

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

**Природничих наук та технологій**

(факультет)

Кафедра **Геофізичних методів розвідки**

(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

кваліфікаційної роботи ступеню **бакалавра**

студента Цибуля Катерина Володимирівна

академічної групи 103-17-3

спеціальності 103 Науки про Землю

спеціалізації<sup>1</sup> Геофізика

за освітньо-професійною програмою Науки про Землю

на тему : Комплексування електротомографії і гідрогеомеханічного моделювання при вивченні стану намівних гідротехнічних споруд

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи				
розділів:				
	Ішков В.В.			
	Довбніч М.М.			

Рецензент	Тимощук В.І.			
-----------	--------------	--	--	--

Нормоконтролер	Лозовий А.Л.			
----------------	--------------	--	--	--

Дніпро  
2021

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**  
завідувач кафедри  
геофізичних методів розвідки  
М.М. Довбніч  
(підпис) (прізвище, ініціали)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**ступеню бакалавра**  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту Цибкуля К. В. академічної групи 103-17-3  
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 103 Науки про Землю

спеціалізації<sup>1</sup> Геофізика

за освітньо-професійною програмою Науки про Землю  
на тему: Комплексування електротомографії і гідрогеомеханічного моделювання при вивченні стану намівних гідротехнічних споруд

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 19.05.21 № 273-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Розділ 1. Загальні відомості про геологічну будову, інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови проммайданчику	Загальні відомості про фізико-географічні умови, відомості про геологічну будову, відомості про гідрогеологічні умови, відомості про сейсмічність району робіт.	03.05.21- 15.05.21
Розділ 2. Методика і результати вивчення стану ґрунтового масиву гідротехнічної споруди методом електротомографії	Методика і результати польових електророзвідувальних робіт методом електротомографії.	16.05.21- 23.05.21
Розділ 3. Методика і результати гідрогеомеханічного моделювання стану ґрунтового масиву гідротехнічної споруди	Вибір моделі середовища. Виконання гідрогеомеханічного моделювання. Аналіз результатів гідрогеомеханічного моделювання стану ґрунтового масиву гідротехнічної споруди.	24.05.21- 10.06.21

Завдання видано \_\_\_\_\_  
(підпис керівника)

Довбніч М.М.  
(прізвище, ініціали)

Дата видачі \_\_\_\_\_

Дата подання до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис студента)

Цибкуля К. В.  
(прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 53 стор., 1 табл., 18 рис., 2 додатки, 5 джерел

ЕЛЕКТРОРОЗВІДКА, ЕЛЕКТРОТОМОГРАФІЯ, ГІДРОГЕОМЕХАНІЧНА  
МОДЕЛЬ, ГІДРОТЕХНІЧНА СПОРУДА.

У роботі представлені результати комплексування електротомографії і гідрогеомеханічного моделювання при вивченні стану наливних гідротехнічних споруд. Оперативність виконання і відносна дешевизна електророзвідки дозволяють в стислі терміни виконувати побудову моделей елементів геологічного середовища, контрастних по електричним властивостям (в першу чергу, питомому опору), що в умовах наливних гідротехнічних споруд дозволяє в комплексі з результатами гідрогеомеханічного моделювання зробити висновок про їх стан.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
Глава 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГЕОЛОГІЧНУ БУДОВУ .....	7
1.1 Стратиграфія.....	7
1.2 Тектоніка .....	7
1.3 Геоморфологія .....	11
1.4 Гідрогеологія .....	12
1.5 Відомості про будову гідротехнічної споруди та її стан .....	13
Глава 2 МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ВИВЧЕННЯ СТАНУ ГРУНТОВОГО МАСИВУ ГІДРОТЕХНІЧНОЇ СПОРУДИ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОТОМОГРАФІЇ (ЕТ).....	19
2.1 Загальні відомості .....	19
2.2 Методика польових робіт методом ЕТ.....	24
2.3 Обробка результатів польових вимірювань методом ЕТ.....	27
2.4 Результати електророзвідувальних робіт методом ЕТ .....	30
Глава 3 МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ГІДРОГЕОМЕХАНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ГРУНТОВОГО МАСИВУ ГІДРОТЕХНІЧНОЇ СПОРУДИ .....	32
3.1 Процедура гідрогеомеханічного моделювання при вивченні стану ґрунтового масиву гідротехнічної споруди.....	32
3.2 Розрахункова схематизація та методика розрахунків .....	37
3.3 Результати розрахунку гідрогеомеханічної стійкості гідротехнічної споруди .....	45
ВИСНОВКИ.....	51
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА.....	53

## ВСТУП

При проходженні переддипломної практики мною були зібрано матеріали геофізичних досліджень з оцінки стану наливних гідротехнічних споруд. Саме геофізичні методи в комплексі з інженерно-геологічними дослідженнями та гідрогеомеханічним моделюванням дозволяють вирішувати широке коло питань стосовно зміни властивостей ґрунтового масиву тіла гребель гідроелектростанцій та огорожувальних дамб хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів.

**Актуальність теми.** Греблі великих гідроелектростанцій та огорожувальні дамби хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів відносяться до класу особливо відповідальних гідротехнічних споруд (ГТС), руйнування яких може спричинити тяжкі екологічні та соціально-економічні наслідки. У процесі експлуатації таких гідротехнічних споруд можуть виникати негативні явища у ґрунтовому масиві споруд, а саме: винос ґрунтових часток за рахунок аномальної фільтрації, просідання поверхні споруд, формування зон зниженої щільності і обводнення і т.і. Вивчення зміни інженерно-геологічних характеристик, пов'язаних з експлуатацією гідротехнічних споруд, є обов'язковим елементом при визначення причин таких негативних явищ.

**Мета і задачі роботи.** Оцінка можливостей геофізичних методів (електричної томографії) і гідрогеомеханічного моделювання при вивченні стану наливних гідротехнічних споруд.

Досягнення поставленої мети обумовило послідовне вирішення таких задач:

1. всебічний аналіз геологічних умов природної основи і тіла дамб наливних гідротехнічних споруд;
2. вивчення методики польових робіт і інтерпретації геофізичних досліджень методом електротомографії в умовах наливних гідротехнічних споруд;
3. вивчення методики виконання і інтерпретації результатів гідрогеомеханічного моделювання;

4. комплексування результатів електротомографії і гідрогеомеханічного моделювання при вивченні стану намивних гідротехнічних споруд.

**Об'єкт досліджень.** Грунтовий масив природної основи і тіла намивних гідротехнічних споруд.

**Предмет досліджень.** Розподіл питомого електричного опору ґрунтового масиву природної основи і тіла намивних гідротехнічних споруд за даними електротомографії, механічних напружень, деформацій і зміщень за даними гідрогеомеханічного моделювання.

