, наукове обґрунтування гранично припустимих змін інженерно-геологічних параметрів геологічного середовища для різних техногенно-геологічних систем “техногенний об'єкт – геологічне середовище”.

Ключові слова: небезпечні екзогенні геологічні процеси, геостатистичні розрахунки, промислово-міські агломерації, ґрунтові води, лесові породи, техногенно-геологічні системи.

The article analyzes modern regional changes in engineering and geological conditions of Ukraine due to the complex impact of technogenesis and global climate changes. This is primarily due to the predominance of loess and loamy loess rocks in the upper part of the geological section (up to 65 % of the state) in the formation of technogenic-geological systems “technogenic object-geological environment”. Regional regulation of surface runoff (a cascade of reservoirs of the Dnieper River, up to 38000 pounds, network of channels) significantly disrupted the water-energy exchange of rocks within the upper zone of the geological environment, intensified regional changes of geomechanical parameters (compressive strength, adhesion, angle of a slope) to the factors of global climate change (increasing magnitude and uneven rainfall, warming etc.).

The authors evaluated the new processes of changes in engineering-geological parameters of loesses and loamy loess' rocks due to the disturbances of their mass-energy (water-heat) transfer, the influence of seismic stresses, complex transformations of the geological environment of industrial-urban agglomerations. The performed analysis showed that changes in engineering-geological conditions are most actively developing within the sites of industrial-urban agglomerations, which is caused by the complex action of water and heat losses from engineering networks, changes in relief, geodynamic impacts of transport and construction works. Maximum changes of engineering-geological conditions within towns and settlements are observed in the developed (“old”) mining areas during the flooding of mines, subsidence of surface.

It is shown that a new model of the State Engineering-Geological Map of Ukraine is needed, scientific substantiation of the maximum permissible changes of the engineering-geological parameters of the geological environment for different technogenic-geological systems “technogenic object-geological environment”.

Keywords: hazardous exogenous geological processes, geostatistical calculations, industrial-urban agglomerations, groundwater, loess rocks, technogenic-geological systems.

Вступ. Упродовж більшої частини ХХ ст. територія України характеризувалася активним техногенезом головних життєзабезпечувальних природних ресурсів – земельних, водних, мінерально-сировинних, біотичних, а також регіональним забрудненням приземної атмосфери. Крім цього, верхня зона геологічного середовища була провідним накопичувачем (“депо”) більшої частини (до 70–80 %) техноген-

них впливів, насамперед пов'язаних з надрокористуванням, будівництвом, зарегульованістю поверхневого стоку землекористуванням. Переважне поширення на території України лесових і лесово-суглинистих порід (>65 %) спричинило високу чутливість інженерно-геологічних параметрів геологічного середовища до техногенезу, а в останні десятиріччя – до чинників глобальних змін клімату (потепління, зростання кількості й нерівномірності опадів, висоти й частоти повеней і паводків), сейсмо-геофізичної активності.

1. Етапи вивчення регіональних інженерно-геологічних умов України

Територія України характеризується надзвичайною різноманітністю інженерно-геологічних умов, що зумовлює їхню чутливість до техногенних навантажень з розмаїтим комплексом механічних, фізико-хімічних та інших впливів. Водночас у XX ст. ступінь регіональної геологічної вивченості території був зумовлений переважно перспективами пошуків і розвідки корисних копалин, традиційних для кожного регіону. Тому вивчення інженерно-геологічних умов головним чином визначалося конкретними завданнями, пов'язаними з будівництвом та експлуатацією громадсько-промислових і гірничорудних об'єктів, обґрунтуванням генеральних планів розвитку промислово-міських агломерацій (ПМА). Ділянки для наземного будівництва останніх вибрано з огляду на запобігання негативному впливу фізико-геологічних та інженерно-геологічних процесів і явищ [3, 7, 9].

На сьогодні накопичено великий обсяг результатів різноцільових досліджень, виконаних задля вивчення регіональних і територіально-об'єктових змін інженерно-геологічних умов, зважаючи на вплив на їхнє формування структурно-тектонічних, літолого-петрографічних, геодинамічних, кліматичних і еколого-геологічних умов території, особливостей чинників природного розвитку та техногенної активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів (НЕГП).

Основоположниками вчення про інженерно-геологічні процеси є Г. Н. Каменський і Ф. П. Саваренський. Уперше в 1936 р. Г. Н. Каменський запропонував геологічні процеси, пов'язані з інженерною діяльністю людини (будівництво та експлуатація споруд), називати інженерно-геологічними. Пізніше в 1959 р. І. В. Попов, а в 1962 р. Н. В. Коломенський і П. Н. Панюков виділили природні та інженерно-геологічні процеси.

На сучасному етапі в практику регіональних оцінок граничних змін інженерно-геологічних параметрів геологічного середовища (ГС) запроваджені довготривалі спостереження, моделювання процесів масо(водо)-енергообміну, великий комплекс оцінок природних і техногенних змін параметрів напружено-деформованого стану (НДС), інженерно-сейсмо-геологічних і геодинамічних впливів сейсмічності. У ХХІ ст. отримали розвиток оцінки інженерно-геологічного складника еколого-геологічного ризику як інтегрального показника змін техногенно-геологічних систем (ТГС) “техогенний об'єкт – геологічне середовище” (В. Т. Трофимов, В. М. Шестопалов, М. Г. Демчишин, Е. Д. Кузьменко, П. В. Блінов, А. М. Марченко, О. О. Непашев, А. В. Лущик, М. І. Швирило, Г. І. Рудько, Є. А. Черкез, Є. О. Яковлев та ін.).

Завершене на початку 90-х років XX ст. регіональне інженерно-геологічне картування території України в масштабі 1:500 000, і вибіркове в найбільш екологічно напружених районах у масштабі 1:200 000–1:50 000, засвідчило стійку динаміку критичних змін ГС під впливом техногенезу в зонах впливу великих ТГС (території Донбасу, Карпатського регіону, Причорномор'я, Придніпров'я тощо), більшості ПМА (Харківська, Запорізька, Дніпропетровсько-Дніпро-дзержинська, Одеська, Київська та ін.) і регіонального поширення лесових і лесово-суглинистих порід (ЛСП).

2. Характеристика регіональних інженерно-геологічних умов території України

Сучасне регіональне інженерно-геологічне зонування України ґрунтується на схемі виділення областей, яку роз-

робив В. С. Пономар (9, зокрема 5 у південно-західній частині Східноєвропейської платформи і 4 – у межах альпійської складчастості рис. 1).

Виділення інженерно-геологічних областей визначене різницею морфоструктурних, структурно-геологічних, літолого-петрографічних, ландшафтно-кліматичних, гідрогеологічних особливостей території, а також розчленуванням рельєфу, кутами нахилу схилів, спрямованістю та амплітудою неотектонічних рухів. Вищезгадані особливості території зумовлюють спрямованість прояву й розвитку в межах кожної інженерно-геологічної області НЕГП природного й техногенного походження.

На сучасному етапі регіонального розвитку ГС та формування ТГС господарська діяльність людини вносить суттєві зміни в природні інженерно-геологічні умови території, перебіг геологічних процесів, зокрема НЕГП. Упродовж останніх десятиліть активна урбанізація території країни (до 1445 міст і селищ міського типу загальною площею до 19 тис. км²), створення потужних гірничодобувних, гідротехнічних, гідромеліоративних, агропромислових та інших технологічних комплексів, атомних і теплових електростанцій призвели до збільшення техногенних навантажень на верхню зону ГС та активізацію НЕГП у регіональному плані. На територіях з інтенсивним розвитком промисловості, великою густиною населення і зосередженням чималої кількості підприємств гірничої промисловості (Донецько-Придніпровський економічний район) переважає техногенний характер змін регіональних інженерно-геологічних умов, зокрема під впливом виникнення, розвитку та активізації нових різновидів НЕГП (осідальність, хімічна і хімічна суфозія тощо).

Згідно із сучасними оцінками в Україні загалом помітний розвиток понад 20 різних типів екзогенних геологічних процесів і явищ, зокрема до п'яти особливо небезпечних ЕГП (рис. 2, табл. 1), які впливають на критичні зміни інженерно-геологічних умов на регіональному рівні. Унаслідок цього із 460 міст приблизно 85 потребують комплексного інженерного захисту, понад 250 з них підтоплені, до 150 зазнають впливу гравітаційних процесів, 50 розміщені на лесових осідальних ґрунтах. Критерієм підвищеної інженерно-геодинамічної небезпеки території потрібно вважати розвиток прояву декількох НЕГП або їхньої парагенетичної асоціації.

