УДК 624.131.537

ОЦІНКА ВПЛИВУ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТІВ НА СТІЙКІСТЬ ПРИРОДНИХ СХИЛІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУ ЗСУВІВ

О. С. Ковров
Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»
просп. К. Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49005, Україна. E–mail: kovrov@rambler.ru

Розглянута одна з найактуальніших екологічних проблем сьогодення – зсуви. Проаналізовані тенденції та причини розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів у м. Дніпропетровську. Виконано моделювання стійкості схилу в програмі SCAD Soft «Откос» за методами Федоровського-Курило, Фелленіуса, Бішопа, Спенсера, що базуються на круглоциліндричній поверхні ковзання. Розраховані коефіцієнти запасу стійкості для зсувонебезпечної ділянки схилу балки Тоннельна з урахуванням рельєфу місцевості, інженерно-геологічного профілю та вологонасичення ґрунтового масиву. Визначено діапазон критичного вологонасичення лесових ґрунтів, що відповідає стадії руйнування схилу.

Ключові слова: стійкість природних і техногенних схилів, коефіцієнт запасу стійкості, круглоциліндрична поверхня ковзання, критерій руйнування Кулона-Мора.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЕСТЕСТВЕННЫХ СКЛОНОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА ОПОЛЗНЕЙ

А. С. Ковров
Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»
просп. К. Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49005, Украина. E–mail: kovrov@rambler.ru

Рассмотрена одна из наиболее актуальных экологических проблем современности – оползни. Проанализированы тенденции и причины развития опасных экзогенных геологических процессов в г. Днепропетровск. Выполнено моделирование устойчивости склона в программе SCAD Soft «Откос» по методам Федоровского-Курило, Феллениуса, Бишопа, Спенсера, базирующиеся на круглоцилиндрической поверхности скольжения. Рассчитаны коэффициенты запаса устойчивости для оползнеопасного участка склона балки Тоннельная с учетом рельефа местности, инженерно-геологического профиля и влагонасыщения грунтового массива. Определен диапазон критического влагонасыщения лессовых грунтов, соответствующий стадии разрушения склона.

Ключевые слова: устойчивость природных и техногенных склонов, коэффициент запаса устойчивости, круглоцилиндрическая поверхность скольжения, критерий разрушения Кулона-Мора

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Розвиток господарського комплексу України відбувається в умовах нарощування техногенної дестабілізації геологічного середовища**,** наслідком якої є подальше збільшення кількості кризових явищ в екологічних системах**,** у тому числі активізація небезпечних екзогенних геологічних процесів (ЕГП) практично на всій території держави**.** У таких містах, як Дніпропетровськ, забудова території, витік води із водогінних комунікацій, розвиток мережі доріг призводить до стрімкого підйому рівнів ґрунтових вод ы погіршення їх розвантаження. На сьогоднішній день Дніпропетровськ – одне із самих зсувонебезпечних міст в Україні. Місто побудоване на пагорбах з розгалуженою мережею балок та ярів з дуже складними в геологічному відношенні ґрунтами. Третина території міста – це просадні льосові суглинки. Вони не становлять ніякої небезпеки, коли перебувають у сухому стані. Але у випадку недостатнього дренажу або підтоплення з каналізаційних мереж або зливових колекторів льосові ґрунти насичуються вологою, їх пластичні властивості зростають, а опір зсуву зменшується, що призводить до утворення зсувних ділянок.

Розвиток зсувних процесів пов'язаний останнім часом переважно з людської діяльністю, а саме, з нераціональною забудовою, частковим або повним засміченням балок і будівництвом у них різних об'єктів, порушенням роботи систем водопроводу й каналізації, а також неконтрольованим розміщенням промислових і побутових відходів. Усі ці фактори спричиняють обводнення льосових суглинків й утворення зсувонебезпечних територій. За результатами аерофотозйомок на території Дніпропетровської області було виділено 382 зсувні ділянки загальною площею близько 20,835 км^2. З них 133 припадає на місто Дніпропетровськ порівняно із 17 зсувними ділянками, зафіксованими у 80-х роках минулого століття. Усього у зсувонебезпечних зонах міста розташовано понад 500 житлових будинків і близько 50 промислових підприємств [1].