**Методи досліджень.** Геофізичні методи відіграють ключову роль при подібних дослідженнях. Методи електророзвідки є провідними при прогнозі областей розвитку розущільнених водонасичених ґрунтів і зон фільтрації. Основний вплив на характер поширення електромагнітного поля в землі надає питомий електричний опір ( $\rho$ ) середовища. У загальному випадку основним завданням електророзвідки є знаходження розподілу питомого електричного опору гірських порід як функції просторових координат  $\rho = f(x, y, z)$ . Поряд з інструментальними геофізичними методами суттєве значення відіграє математичне моделювання з урахуванням сучасних можливостей обчислювальної техніки, а саме – гідрогеомеханічного моделювання.

**Новизна одержаних результатів.** Вперше виконано комплексування електротомографії і гідрогеомеханічного моделювання при вивченні стану намивних гідротехнічних споруд.

**Практичне значення одержаних результатів.** Оперативність виконання і відносна дешевизна електророзвідки дозволяють в стислі терміни виконувати побудову моделей елементів геологічного середовища, контрастних по електричним властивостям (в першу чергу, питомому опору), що в умовах намивних гідротехнічних споруд дозволяє в комплексі з результатами гідрогеомеханічного моделювання зробити висновок про їх стан.

# ГЛАВА 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ГЕОЛОГІЧНУ БУДОВУ

## 1.1 Стратиграфія

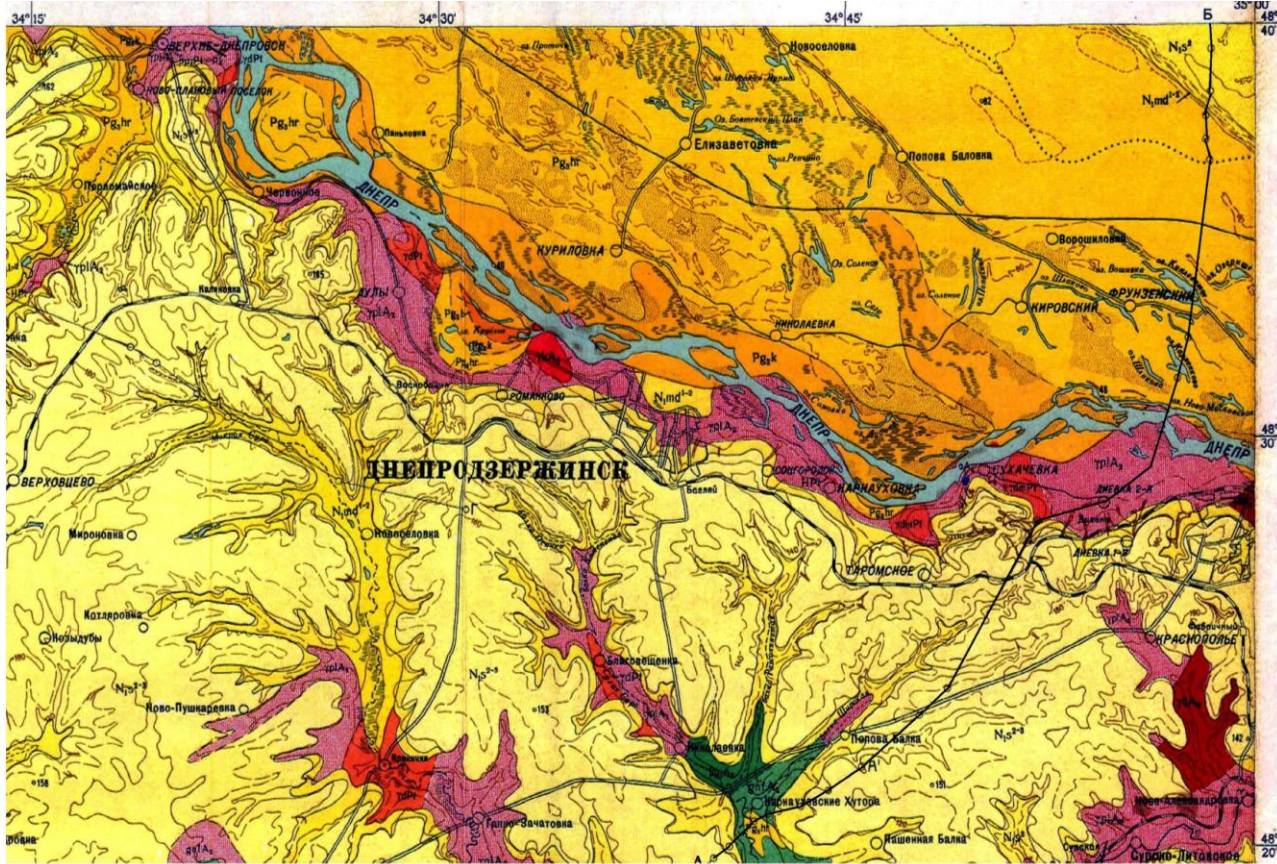
Територія дослідження відноситься до Українського кристалічного щита. У товщі порід, що складають територію, виділені утворення нижнього і верхнього археозою, протерозою і протерозой-палеозою, до яких відноситься складний комплекс кристалічних порід (рис. 1.1). Останні майже на всій території перекриті корою їх вивітрювання, вік якої визначається від палеозою до кайнозою. В осадовому комплексі порід виділені відкладення кайнозою, представлені еоловими, делювіальними, алювіальними і озерними відкладеннями [1].

Алювіальні відкладення цього відділу представлені суглинками, супісками і різнозернистими пісками, потужність яких вельми непостійна в зв'язку з нерівністю поверхні кристалічних порід, які залягають в підставі алювію.

Алювіальні відкладення представлені різнозернистими пісками, суглинками, серед яких зустрічаються тонкослоїсті суглинки озерного типу. Алювіальні піски широко поширені на лівобережжі Дніпра, де потужність їх досягає 30 м. До сучасного відділу віднесені алювіальні піски, суглинки, рідко мули заплачних терас всіх річкових долин, балок, делювіальні суглинки схилів, пролювіальніе піщано-суглинисті відклади, що рідко зустрічаються уздовж правого берега р. Дніпра псевдотеррас, еолові піски, елювіальний освіти - сучасні ґрунту. Серед усіх цих відкладень, крім ґрунту, найбільш істотну роль грають алювіальні і еолові відкладення, особливо широко розвинені в долині Дніпра; останні утворюють великі кучугур на лісовій терасі.

## 1.2 Тектоніка

Вивчення тектонічної будови докембрійських структур на території досліджень ускладнюється невеликою кількістю оголень кристалічних порід. Недолік природних виходів порід докембрію частково компенсується численними пошуково-розвідувальними свердловинами [1].



**УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ**

<b>ЧЕТВЕРТИЧНАЯ СИСТЕМА</b>	Q	Четвертичная система нерасчлененная. Суглинки, разнородные, суглики и пески (на разрезе)	gA <sub>1</sub>	Гранит серый и розовато-серый порфировидный микрогнейс
<b>ТРЕТИЙНАЯ СИСТЕМА</b>	N <sub>1</sub> Q	Верхний неогеновый этап третичной системы. Красноватые глины (только в разрезе)	gA <sub>2</sub>	Гранит серый равномернозернистый микрокристаллический
	N <sub>1</sub> <sup>1</sup>	Вильно- (среднекавказской) подмурса. Глины серо-зеленые, гилеосоневые	gA <sub>3</sub>	Керсанти
	N <sub>1</sub> <sup>2</sup>	Среднекавказской подмурса. Известняки, мергель, глина, пески разноразличные, глины, редко песчаники, траверсы	gA <sub>4</sub>	Гранит адолито-пегматитовый и покатит более и розовый
	N <sub>1</sub> <sup>3</sup>	1, 2 в среднекавказской курсу. Пески, прослойки глин и буроуголь	gA <sub>5</sub>	Плагиогранит равномернозернистый, биотитовый и его мелкий
	R <sub>1</sub> <sup>1</sup>	Харьковский курс. Пески, песчаники, глины, прослойки буроуголь	gA <sub>6</sub>	Гранодиорит и диорит серого розовато-белого цвета и биотитовый
	R <sub>1</sub> <sup>2</sup>	Киевский курс. Песчаники, мергель, пески разноразличные, глины, алевролиты, траверсы и редко микстомергельчатые породы	gA <sub>7</sub>	Сланцы извержено-серпентитовые
<b>ТРИАСОВАЯ СИСТЕМА</b>	R <sub>1</sub> <sup>3</sup>	Бичковский курс. Пески разноразличные, песчаники, глины, известняки, буроуголь, редко биолиты	gA <sub>8</sub>	Сланцы таласские
	T	Галешины	gA <sub>9</sub>	Серпентиниты и талько-серпентинитовые породы
<b>МОНТАНСКО-СУРИСКО-КАРПАТСКАЯ СИСТЕМА</b>	C <sub>1</sub>	Мезой и найзой обиданные (только в разрезе А'-Б')	gA <sub>10</sub>	Пероксинит
	C <sub>1</sub> <sup>1</sup>	Нижней и средней этапы обиданные (только в разрезе А'-Б')	gA <sub>11</sub>	Экзидаб дилевский
	C <sub>1</sub> <sup>2</sup>	Баликовский курс. Песчаники, сланцы, известняки и прослойки известняков углей неравной мощности (только в разрезе)	gA <sub>12</sub>	Кварциты мелкоструктурные Везувийские и Сургиевские, известняки средние, амфиболиты, амфиболиты и амфиболит-биотитовые сланцы
	C <sub>1</sub> <sup>3</sup>	Веревинский подкурс. Угленосная толща: сланцы разноразличные, песчаники, известняки, прослойки известняков углей разноразличной мощности (только в разрезе)	gA <sub>13</sub>	Экзидаблы, порфиробластовые экзидаблы, амфиболиты и сланцы с ними амфиболит-биотит-хлоритовые сланцы
<b>ПРОТОТРИАСОВАЯ СИСТЕМА</b>	C <sub>1</sub> <sup>4</sup>	Веревинский подкурс. Подтриасовая толща. Сланцы разноразличные, известняки, прослойки известняков углей разноразличной мощности (только в разрезе)	gA <sub>14</sub>	Гнейсы гранито-биотит-плагиоклазовые
	gA <sub>15</sub>	Диабаз пероксинитовый	gA <sub>15</sub>	Гнейсы биотит-плагиоклазовые
<b>ПРОТОПЕРМСКАЯ СИСТЕМА</b>	gA <sub>16</sub>	Диабаз амфиболитизированный	gA <sub>16</sub>	Положа горы выветривания кристаллических пород (только в разрезе)
	gA <sub>17</sub>	Пероксинит	gA <sub>17</sub>	Контуры плащов островного распространения третичных отложений на дилевии с его корой выветривания
<b>ПРОТОПАЛЕОЗОИЧЕСКАЯ СИСТЕМА</b>	gA <sub>18</sub>	Габбро	gA <sub>18</sub>	Южная эрозивная граница распространения отложений
	gA <sub>19</sub>	Полкайт	gA <sub>19</sub>	Трассовые системы
<b>ПРОТОКРЕТАЧЕВСКАЯ СИСТЕМА</b>	gA <sub>20</sub>	Гидротермальные образования	gA <sub>20</sub>	Каменистые системы
	gA <sub>21</sub>	Мелкит розового гранита иногда подмиканит	gA <sub>21</sub>	Контуры магматических очагов в пределах 1000 м
	gA <sub>22</sub>	Гранит розовый альпидный и пегматитовый дилевский	gA <sub>22</sub>	Бутовые свалки на линиях разрыва
			gA <sub>23</sub>	Предположенные геологические границы

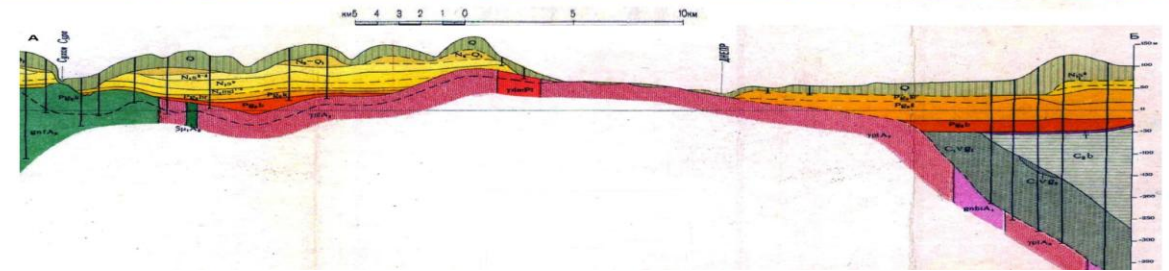


Рисунок 1.1 – Схема геологічної будови (мовою оригіналу) [1]



Неодноразові тектонічні порушення, пов'язані з орогенічними рухами в нижньому і верхньому археозой, протерозої і палеозої, зумовили утворення ряду тектонічних структур на Середньому Придніпров'ї (рис. 1.2.).

На дослідженій території докембрійські утворення зібрані в складки північно-західного простягання. В результаті тектонічної діяльності в верхньому археозой породи Конксько-верховцевської серії були зібрані в складні складки і розбиті на блоки. Деякі з блоків в подальшому, мабуть, були виведені зі свого первісного положення.

Утворення складок північно-західного простягання зв'язується з інтрузією плагіогранітів, що відбувалося на початку вернеархеозойського тектогенезу.

Субширотними протерозойськими розломами проникла магма рожевих Дніпровсько-Токівських гранітів, що зумовили виникнення величезної кількості жил і штоків граніту і його пегматитів, найчастіше субширотного простягання.

Спостережувані по жилах рожевого пегматиту невеликі скиди і зрушення з амплітудою від декількох сантиметрів до 1 м і, рідше, більш виникли в палеозої. В цей же час, ймовірно у зв'язку з герцинським діастрофізмом, відбувалося утворення численних меридіональних і широтних тріщин, заповнених дайками діабазу, жилами габро і роксеніту, а також почалося утворення Дніпровсько-Донецької западини, межа якої з Українським кристалічним масивом умовно проводиться по південно-західній ерозійній кордоні поширення відкладень карбону. На лівому березі р. Дніпро схил кристалічного масиву спочатку полого занурюється на північ, як і моноклінально залягають на ньому відкладення карбону, які падають на північний схід під кутом 3-50.