У районах інтенсивної господарської діяльності (Автономна Республіка Крим, Придністров'я, Передкарпаття, Донбас, Кривбас та інші) виявлено понад 4,5 тис. активних зсувів, 3 тис. карстових і суфозійно-карстових утворень. З початку 70-х років XX ст. ступінь ураженості території НЕГП збільшився майже вдвічі; водночас в останні десятиріччя зріс негативний вплив глобальних змін клімату на інженерно-геологічні умови функціонування господарських об'єктів, особливо просторово розвинених (нафтогазопроводи, залізниці тощо). За даними регіонального моніторингу ГС (ДНВП “Геоінформ”, УкрДГРІ, Держгеонадра) карст проявляється на 37 % території України, до того ж у межах впливу регіонального техногенезу швидкість процесів карстоутворення зростає майже втричі, селі розвинені на 70 % гірських водозаборів; підтоплення – на 80 % зрошувальних площ і в населених пунктах, розміщених у зоні впливу зрошення; зсуви – на 50 % освоєних схилів; осідання лесових порід – майже всюди, де вони поширені [3, 9].

Рис. 1. Схематична карта інженерно-геологічного районування України. Умовні позначення до рис. 1:

Регіони та області

- А – Волино-Подільська плита і Передкарпатський прогин
 А-1 Акумулятивно-денудаційна рівнина Волинського Полісся
 А-2 Денудаційно-аккумулятивна рівнина Волинської височини
 А-3 Акумулятивно-денудаційна рівнина Малого Полісся
 А-4 Структурно-денудаційна рівнина Подільської височини
 Б – Український щит
 Б-1 Акумулятивно-денудаційні рівнини Житомирського Полісся
 Б-2 Структурно-денудаційно-аккумулятивні рівнини Придніпровської височини
 Б-3 Акумулятивно-денудаційні рівнини Придніпровської височини
 Б-4 Денудаційно-аккумулятивні рівнини Приазовської височини
 В – Дніпровсько-Донецька западина
 В-1 Акумулятивні рівнини-низовини Київського (В-1) і
 В-2 Чернігівського Полісся
 В-3 Акумулятивно-денудаційні рівнини Новгород-Сіверсько-Поліської низовини
 В-4 Денудаційно-аккумулятивна рівнина Київсько-Канівської височини
 В-5 Акумулятивна Черкасько-Прилуцька рівнина
 В-6 Акумулятивна Полтавська рівнина
 В-7 Акумулятивно-денудаційна рівнина Середньоруської височини
 Г – Донецький регіон
 Г-1 Денудаційна височина Волчансько-Берецької рівнини
 Г-2 Денудаційна залишкова Північна рівнина
 Г-3 Центральна рівнинна ділянка
 Г-4 Південнодонецька рівнинна височина
 Д – Причорноморська западина
 Акумулятивно-денудаційні рівнини
 Д-1 Дунай-Дністровська
 Д-2 Дністер-Дніпровська низовина
 Д-3 Дніпро-Молочанська низовина
 Д-4 Акумулятивно-денудаційні рівнини Гірського Криму
 Е – Індоло-Кубанський прогин (західна частина)

- Е-1 Акумулятивно-денудаційні Керченська південно-західна (Е-1)
 Е-2 і північно-східна (Е-2) рівнини-низовини
 Ж – Карпатський регіон
 Ж-1 Акумулятивно-денудаційні рівнини Передкарпатської височини
 Ж-2 Середньо- і низькогірні масиви Зовнішніх Карпат
 Ж-3 Вододільно-Верховинські Карпати
 Ж-4 Середньовисотні Полонинсько-Чорногорські й Рахівсько-Чивчинські хребти
 З – Закарпатський регіон
 З-1 Низькогір'я Вигорлат-Гутинського вулканічного хребта
 З-2 Верхньотисенська котловина
 З-3 Закарпатська акумулятивна рівнина з ділянками давніх вулканів
 І – Гірський Крим
 І-1 Моноклінальні низькогірні зовнішні й внутрішні гряди
 І-2 Середньо-і низькогірні хребти й масиви Головної гряди
 І-3 Низькогір'я Південного берега Криму

Рис. 2. Схематична карта поширення небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України, масштаб 1:5 000 000

Наведений стислий огляд свідчить, що розвиток господарського комплексу України відбувається в умовах активізації регіональних техногенних змін інженерно-геологічних параметрів геологічного середовища, наслідком яких є його граничний стан і подальше збільшення кількості кризових явищ у техногенно-геологічних системах майже у всіх інженерно-геологічних регіонах України (див. табл. 1).

3. Провідні регіональні чинники критичних змін інженерно-геологічних параметрів геологічного середовища

За наявними методичними підходами зміни інженерно-геологічних умов переважно пов'язують з незворотними порушеннями складу й будови приповерхневої частини геологічного середовища, точніше окремих найменш стійких його елементів, переважно в зонах впливу об'єктів НЕГП. Здебільшого це пов'язано зі зростанням невідновності водо-енергообміну в зоні контакту літосфери з атмосферою та гідросферою. На регіональному рівні ці зміни можна поділити на дві групи:

- зміни фізичних полів ГС (вологості, властивостей порід, напружено-деформованого стану породних масивів тощо);
- зміни, пов'язані з формами прояву НЕГП, – розвитком наявних і утворенням нових, що веде до перетворення, руйнування двох компонентів ГС – порід і рельєфу [9, 10].

Аналіз можливих змін інженерно-геологічних параметрів ГС засвідчив, що особливості розвитку та прояву НЕГП зумовлені впливом на верхню зону ГС великої кількості природних і техногенних чинників і процесів. Поширення різних геологічних процесів і пов'язані з ними зміни геологічного середовища визначені особливостями геологічної будови, складом порід, тектонічними, геоморфологічними, гідрогеологічними, зонально-кліматичними та метеорологічними чинниками.

З'ясовано, що на регіональному рівні чинники, які зумовлюють розвиток припустимих (критичних) змін інженерно-геологічних параметрів ГС, доцільно розділити на три групи:

- 1) постійні (незмінні);
- 2) повільні;
- 3) швидкі.

Чинники першої групи (геологічна будова, рельєф) визначають генетичні особливості НЕГП та інтенсивність їх-

нього регіонального впливу на регіональні зміни інженерно-геологічних умов.

Чинники другої групи визначають загальну тенденцію регіональних змін активності розвитку НЕГП. Тут доцільно виділити дві підгрупи: основні (незалежні) і залежні. До першої підгрупи (незалежні) треба зарахувати тектонічні рухи та клімат; до другої (залежні) – загальні гідрогеологічні умови, ґрунти й рослинність.

Чинники третьої групи (швидкі) теж поділяють на дві підгрупи. До першої підгрупи (незалежні) зараховують гідрометеорологічні (атмосферні опади, температура, вітер) та гідрологічні умови (рівні води в морі й річках), а також сейсмічність (землетруси). Незалежні чинники третьої групи визначають активізацію НЕГП, але їхній вплив відбувається через залежні чинники – поверхневий стік, витрати води у водотоках, вологість, міцність і деформаційні властивості гірських порід.

Картографічне узагальнення просторово-часових параметрів прояву НЕГП свідчить про їхній активний вплив на формування критичних змін інженерно-геологічних умов більшості регіонів і великих ТГС (ПМА, гірничодобувні райони тощо) України (див. рис. 2).

Результати досліджень засвідчили, що на сучасному етапі формування інженерно-геологічних параметрів ГС впливовим чинником перевищення фонових показників просторового виникнення та активізації НЕГП є вплив глобальних змін клімату – зростання нерівномірності опадів, потепління, збільшення висоти й частоти повеней і паводків насамперед у зоні розвитку лесових і лесово-суглинчастих порід (до 65 % території України) [7–9].

Загалом аналіз даних табл. 1 та рис. 2 дає змогу зробити висновок, що найбільш комплексні регіональні зміни інженерно-геологічних параметрів ГС зумовлені розвитком процесів зсувоутворення й підтоплення у ПМА, які переважно розміщені в межах площ поширення лесових і лесово-суглинчастих порід. Критичні зміни ГС у гірничодобувних районах належать переважно до інженерно-геотехнічних (геомеханічних) унаслідок незворотних порушень рівноваги надр і тому проаналізовані в складі програми Національної АН України “Стратегічні мінеральні ресурси” [7, 10].