Таким чином, вірогідний прогноз виникнення зсувонебезпечних ситуацій та своєчасне виконання упереджувальних заходів з інженерного захисту територій від ЕГП є важливою складовою техногенної та екологічної безпеки населення.

Метою роботи є оцінка впливу гідрогеологічних характеристик ґрунтів на стійкість природних схилів для прогнозу зсувонебезпечних ситуацій.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для виконання мети роботи поставлені наступні задачі:

1. Визначити коефіцієнт запасу стійкості для зсувонебезпечної ділянки схилу балки Тоннельна м. Дніпропетровська з урахуванням геологічного

профілю за допомогою програми «Откос».

2. Оцінити вплив вологонасичення ґрунтового масиву на стійкість схилу для прогнозу зсувонебезпечних ситуацій.

Розрахунок стійкості природних схилів і техногенних укосів є однією з найважливіших інженерно-геологічних задач, рішення якої орієнтоване на своєчасне попередження зсувонебезпечних ситуацій, що виникають внаслідок природних процесів та антропогенної діяльності. Сучасна активізація зсувів, що розвиваються на схилах різного генезису, досить часто пов'язана з розвитком супутніх процесів – ерозійного та абразійного, які підсилюють розвиток основного процесу. Серед домінуючих природних чинників активізації необхідно виділити гідрологічні (підняття рівнів і зміна витрат води в поверхневих водотоках, рівні води та хвильовий режим морів, озер, інших водойм, ерозійна та абразійна дія поверхневих вод і відповідний підмив і розмив язикових частин зсувів), метеорологічні (атмосферні опади, температура тощо), гідрогеологічні (рівні, хімічний склад, умови живлення та дренажу підземних вод).

Урочище Тоннельна балка розташоване на південному сході м. Дніпропетровська між житловими масивами Перемога, Тополя й Сокіл. Назва балки походить від залізничного тоннелю, що прорізає один із міських пагорбів (рис. 1). На разі балка є місцем відпочинку, лісопарковою зоною, а також містить об'єкти будівництва різних форм власності, зокрема Центр активного відпочинку «Лавина». На окремих ділянках урочища спостерігаються інтенсивні зсувні процеси, що спричиняє занепокоєність міської влади та населення і викликає необхідність виконання відповідної інженерної оцінки техногенної безпеки схилів. Ситуація ускладнюється розташованим у нижній частині балки резервуару системи питного водопостачання.