Вікові коливальні рухи відбувалися не тільки в палеозої і мезозої, але і в кайнозої. Великих тектонічних порушень, пов'язаних з альпійським орогенезом, в межах території досліджень не спостерігається.

У кайнозої відбувалися незначні зміщення окремих невеликих блоків.

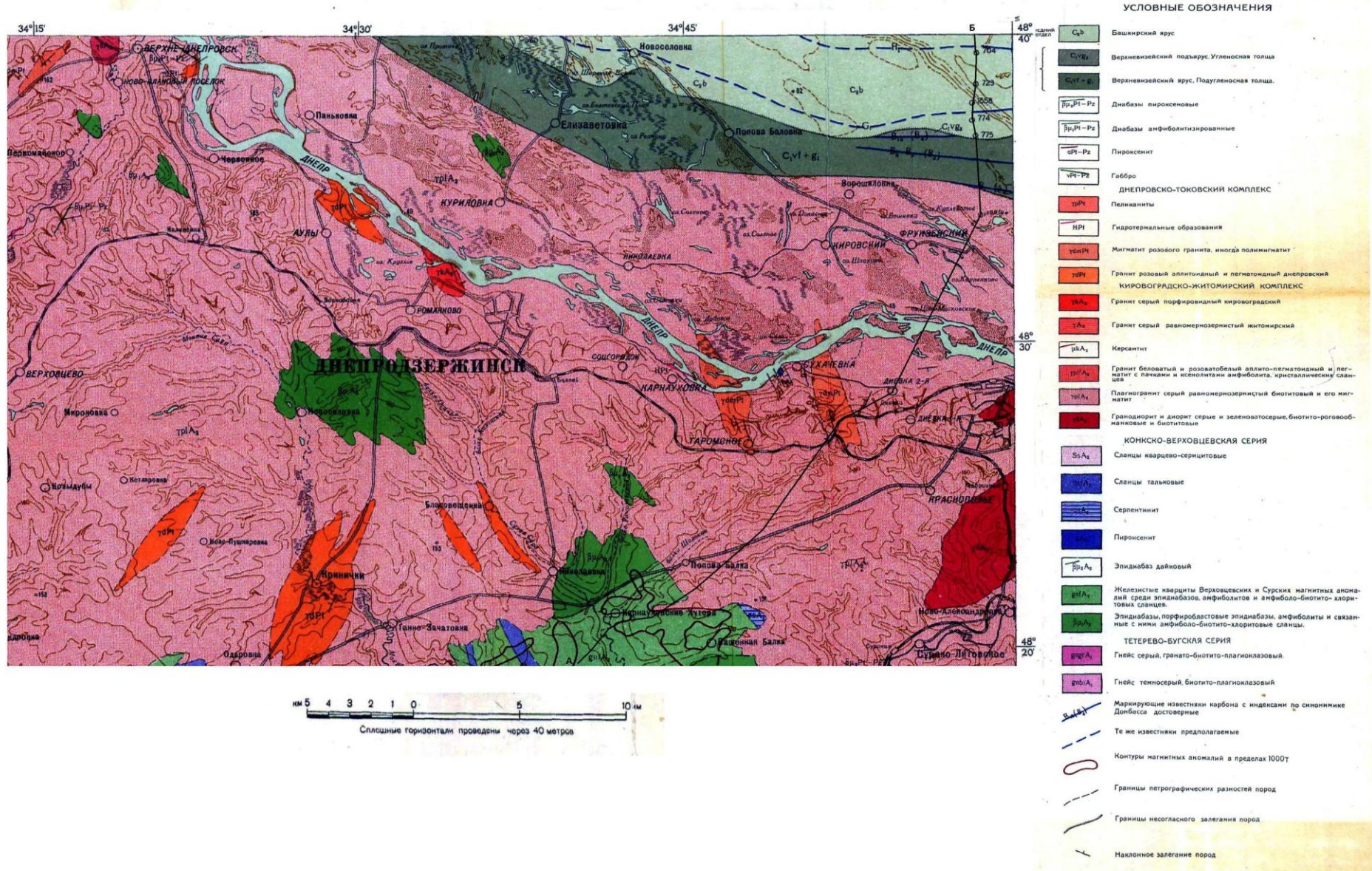


Рисунок 1.2 – Схема геологічної будови докембрію і палеозою (мовою оригіналу) [1]

### 1.3 Геоморфологія

Як в орографічному, так і в геоморфологічному відношенні територія досліджень належить до правобережжю р. Дніпра, Правобережжя – це хвиляста рівнина типу пенеплена, яка відноситься до області еродованого плато Середнього Придніпров'я.

На всій території дослідження виділяються наступні геоморфологічні елементи: ділянки плато, схили плато, стародавні і сучасні річкові долини, прохідні долини, балки та яри, зсуви.

#### *Ділянки плато.*

В межах еродованого плато правобережжя в рельєфі виділяються рівнинні ділянки плато, не порушені сучасної ерозією, і ділянки, місцями порізані ярами або розчленовані плоскими лощинами верхів'їв балок, а також схили плато і долини приток р. Дніпра з їх яружно-балочною мережею.

#### *Схили плато.*

На слабо хвилястою рівнині еродованого плато місцями дуже важко і часом неможливо визначити на око, де починається перегин рівнини плато в бік схилу і де кінчається схил плато і починається давня долина річки.

#### *Стародавні та сучасні долини річок.*

Долини річок і пов'язана з ними яружно-балочна мережа широко розвинені на території досліджень. Найбільш виробленої і великої є долина р. Дніпра, яка, мабуть, свій розвиток почала ще в пліоцені, коли базисом ерозії її був рівень понтічного моря. Алювіальні відкладення першої (давньої) фази розвитку цієї річки змиті потоками талих вод льодовиків четвертинного періоду. Найбільш важливу роль у формуванні долини р. Дніпра зіграли потоки талих вод Дніпровського і Валдайського льодовиків.

У поперечному профілі долини Дніпра виділені заплава і три надзаплавних тераси. Найбільш древній є третя тераса, формування якої відноситься до дніпровського заледеніння. Вона відома тільки у вузькій смузі, що оточує крутий схил правобережного плато, де вона сильно еродована. Поверхня її нахилена в сторону долини р. Дніпра. Тиловий край місцями

непомітно зливається зі схилом плато на абсолютному рівні близько 100 м. Передній уступ в багатьох місцях чітко виражений.

За геологічною будовою тераса на окремих ділянках відноситься до типу акумулятивних або ерозійно-акумулятивних. В останньому випадку цоколь терас складний кристалічними породами докембрію, які на правому березі Дніпра в багатьох місцях утворюють виходи у вигляді скель.

Друга надзаплавна тераса р. Дніпра синхронна першій стадії валдайського заledenіння. За геологічною будовою вона є так званої однолісовою терасою Середнього Дніпра і розвинена широкою ідеальною рівнинною смугою на лівобережжі.