Попередньо, задля вдосконалення припустимого впливу підтоплення на інженерно-геологічні умови ПМА, ми обґрунтували дві схеми розвитку цього процесу:

Таблиця 1. Характеристика регіонального поширення небезпечних екзогенних геологічних процесів (НЕГП) у покривних породах

Типові НЕГП	Літологічні типи покривних порід			Примітки*
	Флювіогляціальні, алювіальні (Полісся)	Лесовий, лесово-суглинчастий	Осадочний, пухкий	Динаміка розвитку, %
Зсуви	Обмежений	Схили долин, річок, балок тощо	Схилі комплекс	Значна (2–5)
Карст (суфозія)	Поля водорозчинних порід	Поля водорозчинних порід	Обмежений	Фонові – середня (1–2)
Підтоплення	Переважно природне	Переважно техногенне	Переважно природне	Значна (2–5)
Осідання	Немає	Регіональне	Немає	Значна (2–5)
Ерозія	Обмежене	Регіональне	Локальне	Критична (5–10)
Абразія	Немає	Прибережні комплекси	Прибережні комплекси	Значна (2–5)
Селі	Немає	Немає	Карпатський, Кримський гірничі регіони	Локальна (від 1 до 10)

Примітка. * Рівні просторової активізації НЕГП: 1) до 1 % – фоновий; 2) 1–2 % – середній; 3) 2–5 % – значний; 4) 5–10 % – критичний; 5) > 10 % – катастрофічний.

– переважання впливу регіонального підняття рівня ґрунтових вод за умови достатньої стійкості підґрунтових порід до техногенного перезволоження (район Полісся з переважанням у верхній зоні геологічного розрізу піщаних проникних порід);

– розвиток локальних перезволожений порід зони ненасиченої фільтрації (зони аерації) з наступним формуванням техногенних водоносних горизонтів (водних куполів); спостерігається на територіях центрального й південного регіонів із широким розвитком слабопроникних осідальних лесових і лесово-суглинистих порід.

Варто зауважити, що другий тип підтоплення міст і селищ вирізняється підвищеним ризиком надзвичайних екологічних ситуацій і пов'язаних з ним руйнівних деформацій житлових і промислових споруд, підземних трубопровідних систем тощо (м. Дніпро, Кам'янське, Одеса, Маріуполь, схилі комплекси Криму, Прикарпаття). Водночас ми зважили на те, що регіональний розвиток підтоплення, зокрема з охопленням територій міст і селищ має стохастичну природу розвитку з одночасним впливом на активізацію зсувоутворення.

Статистичний аналіз зіставлення просторово-часової динаміки підтоплення та зсувоутворення на регіональному рівні й у межах міст і селищ (за 1982–2010 рр., частково до 2016 р.) свідчить, що вказана критична ситуація пришвидшеного підтоплення та зсувоутворення в ПМА була сформована до початку 90-х років XX ст. завдяки недосконалої містобудівельної діяльності на всіх її етапах – від інженерно-пошукових робіт до будівництва та експлуатації забудованих територій [2, 5–8].

На наш погляд, вплив вищевказаних чинників зберігається і сьогодні. Головною вадою більшості нормативних документів з інженерно-геологічних досліджень для будівництва є їхня обмеженість вивченням головних чинників взаємодії будинків і споруд з верхньою частиною геологічного середовища, яке формує підґрунтя. Водночас, як свідчать вищенаведені оцінки, вплив змін рівневого режиму річок і підземних вод зони активного водообміну й техногенних порушень, водного балансу внаслідок щораз більших втрат води й тепла у ПМА на умови будівництва виходить далеко за межі площ інженерно-будівельних вишукувань.

Останнє, без сумніву, призводить до дальшого розвитку площ підтоплення міст і селищ (вплив зростання техногенних втрат води та підвищених опадів і збільшення ризику надзвичайних ситуацій (НС)) і погіршення інженерно-геологічної та сейсмічної стійкості житлових і промислових споруд.

За цих умов геостатистичний аналіз збільшення площ регіонального підтоплення земель та зсувоутворення за 1982–2010 рр. і частково 2016 р. свідчить про експоненційну залежність їхнього багаторічного тренду збільшення (табл. 2, матеріали щорічників “Активізація небезпечних екзогенних

геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП”; 2010–2015 рр.).

Практична рівність показників регіонального збільшення площ підтоплення та кількості зсувних об'єктів за період 1982–2010 рр. (частково 2016) (відповідно 1,34 та 1,32) є свідченням генетичного зв'язку їхньої природно-техногенної активізації [1, 9, 10].

Тому, з огляду на статистичний характер виникнення і розвитку ділянок підтоплення та зсувоутворення, видається можливим припустити експоненційну динаміку їхнього збільшення за типовими залежностями такого типу:

$$S_{t,t} = S_{t,0} \cdot (e)^{\alpha_t} \text{ та } N_{t,t} = N_{t,0} \cdot (e)^{\alpha_t},$$

де $S_{t,0}$, $N_{t,0}$ – початкові розрахункові регіональні значення площі підтоплення та кількості зсувних об'єктів станом на 1982 р.; $S_{t,t}$, $N_{t,t}$ – кінцеві розрахункові регіональні значення площі підтоплення та кількості зсувних об'єктів станом на 2010 р. (2016 р.); α_t , α_t – коефіцієнти регіональної активізації процесів підтоплення та зсувоутворення за період моніторингу в 1982–2010 рр. (2016 р.); t – проміжок розрахункового часу моніторингових спостережень, $t = 28$ років.

Рішення вищезазначених рівнянь стосовно α_t α_t через логарифмування їхніх обох частин $[\lg(2411/1840)] = \lg(e^{\alpha_t})$ та $[\lg(23116/17400)] = \lg(e^{\alpha_t})$ дають змогу визначити коефіцієнти регіональної активізації процесів підтоплення та зсувоутворення за період моніторингу в 1982–2010 рр. (2016 р.) як ($\alpha_t \approx \alpha_t$) $\approx 0,01$.

Отже, унаслідок аналізу й геостатистичних розрахунків за величину регіонального критерію припустимої активізації НЕГП (підтоплення, зсувоутворення) доцільно прийняти коефіцієнти регіональної активізації $\alpha \approx 0,01$.

Перевищення вище окресленого критерію є ознакою небезпечних змін екзогеодинамічного режиму ГС.

У зв'язку із цим для опосередкованого зображення на регіональному рівні співвідношення інженерно-геологічних небезпек комплексного впливу процесів підтоплення та зсувоутворення в лесово-породному масиві міст і селищ здійснено порівняння щільності їхнього розвитку з фоновими значеннями щільності на прилеглих територіях (рис. 3, 4).

Правомірність такого підходу зумовлена спостереженням:

– по-перше, еколого-геологічної еквівалентності (однотипності) впливу будівельних об'єктів міст і селищ на природні й техногенні зміни ГС (зміни тепло-вологорегулювання, несної здатності порід, техногенного навантаження тощо);

– по-друге, інженерно-геологічної еквівалентності провідних процесів, які відбуваються в ГС міст і селищ у зоні формування ТГС “будівельний об'єкт – ГС” (фільтрація, зміна приземного шару повітря, порушення профілю схилів та інше) у межах ПМА [1, 3, 6, 8–11].

Таблиця 2. Динаміка регіонального розвитку критичних НЕГП (підтоплення та зсувоутворення) станом на 1982–2016 рр.

Назва критичного НЕГП	Одиниця вимірювання	Динаміка регіонального розвитку		Збільшення за 1982–2010 рр., рази	Сучасний тренд розвитку
		1982	2010 (2016)		
Підтоплення регіональне, ПМА та локальні осідання поверхні	км ²	1840	2470	1,34	Переважна активізація у багатоводні роки
Зсувоутворення	Кількість зсувних об'єктів	17 400	23 116	1,32	Активізація на схилах

Розміщення ПМА в різних інженерно-геологічних умовах лесо-породного комплексу та різноманітність у їхніх межах ТГС “техногенний об’єкт – ГС” створює передумови для стійкого ускладнення екзогеодинамічних і геотехнічних умов у процесі штатної експлуатації інженерних споруд, особливо в аварійних ситуаціях. Причому геотехнічний ризик регіонального рівня залежатиме від просторової щільності: техногенних об’єктів, ділянок розвитку підтоплення і зсувів, а також від здатності верхньої зони ГС до активізації цих процесів в умовах зміни кліматичних параметрів і похідних змін у гідросфері та ландшафтах [5, 8, 12].