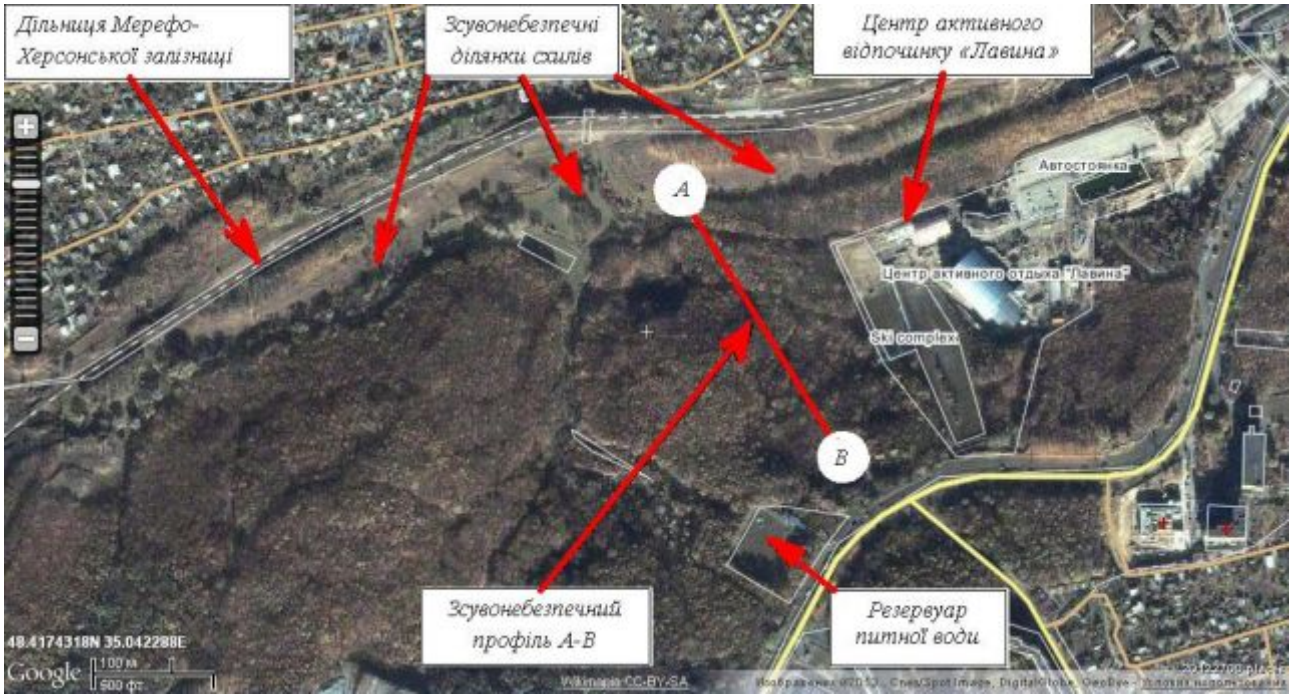

Рисунок 1 – Розташування урочища Тоннельна балка м. Дніпропетровська (за даними ресурсу http://wikimapia.org)

Для вирішення проблеми стійкості природних і техногенних схилів розроблені численні методи в рамках теорії граничної рівноваги. Як механізм утрати стійкості приймається механізм ковзання масиву, що зсувається відносно нерухомої частини укосу по поверхні ковзання. При цьому опір зрушенню по поверхні ковзання розраховується для статичних умов. Уздовж всієї поверхні ковзання дотримується критерій руйнування ґрунту, прийнятий у вигляді закону Кулона-Мора:

$$\tau = C + \sigma_n tg\rho, \qquad (1)$$

де τ – дотичне напруження, σ_n – нормальне напруження, C – зчеплення ґрунту, φ – кут внутрішнього тертя.

Реальна напруга, що зрушує, одержуваним розрахунком зіставляється з граничним опором зрушенню, і результат цього порівняння виражається у вигляді коефіцієнта запасу стійкості (КЗС), який є співвідношенням сил, що утримують масив ґрунту, і сил, що його зрушують.

В основі алгоритму розрахунку, реалізованого в програмі «Откос» версії 1.5 компанії SCAD Soft, лежить методика, запропонована в роботах В.Г. Федоровського й С.В. Курило [2]. Крім того, у програмі реалізовано декілька класичних методів аналізу стійкості укосів: Фелленіуса, Бішопа (спрощений), Спенсера, Корпуса інженерів (метод № 1), Лоув Карафайт, Янбу (спрощений) та Янбу (коректований). Опис цих стандартних методів наведено в

більшості книг, присвячених проблемі стійкості укосів [2, 3].

Розрахунок стійкості схилу й пошук найбільш імовірної поверхні ковзання здійснюється при заданих інтервалах його початку й кінця. Так для зсувної ділянки схилу задаються геометричні точки r_1 та r_2, що визначають інтервал ділянки початку зсуву, і аналогічні точки r_3 та r_4 для ділянки кінця зсуву. Незалежно від напрямку схилу повинні дотримуватися наступні правила завдання значень r: $r_4 > r_1$, $r_2 \geq r_1$, $r_4 > r_3$. (рис. 2). Так, для обраного зсувонебезпечного профілю об'єкта маємо такі дані: $r_1 = 20$ м, $r_2 = 35$ м, $r_3 = 75$ м, $r_4 = 100$ м.