Перша надзаплавна тераса р. Дніпра синхронна другій стадії розвитку вюрмського заledenіння. Вона широко розвинена також на лівобережжі і складена алювіальними пісками нового відділу. Поверхневі піски в більшості випадків переветяного і зібрані в кучугури сучасної епохи, тому поверхня тераси горбиста.

Заплава р. Дніпра низинна.

*Ярово-балкові сітка.*

На території досліджень широко розвинені балки. Вони досить густою сіткою перетинають різні геоморфологічні елементи, починаючи від високих вододільних ділянок плато і закінчуючи терасами річок. Тому геологічна будова і форма їх дуже різноманітні.

Круті схили плато до долини р. Дніпра порізані глибокими і короткими балками з густою мережею ярів.

*Зсуви.*

Розвиток яру сітки і зсувів характерно для смуги правобережного Придніпров'я. Нагальним завданням є боротьба з руйнівним впливом ярів і зсувів.

#### **1.4 Гідрогеологія**

Вся територія досліджень відноситься до гідрогеологічної провінції Українського кристалічного щита.

Найдавніший водоносний горизонт приурочений до тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію і в рідкісних випадках до їх корі вивітрювання. На найдавніших водоносних горизонтах залягає кайнозойська товща, що містить в свою чергу водоносні горизонти пісків різного віку: а) бучакського, б) харківського та місцями київського ярусів, в) нижнього і середнього міоцену і среднесарматського под'яруса.

Ще вище залягає товща четвертинних відкладень, що містить води в лісовидних суглинках плато і схилів, а також в піщано-суглинистих алювіальних відкладеннях річкових долин.

### **1.5 Відомості про будову гідротехнічної споруди та її стан**

В якості приклада досліджень в дипломній роботі обрано наливну гідротехнічну споруду для якої щільність скелета ґрунту наливних пісків при 50% забезпеченості мусить бути не менше 1,60 т/м<sup>3</sup> при вологості не більше 15%.

Під час наливу за технічними умовами заморожування карти не допускалося.

В цілому по греблі щільність скелета ґрунту наливного піску за даними 1267 визначень з вологістю не більше 15% в середньому дорівнює 1,61 т/м<sup>3</sup> при крайніх значеннях 1,45 – 1,75 т/м<sup>3</sup>, а проби з щільністю скелета ґрунту 1,60 т/м<sup>3</sup> і вище складають 69%, що відповідає вимогам.

Гранулометричний склад наливних пісків вивчений за 1274 пробами. Піски, налиті в тіло греблі за даними геотехконтролю, в цілому, дрібні – 70% від загального числа відібраних проб, а піски середньої крупності 30%.

Типові геологічні колонки за даними буріння, а також типовий переріз правобережної земляної греблі наведено на рис. 1.3 – 1.5.

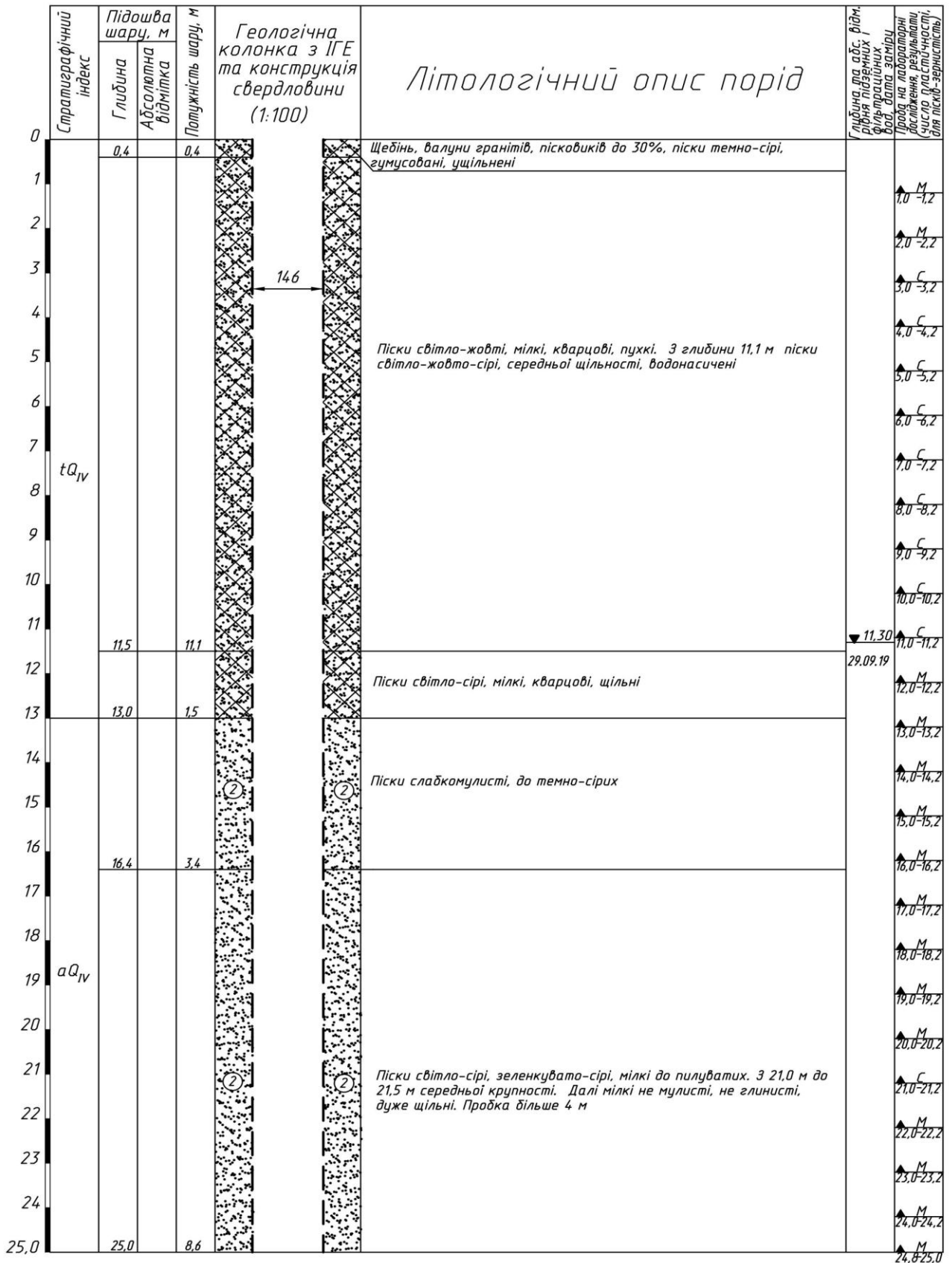


Рисунок 1.3 – Геологічна колонка за даними буріння (свердловина 1)