Треба також зважати на статистичний ефект, що в разі високого ступеня ураженості якимсь НЕГП (зсуви, підтоплення) на регіональному рівні знижується загроза подальшої активізації цих процесів на об’єктовому рівні. І навпаки, за невисокої регіональної ураженості НЕГП виникає високий ризик дальшої техногенної активізації зсувів, підтоплення та інших небезпечних процесів на об’єктовому рівні. Крім того, високий рівень прояву підтоплення супроводжується великим ризиком активізації саме зсувних процесів у межах міст і селищ.

Регіональні оцінки рівня геотехнічного ризику територій міст і селищ, розміщених на лесах і ЛСП, мають певну просторово-часову обмеженість. Попри це, вони дають змогу вперше оцінити рівень техногенної активізації процесів підтоплення та зсувоутворення і їхній комплексний вплив на техногенні перетворення інженерно-геологічного й еколого-геологічного стану ГС міст і селищ України, особливо в межах поширення лесо-породного комплексу.

Комплексний аналіз моніторингових, картографічних, дистанційних та інших матеріалів щодо регіональних параметрів формування ГС і ТГС засвідчив, що потужне техногенне навантаження на геосистеми призводить також до стійких змін інженерно-сейсмогеологічних умов переважно внаслідок розвитку підтоплення, активізації зсувів і техногенного карсту (соледобувні комплекси Карпатського регіону, Причорномор’я, АР Крим). Це зумовлює потребу уточнення інтенсивності сейсмічного струшування з огляду на його збільшення за умови наближення рівнів ґрунтових вод до фундаменту споруд або підтоплення порід підґрунтя та орієнтації сейсмохвилі щодо фронту зсувного тіла. Тобто

Рис. 3. Рівень техногенного збільшення площ підтоплення міст і селищ України стосовно фонових значень (станом на 2012 р., логарифмічна шкала)

внаслідок потужного техногенезу на більшій частині території України потрібно зважати на приріст сили сейсмічного струшування на 1–2 бали залежно від комплексу негативних чинників. Навіть у слабосейсмічних районах фіксують підвищення струшуваності під впливом техногенного навантаження, що збільшує площі розвитку НЕГП, і погіршення інженерно-геомеханічного стану ґрунтів під фундаментами чималих споруд. Великі гідротехнічні споруди, особливо водосховища біля ГЕС, ТЕЦ, АЕС також можуть спричинити локальні тектонічні рухи земної кори [5, 7, 11].

Для перезвожених ділянок у працях [6, 11, 12] через застосування методу інженерно-геологічних аналогій запропоновано доповнення до параметрів приросту сили сейсмічного струшування у вигляді розрахункового часу існування підвищеного порового тиску після проходження транзитної (регіональної або локальної) сейсмічної хвилі. Наявна залежність приросту сейсмічності (ΔI , балів; згідно з Комплектом карт Зонального сейсмічного районування ЗСР-2004) від зонального значення глибини рівня ґрунтових вод має таку структуру

$$\Delta I = \alpha \cdot e^{-0,04h^{2'}},$$

де h – глибина рівня ґрунтових вод (РГВ), м; α – коефіцієнт, величина якого залежить від літологічного складу (проникності та компресійних властивостей) верхньої зони РГВ.

Для перезвожених (підтоплених) ділянок у водочутливих, слабопроникних і осідальних лесових і лесово-суглинчастих ґрунтах $\alpha=1,0$, через що залежність набуває вигляду

$$\Delta I = 1,0 e^{-0,04h^{2'}}.$$

Для таких ґрунтів в інтервалі глибин РГВ 5÷1 м $\Delta I \approx 0,3 \div 1$ бал, тобто приріст сейсмічності має суттєві значення (рис. 5).

Водночас аналіз результатів досліджень регіональних змін інженерно-геологічних умов ТГС у більшості регіонів України свідчить про великі неоднорідності їхніх ґрунтово-геотехнічних умов (структурно-геологічних, гідрогеологічних, гідрологічних, ландшафтно-геохімічних тощо). Верхня частина геологічного розрізу більшої частини території, охопленої нашим дослідженням, складена товщею пухких осадових, переважно лесових і лесово-суглинчастих осідальних порід, які в сучасних умовах характеризуються активними змінами водно-фізичних і фізико-механічних властивостей.

Рис. 4. Рівень техногенного збільшення щільності зсувів у містах і селищах України стосовно фонових значень (станом на 2012 р.)

Рис. 5. Емпірична залежність приросту сейсмічності ΔI від глибини h рівня ґрунтових вод

Причому для типових (фонових непорушених) ділянок розрахункові прирости сейсмічної інтенсивності дорівнюють $\Delta I=0$ балів (приріст щодо зональної сейсмічності згідно із ЗСР-2004).

До нового чинника формування сейсмічного складника інженерно-геологічних умов можна, на наш погляд, зарахувати зниження геомеханічної стійкості лесових слабопроникних порід у підґрунті підтоплених фундаментів з уповільненим зниженням гідрогеодеформаційних напружень за умов проходження сейсмічної хвилі. Для них ми обґрунтували емпіричну залежність часу існування напружено-деформованого стану водонасичених порід підґрунтя (тривалості підвищеного порового тиску $t_{\text{пор}}$) під час проходження сейсмопоштовху (швидкість 1,0–1,5 км/сек). Набагато більший час існування підвищеного порового тиску, порівнюючи із часом проходження сейсмопоштовху (частка секунди), формує небезпеку виникнення додаткових гідрогеомеханічних напруг під час афтершоків, унаслідок чого можливе локальне розрідження порід підґрунтя і розвиток критичних деформацій інженерних споруд [2, 6, 11].

За розрахунковою схемою, обґрунтованою в працях [2, 6, 11], тривалість часу t зниження порового тиску в слабопроникних породах $P_{\text{пор}}$ з огляду на мінімальний розмір будівлі $S_{\text{min}} \approx 80$ м орієнтовно має таку величину

$$t \approx \frac{S^2}{2,25a},$$

де a – рівнепровідність слабопроникних стиснутих порід у підґрунті будівлі, що обчислюється за формулою

$$a = \frac{kh}{\mu},$$

де: k – коефіцієнт фільтрації слабопроникних порід (суглинків, лесів, піщано-глинистих прошарків), $k \approx 1,0$ м/добу, h – товщина шару ґрунтового горизонту за умови контакту його рівнів з дном фундаменту, $h \approx 20$ м, μ – коефіцієнт водовіддання, $\mu \approx 0,1$.

Згідно з наведеними попередніми оцінками:

$$t \approx \frac{80^2 \cdot 10^{-1}}{2,25 \cdot 1,0 \cdot 20} \approx 14 \text{ діб}$$

Однак у цих будівельних нормах не зважено на специфічний для лесових порід часовий складник $t_{\text{пор}}$ приросту сейсмічного ризику, зумовлений уповільненим зниженням “стрибка” порового тиску після проходження сейсмічної хви-

лі в слабопроникних лесових формаціях. Отримані, з огляду на дані сейсмічного мікрорайонування, оцінки гідрогеофільтраційної реакції підґрунтя будівель на потенційні сейсмічні впливи й пов’язані із цим зміни інженерно-геологічних умов указують на небезпеку довготривалого утримання піднятих порового тиску. Небезпечним наслідком цього може бути порушення гідрогеомеханічної рівноваги системи “мінеральний скелет – порова вода” та її перехід у пливунний або тиксотропний стан з розвитком руйнувань.

4. Критичні ускладнення інженерно-геологічних умов промислово-міських агломерацій України

Аналіз складу регіональних змін гідрогеологічних та інженерно-геологічних умов міст і селищ України (1980–2015 рр.) засвідчив, що головним чинником погіршення й одночасного підвищення ризику надзвичайних ситуацій (НС) інженерно-геологічного походження в ПМА на лесово-осідальних ґрунтах є підтоплення їхніх територій і зсувоутворення в їхніх межах. Крім того, головною особливістю ГС у межах таких ПМА є його постійно наростаюча змінність, унаслідок чого за своїми інженерно-геологічними, гідрогеологічними, геодинамічними та геотехнічними параметрами ТГС мають нестабільний характер в умовах збереження техногенних навантажень (водно-балансових, теплових, динамічних тощо).