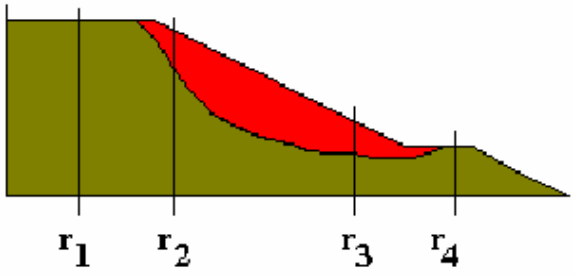

Рисунок 2 – Геометричний профіль схилу в програмі «Откос»

Напрям схилу та його геометричний профіль задається набором свердловин, які визначають межі та фізико-механічні властивості кожного інженерно-геологічного шару. В програмі «Откос» є можливість задавати горизонти ґрунтових вод (від 0 до 3), ураховувати зовнішні навантаження та сейсмічні впливи.

Визначення коефіцієнту запасу стійкості складається з двох етапів – уточнення початкового наближення та розрахунок коефіцієнту запасу стійкості схилу з побудовою поверхні ковзання [3].

Для визначення стійкості схилу Тоннельної балки за обраним профілем у програмі SCAD Soft «Откос» побудовано геометричний профіль укосу та задано відповідні фізико-механічні властивості ґрунтів, що складають схил (табл. 2).

У результаті обчислення стійкості схилу без урахування водонасичення ґрунтів отримано значення *КЗС* за методами Федоровського-Курило (1,671), Фелленіуса (1,656), Бішопа (1,761) та Спенсера (1,764). На рис. 3 зображено результати моделювання стійкості схилу за розрахунковим методом Федоровського-Курило.

Таблиця 2 – Фізико-механічні властивості інженерно-геологічних шарів

Назва інженерно-геологічних шарів	Кут внутрішнього тертя φ, град	Питоме зчеплення C, кПа	Питома вага P, кН/м^3	Питома вага у водонасиченому стані $Рв$, кН/м^3
Ґрунт	38	25,212	15,696	16,873
Суглинок жовто-бурий	26	34,924	17,168	18,148
Суглинок червоно-бурий	24	37,278	17,658	18,835
Пісок	33	21,582	16,677	19,228
Глина	18	98,100	20,601	21,582

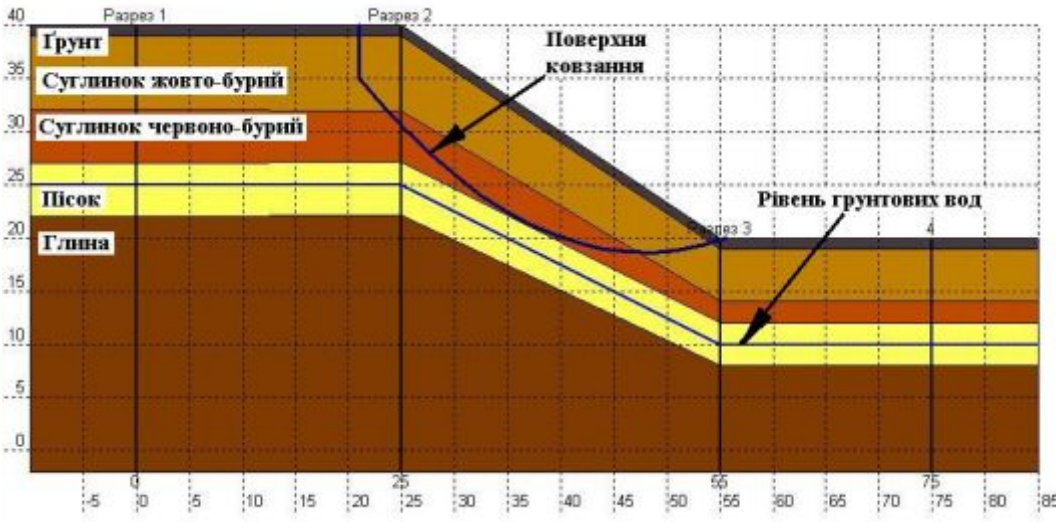

Рисунок 3 – Моделювання стійкості схилу за розрахунковим методом Федоровського-Курило (КЗУ=1,671)

Крива ковзання має круглоциліндричний профіль з висотою відриву H_{90}=5 м і виходом у нижній частині схилу на рівні підошви уступу. Результати моделювання за іншими методами дають аналогічну круглоциліндричну поверхню ковзання з вертикальною зоною відриву.