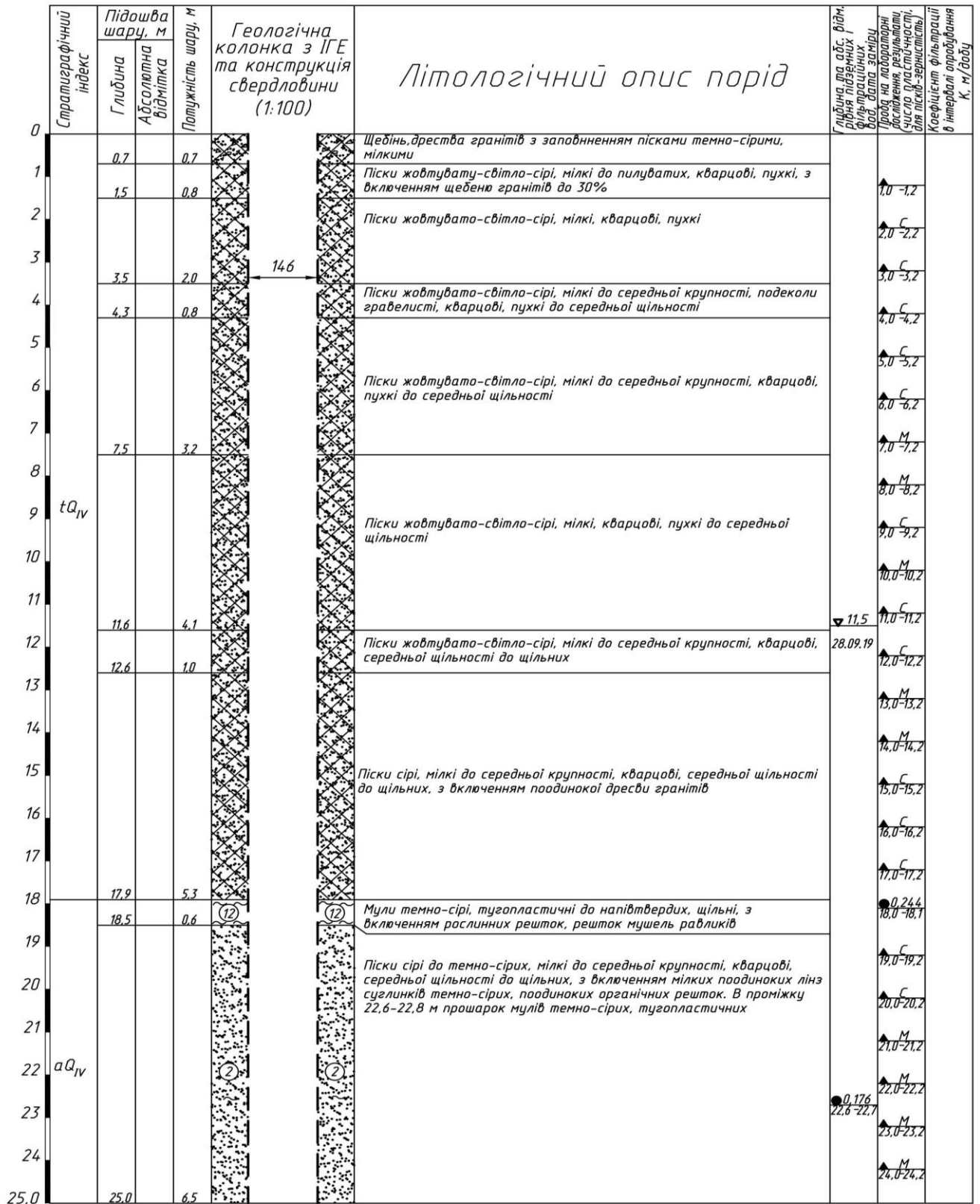


Рисунок 1.4 – Геологічна колонка за даними буріння (свердловина 2)

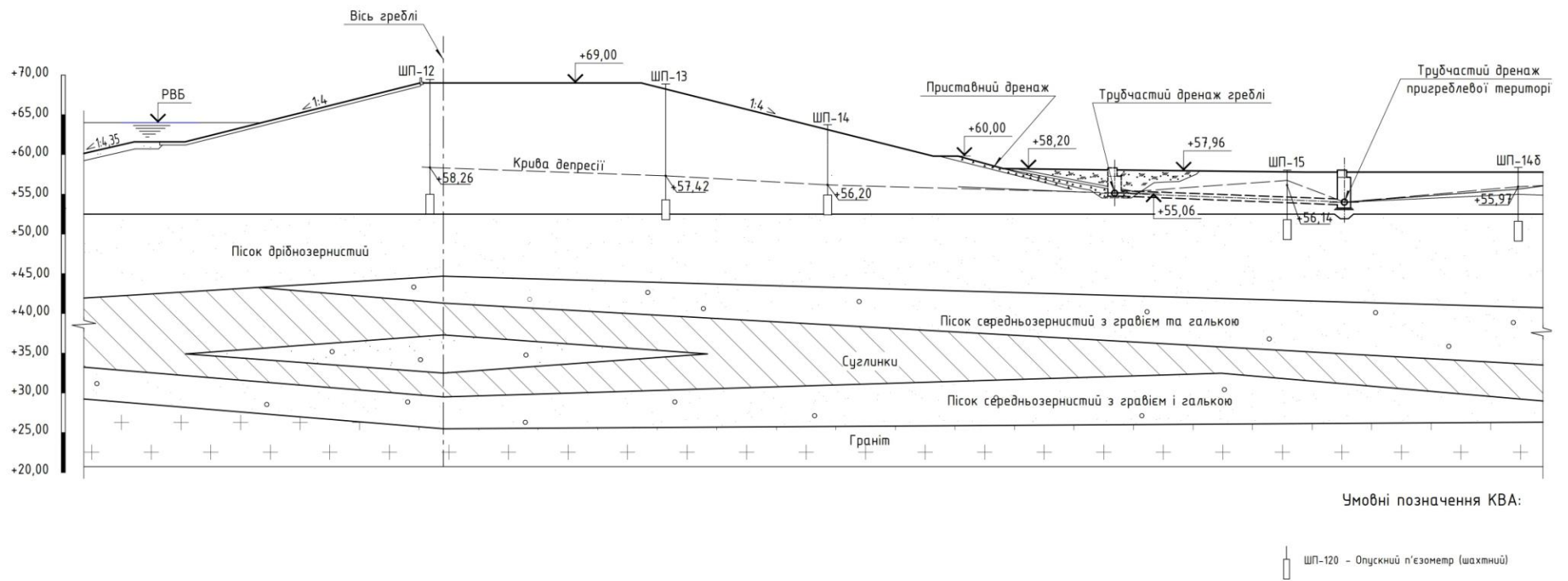


Рисунок 1.5 – Типовий переріз греблі



Згідно матеріалам гідротехнічного цеху мали місце наступні негативні явища на правобережній земляній греблі.

1. “В місцях, де приставний дренаж закольматований, на ПК 16 та 18 відбувається виклинювання поверхні депресії, взимку – наледі” (1968 р.).

2. Значне замулення дренажного кювету та частини приставного дренажу з перших років експлуатації від ПК 7 до ПК 9 (1987 р.). Заболочення та заростання приставного дренажу.

3. Такі ж відхилення, але в меншому обсязі спостерігалися на ділянці дренажу від ПК 11 до ПК 16 (1987 р.).

4. Виклинювання фільтраційного потоку вище кювета (1987 р.).