Загалом геологічне середовище міст і селищ разом з їхньою техногенною інфраструктурою (житлова й промислова забудова, водо-енергетичні та транспортні комунікації тощо) формують складну ТГС “інженерні об’єкти міста – ГС”, яка є головним “депо” техногенних чинників впливу на інженерно-геологічні параметри лесів і ЛСП, у межах яких розміщена більшість ПМА України.

У загальному петрографічному плані до лесових порід належать породи, що мають поруватість 45–50 %, знижену природну вологість (7–20 %), фільтраційну анізотропію (водопроникність у вертикальному напрямі в 5–25 разів перевищує горизонтальну). Специфічною інженерно-геологічною властивістю лесових і лесово-суглинчастих порід інженерно-геологічних морфоструктур України є підвищений уміст пилюватих фракцій (до 45 % і більше) із чималою пайкою глинистих часток (розміром до 0,1 мм) – до 1–3 %. Лесуваті відклади України часто мають укріплення карбонатних сполук (гіпс, ангідрид – до 1–6 %), розчинення яких призводить до зниження міцності лесових товщ, формування агресивних порових розчинів, розвитку тиксотропно-пливунних процесів [1–3, 7, 9, 10].

Аналіз здійснених в останні десятиліття досліджень механізму формування головної інженерно-геологічної властивості лесових порід – осідальності – підтверджує (В. А. Корольов, В. Т. Трофимов, В. С. Круподьоров, О. М. Трофимчук, Ю. І. Калюх та ін., 1998–2010), що вона виявляється в будь-яких пилюватих ґрунтах, зокрема лесових, але лише за визначених співвідношень твердої, рідкої і газової (порової) фаз.

Згідно з чинними будівельними нормами (ДБН В.2.5-41-2009, ДБН В.1.2-2:2006) лесові породи, залежно від можливості й динаміки прояву їхнього просідання від власної ваги в умовах забудови, поділяють на два типи:

- 1) ґрунтові умови, за яких можливе осідання від зовнішнього навантаження, але від власної ваги неможливе або не перевищує 5,0 см;
- 2) ґрунтові умови, за яких, крім осідання від зовнішнього навантаження, можливе осідання від власної ваги понад 5,0 см.

За даними геологознімальних робіт Мінгео УРСР (ДНВП “Геоінформ”, Інститут мінеральних ресурсів, УкрДГРІ) та Інституту геологічних наук НАН України на території України лесові ґрунти поширені на площі 340 тис. км² (57,5 %); з них лесові й лесово-суглинисті формації I типу охоплюють 162,5 тис. км² (27 %), II типу – 47,5 тис. км² (8 %), решта – неосідальні (табл. 3).

Аналіз картографічних матеріалів, який підготували автори, засвідчив, що найскладніші інженерно-геологічні умови (II тип ґрунтових умов) у межах лесово-осідального породного масиву формуються в Придніпровському, Південному, Східному (зокрема Донецькому) регіонах.

Для цих регіонів характерні комплексні зміни водно-балансового й геодинамічного стану лесових порід на великих площах, що пов’язано з регіональним розвитком підтоплення земель і будівництвом численних житлових, промислових, гідротехнічних, транспортних об’єктів. В Україні, крім Дніпровського каскаду водосховищ із середнім підпором ґрунтових вод 8–10 м, функціонує до 39 тис. ставків і водосховищ із середнім підпором 1,4–4,0 м (табл. 4). Це на великих площах призвело до повного водонасичення лесових товщ за схемою “знизу-вгору”, коли зниження міцності компенсується осіданням великих шарів або нерівномірними деформаціями підґрунтя. Крім того, виконані в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (ІТГІП НАНУ) дослідження впливу регіональної втрати природної дренажності через масштабне (до 70–80 %) зарегулювання річкової мережі фіксують підсилення впливу чинників глобальних змін клімату (ГЗК): потепління, збільшення кількості й нерівномірності опадів, висоти і частоти повеней і паводків, активізація інфільтрації тощо на зниження міцності лесово-осідальних товщ, тобто на їхню інженерно-геологічну деградацію [7–9, 12].

В Україні загалом до 70 % ПМА розміщені на території поширення лесових порід, причому в 560 містах і селищах загальна площа підтоплення перевищує 2000 км² [7, 8, 12]. Водночас у ПМА є до 60 тис. аварійних і старих будівель, рівень ризику руйнування яких на лесових ґрунтах сягає $n(10^{-2} \div 10^{-3})$, що на 1–2 порядки перевищує показники розвинутих країн ЄС (табл. 5).

Дослідження проф. Г. І. Рудька, проф. М. Г. Демчишина, проф. Є. А. Черкеза дають змогу дійти висновку, що в структурі ПМА утворюються складні ТГС “техногенний об’єкт – геологічне середовище”, інженерно-геологічні параметри яких у масиві лесових порід формуються за умов зосередження впливу різноманітних техногенних чинників.

Згідно з результатами досліджень [8, 9, 12], загальна кількість техногенних чинників впливу на лесово-породний комплекс у межах ПМА може перевищувати 20 різновидів, зокрема інженерно-геологічних, будівельних, фізичних, фізико-хімічних, соціально-економічних тощо. До того ж вплив окремих груп техногенних чинників супроводжується розвитком порівняно однакових змін у ТГС у різних регіонах України.

Ми виконали оцінку основних регіональних чинників еколого-геологічного впливу на зміни інженерно-геологічного стану лесових порід унаслідок комплексного впливу регіонального підтоплення (відбувається на 30 % території держави, табл. 6), сейсмострушувань від транзитних землетрусів (зона Вранча, АР Крим) великорозмірних об’єктів, зсувних ділянок тощо.

Дослідження [1, 3, 7, 10] дають змогу дійти висновку, що більша частина лесово-суглинистого чохла в межах території України на сучасному етапі комплексного впливу підтоплення, сейсмострушувань і місячно-сонячних припливів може також перебувати в стані поступового додаткового

Таблиця 3. Площі розвитку лесових порід за типами ґрунтових умов в Україні

Адміністративна область	Площа, тис. км ²	Чисельність населення, млн осіб	Площа поширення лесових порід, тис. км ²	Площа поширення осідальних лесових порід: тис. км ² ; % площі регіону			
				I тип	%	II тип	%
АР Крим	27,0	1,96	9,9	3,04	11,3	0,33	1,2
Вінницька	26,2	1,65	17,3	12,41	47,4	0,92	3,5
Волинська	20,2	1,04	3,3	3,08	15,2	0,00	0,0
Дніпропетровська	31,9	3,35	21,2	7,10	22,3	6,36	19,9
Донецька	26,5	4,46	18,3	5,18	19,5	0,85	3,2
Житомирська	29,9	1,29	4,3	3,65	12,2	0,00	0,0
Закарпатська	12,8	1,24	3,9	0,41	3,2	0,00	0,0
Запорізька	27,2	1,81	21,0	10,80	39,7	6,00	22,1
Івано-Франківська	13,9	1,38	6,2	0,78	5,6	0,00	0,0
Київська	28,9	4,32	14,7	8,75	30,3	0,46	1,6
Кіровоградська	24,6	1,02	17,6	7,85	31,9	7,51	30,5
Луганська	26,7	2,31	15,2	3,52	13,2	0,35	1,3
Львівська	21,8	2,55	9,6	2,41	11,1	0,00	0,0
Миколаївська	24,6	1,19	17,9	6,97	28,3	0,47	1,9
Одеська	33,3	2,39	24,9	7,85	23,6	6,00	18,0
Полтавська	28,8	1,50	18,8	11,47	39,8	1,67	5,8
Рівненська	20,1	1,15	3,9	3,75	18,7	0,00	0,0
Сумська	23,8	1,17	12,6	8,91	37,4	1,20	5,0
Тернопільська	13,8	1,09	11,3	6,35	46,0	0,00	0,0
Харківська	31,4	2,77	20,6	11,29	36,0	2,91	9,3
Херсонська	28,5	1,09	22,7	5,92	20,8	9,17	32,2
Хмельницька	20,6	1,33	14,3	12,66	61,5	0,00	0,0
Черкаська	20,9	1,29	13,0	5,99	28,7	2,72	13,0
Чернівецька	8,1	0,91	4,7	3,51	43,3	0,00	0,0
Чернігівська	31,9	1,11	13,4	8,88	27,8	0,54	1,7
Разом	603,4	45,38	340,4	162,51	26,9	47,46	7,9

Таблиця 4. Техногенні водні об'єкти України (1.01.2010 р.)