За вихідних умов схил з усередненим кутом нахилу α=30° знаходиться у стійкому стані. Але погіршення гідрологічного режиму території, зокрема підйом ґрунтових вод, може призвести до активізації зсувних процесів.

Використовуючи залежності фізико-механічних властивостей суглинків від їх водонасичення [4], можливо визначити коефіцієнт запасу стійкості для зсувонебезпечних схилів з урахуванням їх обводнення за наступними рівняннями:

$$\varphi = -0,06W_0^2 + 0,12W_0 + 39,86, \qquad (2)$$

$$C = 0,07W_0^2 - 3,87W_0 + 58,78, \qquad (3)$$

де φ – кут внутрішнього тертя, град; C – зчеплення ґрунту, кПа.

У табл. 3 наведено значення зчеплення та куту внутрішнього тертя ґрунтів залежно від вологонасичення. Використовуючи отримані результати розрахунків фізико-механічних властивостей ґрунтів, обчислюємо відповідні значення КЗС для водонасиченого ґрунтового масиву.

Таблиця 3 – Залежність фізико-механічних властивостей ґрунтів від вологонасичення

Вологонасичення ґрунту W, %	Зчеплення C, кПа	Кут внутрішнього тертя φ, град
10	27,08	35,06
12	22,42	32,66
14	18,32	29,78
16	14,78	26,42
18	11,8	22,58
21	8,38	15,92

На рис. 4 надано результати стійкості схилу за умов водонасичення у діапазоні W=10…21 %. За умов критичних значень вологонасичення W=18…19 %, КЗС=1, що відповідає стадії руйнування схилу. Тому для забезпечення стійкості схилу вологість порід не повинна перевищувати отриманих значень. Залежності, отримані за методами Фелленіуса, Спенсера та Бішопа, мають лінійний вигляд, при чому останні два практично співпадають за значеннями. Поліномна крива, отримана за методом Федоровського-Курило, відрізняється від вищезазначених лінійних залежностей лише до значень W=14 %, але при подальшому зростанні вологонасичення ґрунту значення КЗС практично співпадають.

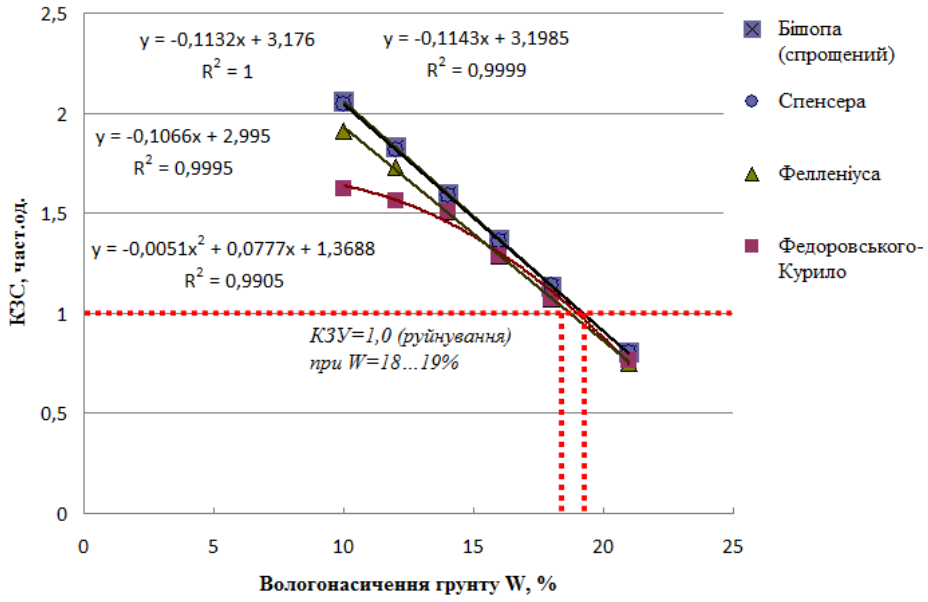

Рисунок 4 – Залежність КЗС від вологонасичення ґрунту

ВИСНОВКИ. Зсуви мають значне поширення на території України, що зумовлено геологічною будовою та геоморфологічними умовами, наявністю деформуючих горизонтів. На разі їх кількість пере-