5. Значні відкладення піску в колодязях закритого трубчастого дренажу (пригреблевої території) правобережної греблі. Пісок лежить на значній частині труб дренажу шаром від 7 до 30 см. В трубах наявні грифони. Грифони тампонувалися, просадки засипалися (1968 р.). Після очищення відстійників дренажних колодязів відкладення піску знову з’являються, в деяких колодязях – через місяць. Товщина шару піску в деяких колодязях – до 40-50 см (1971 р.).

6. Просідання тіла греблі.

– “На ПК 15, навпроти скидного колодязя дренажу, в 6 м від кювета виявлено просідання приставного дренажу 1x0,8x0,6 м. На цій ділянці по двохшаровому фільтру вкрито привантажувальний шар крупного каміння шаром 0,6 м. Зверху кам’яний накид, ущільнений щебенем фракції 40-70”. Висловлене припущення, що під камінням була порожнина. Винесення ґрунту в дренажний кювет впродовж всього періоду на цій ділянці не спостерігалося (1987 р.).

Продовжується просідання на ПК15 між дренажним кюветом та трубчастим дренажем. Винесення відбувається в колодязь дренажу пригреблевої території К9.

– “На ПК 16+50 просідання було засипано відсівом, який незначно просів. Інші просідання, що було виявлено раніше, на ПК 17+05, 17+09, 14+97, 21 +60 не прогресують” (1991 р.).

– Локальне просідання низового укосу греблі на ділянці ПК14...ПК16 продовжується. Такі ділянки з'являються періодично, частіше всього в осінній або весняний період (2009-2012 рр.).

7. 2009-2012 рр. – просідання на ПК 14+50 в основі було зафіксовано глибинними марками.

8. Утворення ділянок посідання ґрунту на низовому укосі правобережної греблі. Такі ділянки з'являються в створі ПК 15 періодично. В останні роки спостерігається утворення провалів над трубами греблевого дренажу (іноді із оголенням труб дренажу) (після 2012 р.).

9. Винесення піску в закритий трубчастий дренаж пригреблевої території правобережної греблі. Найбільший винос піску спостерігався на ділянці ПК12...16.

10. Згідно даних п'єзометричних спостережень фактичне положення кривої депресії в верховому кліні нижче на 1,0-1,2 м, в низовому – вище на 0,4-0,6 м від розрахункової (створ ПК 12+04).

11. Згідно водолазних обстежень кріплення верхнього б'єфу всіх гребель, залізобетонні плити кріплення проглядаються до глибини 1,5-2,0 м; далі плити покриті шаром піску з мулом, черепашками, будівельним сміттям.

## ГЛАВА 2 МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ВИВЧЕННЯ СТАНУ ГРУНТОВОГО МАСИВУ ГІДРОТЕХНІЧНОЇ СПОРУДИ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОТОМОГРАФІЇ (ЕТ)

### 2.1 Загальні відомості

Для більшості методів електророзвідки основний вплив на характер поширення електромагнітного поля в землі надає питомий електричний опір ( $\rho$ ).

Питомий електричний опір середовища характеризує його здатність проводити електричний струм. Гірські породи є гетерогенними середовищами, які складаються з твердої, рідкої і газоподібної фаз. Тверда фаза утворює скелет породи, а рідка і газоподібна фази заповнюють пори.

Існує невелика кількість мінералів, які володіють металевим характером провідності. У них носіями електричного струму є вільні електрони, які переміщуються в межах кристалічних решіток. Такі породи називають електропровідними.

Переважна більшість породоутворюючих мінералів має дуже високий питомий опір (понад  $10^8$  Ом•м). Породи, які складаються з цих мінералів, мають йонний тип провідності, який обумовлений наявністю порової вологи. Опір води, в першу чергу, визначається рівнем її мінералізації (молекули солі при розчиненні дисоціюють на йони, які є вільними носіями електричного струму) і, в меншій мірі, температурою.

Особливе становище займають глини, які в результаті своєї тонкодисперсної структури утримують навколо своїх часток тонкий шар води (так звана зв'язана вода), що володіє високою питомою провідністю. Внаслідок цього, при звичному рівні мінералізації води, глини мають опір в діапазоні від 5 до 20 Ом•м.

У загальному випадку основним завданням електророзвідки є знаходження розподілу питомого електричного опору гірських порід як функції просторових координат  $\rho=f(x, y, z)$ . Карта розподілу цієї функції за глибиною в вертикальній площині або в просторі називається геоелектричним розрізом.

Первинне поле при роботі методом опорів створюється сукупністю точкових або дипольних джерел, які розташовуються різним чином на денній поверхні або в свердловинах і гірничих виробках.

На денній поверхні в точках А і В (рис. 2.1) розташовані електроди (заземлення), через які в землю від будь-якого джерела надходить струм. Нехай електрод А приєднаний до позитивного полюса джерела струму (+ I), а електрод В – до негативного (-I). Ці електроди будемо називати живильними. Електричне поле живильних електродів можна досліджувати, вимірюючи різницю потенціалів між двома точками землі (М і N), в які також поміщені електроди. Ці електроди будемо називати вимірювальними або прийомними. У практиці електророзвідки в якості живильних і прийомних електродів найчастіше застосовуються стрижневі електроди. Нижче наведено формули для потенціалів точкових джерел (електродів А і В). В теорії електророзвідки показано, що для стрижневих електродів на великих, в порівнянні з глибиною заземлення, відстанях від живильних електродів, потенціал можна обчислювати за формулою точкового джерела.

Відомо [3], що різниця потенціалів  $\Delta U_{MN}$  між вимірювальними електродами:

$$\Delta U_{MN} = U_M - U_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right).$$

Звідси можна визначити опір однорідного середовища, що заповнює нижній напівпростір:

$$\rho = \frac{\Delta U_{MN}}{I} \left( \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \right).$$

Якщо

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \quad (2.1),$$

отримаємо:

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

Величину  $K$ , яка залежить тільки від взаємного розташування живильних і прийомних електродів, називають геометричним коефіцієнтом установки.

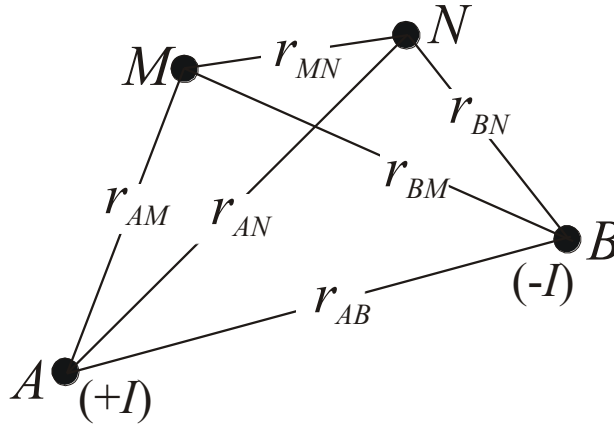


Рисунок 2.1 – Чотирьохелектродна установка AMNB

Реальне середовище, яке вивчає електророзвідка, не є однорідним півпростором. Тому, підставивши в останню формулу результати вимірювань, отримаємо не справжній питомий опір, а деяку величину, яку називають уявним опором ( $\rho_K$ ).