№ з/п	Адміністративна область	Параметри водосховищ і ставків			
		Кількість	Площа, тис. га	Об'єм, млн м³	Середня глибина, м
1	Вінницька	3286	34,74	602,30	1,73
2	Волинська	452	6,24	99,81	1,60
3	Дніпропетровська	1563	34,22	1183,90	3,46
4	Донецька	1161	28,23	1086,10	3,85
5	Житомирська	868	16,80	278,00	1,65
6	Закарпатська	68	1,56	605,30	3,88
7	Запорізька	925	11,10	263,00	2,37
8	Івано-Франківська	623	3,04	94,50	3,11
9	Київська	2447	25,80	44,80	1,72
10	Кіровоградська	2269	25,70	497,80	1,94
11	Луганська	417	9,30	302,50	3,25
12	Львівська	1262	10,30	180,60	1,75
13	Миколаївська	909	15,30	407,70	2,66
14	Одеська	883	85,10	2029,70	3,39
15	Полтавська	1339	22,30	424,50	1,90
16	Рівненська	669	10,18	147,29	1,47
17	Сумська	1245	14,50	275,70	1,90
18	Тернопільська	901	9,50	13,87	1,46
19	Харківська	1991	42,30	1644,70	3,89
20	Херсонська	391	33,60	333,70	0,99
21	Хмельницька	22,2	1,08	1,37	н. д.
22	Черкаська	2349	22,90	363,20	1,59
23	Чернігівська	698	9,70	139,00	1,43
24	Чернівецька	485	17,20	3046,00	17,71
25	АР Крим	897	8,60	493,00	5,73
Усього по Україні		31876	546,00	115264,00	3,11

Таблиця 5. Інженерно-геотехнічний стан житлового фонду у ПМА України (2015 р.)

№ з/п	Регіон	Кількість житлових будинків усього, тис. одиниць	Старі житлові будинки		Аварійні житлові будинки		Рівень потенційної загрози руйнації n·10 ⁻⁵
			одиниць	%	одиниць	%	
1	АР Крим	332,69	937	0,28	161	0,05	350
2	Вінницька	569,43	3018	0,53	878	0,15	685
3	Волинська	232,37	1299	0,56	229	0,10	665
4	Дніпропетровська	608,02	1740	0,29	258	0,04	330
5	Донецька	849,50	4946	0,58	1617	0,19	764
6	Житомирська	380,47	2870	0,75	515	0,14	895
7	Закарпатська	303,01	911	0,30	237	0,08	380
8	Запорізька	351,67	827	0,24	232	0,07	328
9	Івано-Франківська	340,77	972	0,29	347	0,10	383
10	Київська	525,56	2614	0,50	451	0,09	585
11	Кіровоградська	318,77	149	0,05	19	0,01	53
12	Луганська	518,39	1793	0,35	231	0,04	388
13	Львівська	453,59	1336	0,29	430	0,09	390
14	Миколаївська	269,96	1456	0,54	623	0,23	780
15	Одеська	481,42	4258	0,88	1314	0,27	1150
16	Полтавська	422,61	1389	0,33	210	0,05	380
17	Рівненська	261,67	1414	0,54	235	0,09	635
18	Сумська	330,84	1836	0,55	270	0,08	638
19	Тернопільська	285,86	897	0,31	490	0,17	485
20	Харківська	495,53	4177	0,84	547	0,11	970
21	Херсонська	285,76	1011	0,35	323	0,11	475
22	Хмельницька	380,42	1566	0,41	309	0,08	494
23	Черкаська	429,24	2728	0,64	590	0,14	750
24	Чернівецька	246,17	977	0,40	286	0,12	509
25	Чернігівська	393,51	836	0,21	100	0,03	238
26	м. Київ	33,68	356	1,06	6	0,02	109
27	м. Севастополь	30,10	86	0,29	54	0,18	470
Усього по Україні		10313,00	46449	0,45	10962	0,11	557 (середнє)

зниження міцності внаслідок багаторазового вивільнення пружної енергії гідрогеодеформаційних полів природного й техногенного походження. За оцінками фахівців (В. А. Ніколаєв, М. М. Довбник, В. І. Старостенко, Б. Г. Пустовойтенко, О. В. Кендзера, І. Б. Абрамов, А. В. Луцки, Г. Г. Стрижельчик, В. А. Соколов, Т. В. Кріль та ін.) максимальні значення

стискувальних, розтягальних і вертикальних торкальних напруг місячно-сонячних припливів становлять відповідно: 0,2; 0,1; 0,02 кг/см².

Важливо зазначити, що величина стискувальних напруг за припливних процесів у в'язко-пластичному масиві перезвожених лесів і ЛСП майже дорівнює мінімальному осідальному

Таблиця 6. Регіональна динаміка процесів підтоплення в Україні

№ з/п	Області	Підтоплено в 1982 р. (дані обстеження)			Регіональний прояв підтоплення у 1999–2008 рр. (Держгеолслужба, картографічні оцінки)			Відношення показників 1999–2008 рр. до показників 1982 р., рази	
		Міст і селищ	Сіл	Площа підтоп- лення земель, тис. га	Міст і селищ	Сіл	Площа підтоплення земель, тис. га	Міст і селищ	Площа регіонального прояву підтоплення земель
1	Вінницька	4	175	30,2	10	122	89,5	2,5	2,96
2	Волинська	1	–	0,02	11	36	12910,0	11,0	–
3	Дніпропетровська	30	124	104,3	43	226	728,5	1,43	7,00
4	Донецька	10	95	35	42	41	303,5	4,20	8,67
5	Житомирська	1	–	0,2	55	–	1975,9	55,00	–
6	Закарпатська	–	–	–	27	32	302,4	–	–
7	Запорізька	13	196	72,9	24	32	319,3	1,84	4,37
8	Івано-Франківська	–	–	–	–	–	0,78	–	–
9	Київська	5	18	21,1	23	5	810,7	4,60	–
10	Кіровоградська	5	8	1,0	11	–	14,2	2,20	14,2
11	Луганська	38	113	48,1	34	60	16,4	0,89	0,34
12	Львівська	1	8	15,2	17	119	21,7	17,00	1,43
13	Миколаївська	8	126	73,5	10	80	1282,0	1,25	17,5
14	Одеська	35	127	136,9	40	374	1352,0	1,14	9,90
15	Полтавська	13	292	81,4	22	–	851,3	1,69	10,45
16	Рівненська	–	–	0,3	19	17	1279,2	–	–
17	Сумська	9	13	39,7	20	–	42,3	2,22	1,06
18	Тернопільська	–	–	–	10	80	–	–	НВ
19	Харківська	17	213	77	32	158	301,9	1,88	3,92
20	Херсонська	15	111	62,2	19	85	1045,4	1,26	16,85
21	Хмельницька	12	–	1,7	19	1	–	1,58	–
22	Черкаська	4	47	35,4	8	10	8,0	2,00	0,22
23	Чернівецька	14	24	2,6	18	–	41,6	1,28	16,0
24	Чернігівська	8	–	43,2	11	–	442,6	1,37	–
25	АР Крим	11	151	110,8	12	153	442,5	1,09	4,0
Україна, разом		254	1841	992,7	537	1631	–	2,11	–

тиску й статичному напруженню зрушення тиксотропно перетворених лесових порід, що може формувати локальні зони з нестійкими інженерно-геологічними умовами. Також не унеможливується поява (на лесово-суглинистому водонасиченому підґрунті) тригерних ефектів у структурі ТГС з руйнівними наслідками для потенційно небезпечних об'єктів (ПНО).

За результатами досліджень змін інженерно-геологічного стану лесово-породного масиву в умовах техногенного перезволоження [1, 6, 8, 9] можна визначити три основні етапи перетворення його геомеханічного стану:

- 1) зниження міцності й формування неоднорідностей поля напруг з ризиком розвитку ділянок їхньої критичної (руйнівної) концентрації;
- 2) зменшення проникності з одночасним збільшенням часу існування порового тиску в системі “мінеральний скелет – вода”;
- 3) формування техногенної водонасиченої зони у покривельному водоненасиченому шарі ґрунтового водоносного горизонту з нерівноважним гідрогеохімічним складом і агресивністю води до бетону й металевих конструкцій.