вищує 22 900 і постійно зростає під впливом природних і техногенних факторів**.** Активна господарська діяльність**,** відсутність належних інженерних та екологічних заходів щодо освоєння територій спричиняє активне поширення зсувів на території населених пунктів**,** що створює загрозу безпеці життєдіяльності населення**,** інфраструктурі та території в цілому**.**

Встановлено, що за умов вологонасичення льосових ґрунтів *W*=18…19 %, КЗС=1, що відповідає стадії руйнування схилу. Враховуючи геоморфологічні особливості об'єкта, згідно з ДБН В.1.1-3-97 [5] на схилах балки Тоннельна необхідно здійснювати інженерні заходи щодо захисту від зсувних процесів.

Запропонований підхід дає змогу оцінювати коефіцієнти запасу стійкості будь-яких ґрунтів різних зсувонебезпечних територій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2011 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.mns.gov.ua/content/nasdopovid2011.html. – К: Міністерство надзвичайних ситуацій України, 2012. – 218 с.

2. Федоровский В.Г., Курило С.В. Метод расчета устойчивости откосов и склонов // Геоэкология. – 1997. – № 6. – С. 95–106.

3. Перельмутер М.А., Федоровский В.Г. Руководство пользователя к программе «Откос». Анализ устойчивости откосов и склонов. – Версия 1.5. – М: SCAD Soft, 2007. – 15 с.

4. Деревягина Н.И. Исследование влияния физического состояния лессовых грунтов на их механические свойства в условиях объемно-напряженного состояния // Матер. VII межд. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований». – Днепропетровск: IMA-прес, 2010. – Вып. 7. – С. 72–74.

5. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов. Основные положения: ДБН В.1.1-3-97. – К.: Госстрой Украины, 1998. – 41 с.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF SOIL HYDROGEOLOGICAL PROPERTIES ON STABILITY NATURAL SLOPES FOR THE FORECASTING LANDSLIDES

O. Kovrov
State Higher Education Institution "National Mining University"
vul. Karl Marks, 19, Dnipropetrovs'k, 49005, Ukraine. E–mail: kovrov@rambler.ru

The article is devoted to one of the most topical environmental problems of today - landslides. The trends and causes of exogenous geological processes in Dnepropetrovsk are considered. Simulation of slope stability in the software SCAD Soft «Откос» by methods of Fedorovskiy-Kurilo, Fellenius, Bishop, Spencer based on cylindrical sliding surface is carried out. The safety factors for the landslide prone area of the hill at the Tonnelnaya gully with consideration of the relief, geological profile and soil moisture. The range of critical moisture values for loess soils that correspond the slope failure stage is determined.

Key words: stability of natural and technogenic slopes, safety factor, cylindrical sliding surface, Mohr-Coulomb failure criterion

REFERENCES

1. National report about technogenic and environmental safety in Ukraine in 2011 [Internet resource]. – Mode of access:
http://www.mns.gov.ua/content/nasdopovid2011.html. – K: Ministry of emergency situations of Ukraine, 2012. – 218 p. [in Ukrainian]

2. Fedorovskiy V.G., Kurylo S.V. The technique of design for slope and hill stability // Geoecology, 1997. – № 6. – P. 95–106. [in Russian]

3. Perelmuter M.A., Fedorovskiy V.G. User's Manual to the software «Откос». The analysis of slope and hill stability. – Version 1.5. – M: SCAD Soft, 2007. – 15 p. [in Russian]

4. Derevyagina N.I. Study of influence of loess soil physical state on their mechanical properties in a three-dimensional state // Proceedings of the VII International scientific conference of students and young scientists "Geography, Geo-Ecology, Geology: the Experience of Research". – Dnepropetrovsk: IMA-Pres, 2010. – Vol.7. – P. 72–74. [in Russian].

5. Engineering protection of territories, buildings and constructions from landslides and avalanches. Fundamentals: DBN B.1.1-3-97. – K.: Ministry of Construction of Ukraine, 1998. – 41 p. [in Ukrainian]

Стаття рекомендована до друку д.т.н., с.н.с. Азаровим С.І.