Аналіз просторового розподілу ПМА за складністю регіональних інженерно-геологічних умов показав, що їхній історичний розвиток і сучасне функціонування здебільшого відбуваються в умовах рівнинного рельєфу із широким розвитком осідальних лесових і лесово-суглинистих ґрунтів. У цих умовах порушення природного водного й теплового балансу верхньої зони ГС у межах ПМА сприяло активному підняттю РГВ та активізації процесу підтоплення міст і селищ: за останні 35 років їхня загальна кількість (>540 ПМА) та площа підтоплення (до 200 тис. га, приблизно 11 % загальної площі) зросли більше ніж удвічі.

Про чималий геотехнічний вплив водно-теплових утрат із водопровідно-каналізаційно-теплових мереж (ВКТМ) міст і

селищ (загальна протяжність водопровідних, каналізаційних і теплоенергетичних мереж відповідно 127,39 та 41 тис. км за 35–45 % аварійних) на інженерно-геологічний стан ГС свідчить їхня загальна середня щільність, яка сягає 11,0 км/км².

У цих умовах привертає увагу те, що довгостроковий просторово-часовий режим водо-теплових втрат із ВКТМ унаслідок незадовільної гідроізоляції призводить до стійкого підняття РГВ, додаткових деформацій конструкцій будівель і пришвидшення їхнього старіння і зношення [2, 6, 8, 9, 11].

Авторські розрахунки свідчать, що за сучасних втрат води в межах ПМА близько 1,2 млрд м³/рік техногенне додаткове живлення ґрунтового горизонту на площі міст і селищ (19,6 тис. км²) у середньому сягає 1,2·10⁹ м³/рік (19,6·10³ км²·10⁶ м²)≈0,062 м≈62 мм/рік (або 2,0 л/сек км²), що майже вдвічі перевищує багаторічні регіональні значення (~1,0 л/сек км²) інфільтраційного живлення ґрунтового водоносного горизонту (ГрВГ) і тому сприяє підвищенню його рівня та дальшої активізації підтоплення міст і селищ.

З огляду на вищенаведене можна зробити припущення, що в останні два-три десятиріччя сучасний стан ВКТМ є головним чинником розвитку підтоплення та погіршення інженерно-геологічних умов житлових і промислових споруд більшості ПМА України, а також зростання ризиків НС інженерно-геологічного та геотехнічного походження в межах поширення осідальних лесів і ЛСП.

Головними чинниками техногенної активізації осідальних процесів за результатами сучасних геотехнічних фізико-хімічних, геофізичних, мікроскопічних та інших досліджень є вилугування цементувальних карбонатних сполук із лесових і лесово-суглинистих порід, гідратація глинистих мінералів з їхнім переважним перетворенням на нестійкі колоїдні

форми. Практично це призводить, як свідчить щораз більше утворення зсувів-потоків на схилових територіях лесово-породних масивів більшості ПМА України (м. Дніпро, Кам'янське, Чернівці, Куп'янськ, Київ, Херсон та ін.), до геомеханічної деградації порід піщано-глинистого складу й формування ділянок їхнього тиксотропного (пливуноподібного) стану.

За окремими оцінками під час гідромеліоративних зйомок у Дніпропетровській області було встановлено, що величина статичного напруження зрушення (СНЗ) перезволожених лесів у пливуніподібному стані сягає $\sigma_{\text{СНЗ}} = [100-150 \text{ МПа}]$. Таким чином, критична стрімкість схилу $\alpha_{\text{кр}}$ для цих умов техногенних змін геомеханічних показників лесів орієнтовно становитиме

$$\alpha_{\text{кр}}^{\circ} = \arctg \frac{\sigma_{\text{СНЗ}}}{\rho \cdot \Delta h}$$

$$\alpha_{\text{кр}}^{\circ} = \arctg \frac{(0,1 - 0,15 \text{ г/см}^3)}{(1,8 \text{ г/см}^3) \cdot 1 \text{ см}} \approx 5^{\circ} - 7^{\circ},$$

де ρ – середня щільність водонасичених лесово-суглинчастих порід, $\rho \approx 1,8 \text{ г/см}^3$.

Вищенаведені розрахунки повністю збігаються з фактичними даними щодо щораз більшої кількості випадків сучасного зсувоутворення в межах ПМА на схилах зі стрімкістю $5^{\circ} - 7^{\circ}$, а також суфозійних осідань поверхні біля будівель, місць скупчення транспорту, каналізаційних колодязів, де має місце інтенсивна техногенна інфільтрація та активні динамічні зміни напружено-деформованого стану порід підґрунтя будівель і верхньої зони ГС міст і селищ загалом (підвищення порового тиску, порушення рівноваги геомеханічного та фізико-хімічного стану) [8, 9, 12].

До додаткового впливу глобальних змін клімату (ГЗК) на ускладнення інженерно-геологічного стану лесів і ЛСП можна зарахувати підняття рівня моря та збільшення енергії хвиль, що призводить до підвищення зони зволоження підніжжя схилів і зменшення їхньої критичної висоти Нкр. За відомою залежністю проф. М. А. Цитовича, критична ви-

сота вертикального схилу Нкр, складеного ґрунтами із залишковим зчепленням $C = 0,2 \text{ кг/см}^2$ та об'ємною густиною $\gamma_w = 1,4 \text{ г/см}^3$, становить

$$H_{\text{кр}} = 2C/\gamma_w = 2 \cdot 0,2/0,0014 = 280 \text{ см} \approx 3,0 \text{ м}.$$

Із вищенаведених розрахунків випливає, що сучасний комплексний вплив ГЗК (потепління, збільшення зволоження та засолення верхньої зони лесовопородного масиву прибережно-морських територій) спричинює зростання зсувонебезпечних територій та інженерно-сейсмогеологічної вразливості ПМА в їхніх межах.

Дослідження дали змогу з'ясувати, на наш погляд, принципово новий додатковий чинник техногенних змін інженерно-геологічних умов на регіональному й об'єктово-територіальному рівнях, зумовлений закономірним зв'язком між напрямком впливу повздовжньої сейсмодовгів та загрозою активізації зсувного схилу [2, 4, 6, 11].

У загальному плані зсуви – зміщення порід на схилах під впливом гравітації в різноманітних формах, об'ємах, з різноманітними швидкостями і на різні відстані (визначення проф. В. Д. Ломтадзе). Дослідження провідних чинників зсувних процесів (проф. М. Г. Демчишин, проф. А. І. Білеуш, проф. М. М. Маслов, проф. Г. М. Шахунянц та ін.). Моделювання в ІТГІП НАНУ з використанням геоінформаційних технологій (ГІС) і дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) засвідчують, що на сучасному етапі прояви зсувних процесів локалізуються на схилових формах певної геологічної будови, гідрогеологічних і сейсмогеофізичних умов тощо.

Водночас аналіз “Карти загального сейсмічного районування (ЗСР, 2004) України” (Інститут геофізики НАН України, відп. редактори д-р фіз.-мат. наук Б. Г. Пустовітенко, проф. В. І. Уломов) показав, що інтенсивність сейсмічних струшувань під час землетрусів із забезпеченістю 5 % (5 подій за 100 років) упродовж 50-ти років змінюється від 6 до 10 балів для максимальних значень пришвидшення $0,05 \div 1,0 \text{ g}$ (табл. 7).

Таблиця 7. Оцінка еквівалентного зростання стрімкості зсувного схилу в разі зустрічного впливу повздовжньої сейсмічної хвилі

Назва адміністративної одиниці	Розвиток зсувів на 2015 р.		Максимальний сейсмічний вплив (шкала MSK-64)		
	Кількість	Щільн. зсувів, 10^3 км^2	Сейсмічність, бали	Горизонт. пришвидшення, g	Додат. стрімк. а, град.
Автономна Республіка Крим	1582	58,59	10	1	45
Вінницька	339	12,79	7	0,1	5
Волинська	0	0	7	0,1	5
Дніпропетровська	382	11,97	7	0,1	5
Донецька	189	7,13	7	0,1	5
Житомирська	10	0,33	6	0,05	3
Закарпатська	3251	253,98	8	0,25	14
Запорізька	206	7,57	7	0,1	5
Івано-Франківська	790	56,83	8	0,25	14
Київська	814	28,17	6	0,05	3
Кіровоградська	122	4,96	7	0,1	5
Луганська	982	36,78	6	0,05	3
Львівська	1347	61,79	8	0,25	14
Миколаївська	1149	46,71	7	0,1	5
Одеська	5868	176,22	9	0,5	26
Полтавська	824	28,61	6	0,05	3
Рівненська	0	0	7	0,1	5
Сумська	567	23,82	6	0,05	3
Тернопільська	117	8,48	7	0,1	5
Харківська	1615	51,43	6	0,05	3
Херсонська	40	1,40	7	0,1	5
Хмельницька	419	20,34	7	0,1	5
Черкаська	1027	49,14	7	0,1	5
Чернівецька	1467	181,11	7	0,1	5
Чернігівська	9	0,28	6	0,05	3
Усього по Україні	23116	38,29			

Параметри ДБН В.1.1-2006 і доповнення до них дають змогу дійти висновку, що під час землетрусів із силою 7, 8, 9 балів для важливих об'єктів можна підвищувати значення прискорення удвічі – до 0,2; 0,4; 0,8 g відповідно.

Отже, у разі зустрічної орієнтації зсуву стосовно фронту сейсмодвигу еквівалентне збільшення стрімкості схилу $\alpha_{\text{дон}}^{\circ}$ може бути оцінено за орієнтовною залежністю

$$\alpha_{\text{дон}}^{\circ} = \arctg(\Delta g).$$

Результати вищенаведених розрахунків засвідчують, що особливої активності впливу сумісної дії зсувних процесів і сейсмодвигу на регіональні інженерно-геологічні умови в останні десятиріччя зазнали Карпатський регіон, узбережжя Чорного й Азовського морів, Дніпровського, Дністровського, Тилігульського, Бузького й Бережанського лиманів, правобережжя Дніпра і його правих приток, Автономна Республіка Крим, а також території Одеської, Закарпатської, Чернівецької, Івано-Франківської та Львівської областей [1, 4, 7, 9–11].

Висновки

1. Аналіз сучасного формування інженерно-геологічних умов регіонів України дає змогу дійти висновку, що вплив природних і техногенних чинників призводить до комплексних змін стану, складу й властивостей геологічного середовища та техногенно-геологічних систем (ТГС) “техногенний об'єкт – геологічне середовище”.

2. В останні десятиріччя відбувається стійке збільшення впливу на інженерно-геологічні параметри ГС глобальних змін клімату й зростання сейсмічної активності. У цих умовах структурно-геологічний план територій, рельєф, літологічний склад і геотехнічні властивості верхньої зони ГС разом з гідрогеофільтраційною системою є генерувальними структурними компонентами динаміки інженерно-геологічних умов, на зміни стану яких потрібно зважати під час геотехнічних вишукувань, будівництва та експлуатації інженерних споруд.

3. З'ясовані нові просторово-часові чинники формування інженерно-геологічних умов більшості регіонів України в природних і техногенних умовах свідчать про потребу вдосконалення складу їхнього вивчення в таких напрямках:

– наукове обґрунтування гранично-припустимих змін інженерно-геологічних параметрів на регіональному рівні й у складі техногенно-геологічних систем різного рівня;

– розвиток структури моніторингу інженерно-геологічних параметрів ГС, зокрема просторово-часової динаміки НЕГП на основі технологій ГІС, ДЗЗ, математичного моделювання, проведення державного інженерно-геологічного та інженерно-сейсмогеологічного картування регіонів і ПМА України (масштаби 1:200 000 та 1:50 000) зі складанням карт нового покоління;

– розроблення методики оцінки інженерно-геологічних загроз у зонах впливу затоплення шахт і кар'єрів розвинених гірничодобувних районів (етап постмаїнінгу) з огляду на розвиток незворотних небезпечних змін геологічного середовища в межах їхніх ПМА.

ЛІТЕРАТУРА

1. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1-12:2006. Офіц. Вид. – Київ: Укрархбудінформ, 2006. – 83 с.
2. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. – Москва: Наука, 1986. – 367 с.
3. Демчишин М. Г. Прогноз и предупреждение оползневых явлений на территории Украины. – Киев: Ин-т геол. наук, 1982. – 53 с.

4. Довгий С. О., Коржнев М. М., Курило М. М. та ін. Екологічні ризики, збитки та раціональні межі використання надр в Україні. – Київ: Ніка-Центр, 2012. – 316 с.

5. Криль Т. В. Техногенні динамічні впливи на геологічне середовище міста. – Київ: Наукова думка, 2015. – 160 с.

6. Рогожин О. Г., Яковлев Є. О. Оцінка додаткового сейсмічного ризику руйнування споруд на підтоплених лесах та лесово-суглинистих породах України//Екологічна безпека та природокористування. – Вип. 31. – С. 11–22.

7. Рудько Г. І., Яковлев Є. О., Рагозин О. Л. Моніторинг процесів небезпечних територій та розрахунок ризику техноприродних аварій і катастроф. – Київ: Знання, 1997. – 80 с.

8. Рудько Г. І., Осиюк В. А. Инженерная геодинамика Украины и Молдовы (оползневые геосистемы). У 2-х томах. – Киев-Черновцы: “Букрек”, 2012. – 1330 с.

9. Садовенко І. О., Фоцій Н. В., Рудько Г. І. та ін. Сучасний техногенез та інженерне освоєння лесових масивів. – Київ-Чернівці: Видавничий дім “Букрек”, 2019. – 272 с.

10. Трофимов В. Т., Корольов В. А. Инженерная геология массивов лёссовых пород. – Москва: Изд. МГУ, 2004. – 140 с.

11. Трофимчук А. Н., Глебчук А. С., Полеveckий В. В. Об устойчивости склонов при изменении сейсмических условий//Будів. конструкції. – 2008. – Вип. 69. – С. 304–311.

12. Яковлев Є. О. Аналіз впливу сучасного стану водопровідно-каналізаційних і теплоенергетичних мереж міст і селищ України на їх інженерно-геологічну, геотехнічну та соціально-економічну безпеку//Світ геотехніки. – 2007. – № 1. – С. 4–12.

REFERENCES

1. Construction in seismic regions of Ukraine: DBN B.1.1-12: 2006. Offic. ed. – Kyiv, Ukrarkhbudinform, 2006. – 83 p. (In Ukrainian).
2. Water reservoirs and their impact on the environment. – Moskva: Nauka, 1986. – 367 p. (In Russian).
3. Demchishin M. G. Forecast and prevention of landslides on the territory of Ukraine. – Kyiv: In-t geol. nauk, 1982. – 53 p. (In Russian).
4. Dovhyi S. O., Korzhniev M. M., Kurylo M. M. et al. Environmental risks, losses and rational limits of subsoil use in Ukraine. – Kyiv: Nika-Tsentr, 2012. – 316 p. (In Ukrainian).
5. Kryl T. V. Technogenic dynamic influences on the geological environment of the city. – Kyiv: Naukova dumka, 2015. – 160 p. (In Ukrainian).
6. Rohozhyn O. H., Yakovlev Ye. O. Assessment of additional seismic risk of structure destruction on submerged loess and loamy rocks of Ukraine//Ekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia. – 2019. – Iss. 31. – P. 11–22. (In Ukrainian).
7. Rudko G. I., Yakovlev Ye. O., Rahozin O. L. Monitoring of Process-Safe Territories and Calculation of Risk of Techno-Natural Accidents and Catastrophes. – Kyiv: Znannia, 1997. – 80 p. (In Ukrainian).
8. Rudko G. I., Osiyuk V. A. Engineering Geodynamics of Ukraine and Moldova (Landslide Geosystems). In 2 volumes. – Kiev-Chernovcy: Bukrek, 2012. – 1330. (In Russian).
9. Sadovenko I. O., Foshchii N. V., Rudko G. I. et al. Modern technogenesis and engineering development of loess rock massives. – Kyiv-Chernivtsi: Bukrek, 2019. – 272 p. (In Ukrainian).
10. Trofimov V. T., Korolyov V. A. Engineering geology of loess rock massifs. – Moskva: MGU, 2004. – 140 p. (In Russian).
11. Trofimchuk A. N., Glebchuk A. S., Poleveckij V. V. On the stability of slopes under changing seismic conditions//Budivelni konstruktzii. – 2008. – Iss. 69. – P. 304–311. (In Russian).
12. Yakovlev E. A. Analysis of the influence of the current state of water supply and sewerage and heat power networks of cities and towns of Ukraine on their engineering-geological, geotechnical and socio-economic security//Svit heotekhniki. – 2007. – № 1. – P. 4–12. (In Ukrainian).

Р у к о п и с о т р и м а н о 19.11.2019.