Поняття уявного питомого електричного опору було введено для зручності аналізу та інтерпретації електричного поля, за яким спостерігають. Уявний опір  $\rho_K$  – це електричне поле, що спостерігається, нормоване за параметрами установки таким чином, що в однорідному півпросторі уявний опір збігається з істинним питомим опором. Уявний опір розраховують за формулою:

$$\rho_K = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

де  $\Delta U_{MN}$  – різниця потенціалів між прийомними електродами (M і N),  $I$  – струм в лінії живлення AB, а  $K$  – геометричний коефіцієнт установки. Розмірність  $K$  – в метрах, а  $\rho_K$  – в Ом • м.

Польові роботи електророзвідувальними методами виконуються за допомогою спеціальних установок. Термін «установка» в методах опорів

використовується для позначення взаємного розташування і числа прийомних та живлячих електродів. Установки відрізняються глибинністю, роздільною здатністю. Вибір установки є найважливішим елементом методики електророзвідки і залежить, в першу чергу, від поставленого завдання, а також від технічних і економічних можливостей проведення вимірювань.

Якщо в чотирьохелектродній установці  $AM < AN < 1/5AB$ , то різниця потенціалів між прийомними електродами М і N буде визначатися лише живлячим електродом А, а впливом живлячого електрода В можна знехтувати і вважати його таким, що знаходяться в «нескінченності». Такі установки називаються трьохелектродними (AMN). В двоелектродній (AM) установці живлячий електрод В і приймальний електрод N віднесені в «нескінченність» (табл. 2.1).

Найбільш часто використовуються установки Шлюмберже, Веннера і різні дипольні установки (екваторіальна – ДЕЗ, осьова – ДОЗ та інші) (табл. 2.1). У дипольних установках живлячі (AB) і прийомні (MN) електроди зближені настільки, що відстані  $r_{AB}$  і  $r_{MN}$  набагато менше, ніж відстань між центрами відрізків AB і MN.

Розносом (R) називається деякий геометричний параметр установки, що характеризує її глибинність. Для симетричної чотирьохелектродної установки Шлюмберже  $R = AB/2$ , тобто її глибинність –  $(1/3 \div 1/10) AB/2$ . В дипольній осьовій установці напруженість поля електричного диполя (AB) загасає як  $1/r^3$ , тобто швидше, ніж поле точкового джерела. Для корекції втрати глибинності в якості розносу цієї установки приймають половину відстані між центрами приймального і живлячого диполів  $R = r_{o_1 o_2} / 2$  (табл. 2.1).

Геометричний коефіцієнт довільної чотирьохелектродної установки розраховується за формулою (2.1). Для установок з певним взаємним розташуванням електродів формула спрощується (табл. 2.1).

Точкою запису установки називається точка, до якої відносяться вимірні значення  $\Delta U_{MN}$  і розраховані по ним значення  $r_k$  (табл. 2.1).

Таблица 2.1

## Електророзвідувальні установки

Тип електророзвідочной установки	Схема измерений	Геометрический коэффициент установки $K$	Точка записи
Двухэлектродная (потенциальная) установка		$K = 2 \cdot \pi \cdot AM$	$M$
Трёхэлектродная установка $R=AO$ , где $O$ - середина $MN$		$K = \frac{2 \cdot \pi \cdot AM \cdot AN}{MN}$	середина $MN$
Симметричная четырёхэлектродная установка (установка Шлюмберже) $AM=NB$ , $MN < AB/3$ $R=AB/2$		$K = \frac{\pi \cdot AM \cdot AN}{MN}$	середина $MN$
Установка Веннера $AM=MN=NB$ $R=AB/3$		$K = 2 \cdot \pi \cdot AM$	середина $MN$
Установка срединного градиента (измерения проводятся в середине линии $AB$ на площади размером $AB/3 \times AB/3$ )		$K = \frac{2 \cdot \pi}{MN \cdot \left( \frac{\cos \varphi_1}{AO^2} + \frac{\cos \varphi_2}{BO^2} \right)}$	середина $MN$
Дипольная азимутальная установка $AB < 0.6 O_1 O_2$ , $MN < 0.2 O_1 O_2$ , $70^\circ < \varphi < 110^\circ$ $R = O_1 O_2$		$K = \frac{2 \cdot \pi \cdot O_1 O_2^3}{AB \cdot MN \cdot \sin \varphi}$	середина $AB$
Дипольная экваториальная установка (частный случай азимутальной установки, $\varphi = 90^\circ$ ) $R = O_1 O_2$		$K = \frac{2 \cdot \pi \cdot O_1 O_2^3}{AB \cdot MN}$	середина $AB$
Дипольная радиальная установка $AB < 0.2 O_1 O_2$ , $MN < 0.1 O_1 O_2$ , $-30^\circ < \varphi < 30^\circ$ $R = O_1 O_2 / 2$		$K = \frac{\pi \cdot O_1 O_2^3}{AB \cdot MN \cdot \cos \varphi}$	середина $MN$
Дипольная осевая установка (частный случай радиальной установки, $\varphi = 0^\circ$ ) $R = O_1 O_2 / 2$		$K = \frac{\pi \cdot O_1 O_2^3}{AB \cdot MN}$	середина $MN$

## 2.2 Методика польових робіт методом ЕТ

Електротомографія – це цілий комплекс, що містить в собі як методику польових спостережень, так і технологію обробки та інтерпретації польових даних. Її особливістю є багаторазове використання в якості живильних і вимірювальних одні і ті ж фіксовані на профілі спостережень положення електродів. Це призводить до зменшення загального числа робочих положень електродів при істотному збільшенні щільності вимірювань в порівнянні зі звичайним методом вертикальних електричних зондувань. Такий підхід дозволяє з одного боку, працювати з сучасною високопродуктивною апаратурою, а з іншого боку, застосовувати ефективні алгоритми моделювання та інверсії. Інтерпретацію даних електротомографії зазвичай проводять в рамках двомірних і тримірних моделей. Це принципово розширює коло завдань, що розв'язує електророзвідка, за рахунок дослідження середовищ, які значно відрізняються від «класичних» горизонтально-шаруватих.

Роздільна здатність (тобто кількість деталей геоелектричного розрізу, що стійко виявляються в електричному полі) і, відповідно, якість інтерпретації даних електротомографії тісно пов'язані з числом і щільністю вимірювань на одному профілі. Їх число зазвичай досягає перших тисяч, тому питання про продуктивність польових вимірювань має принципове значення і багато в чому визначає можливість практичного використання цього методу.

Для вивчення геоелектричних розрізів, що значно відрізняються від горизонтально-шаруватих, застосування електротомографії є необхідною умовою для надійної інтерпретації. Така складна будова зазвичай характерна для рудних зон і зон тектонічних порушень, зсувів, насипних і штучних ґрунтів в зонах міської забудови, багаторічномерзлих порід, при крутому стрибку шарів і при наявності карсту.

Особливостями електротомографії є вимірювання за допомогою системи електродів, задалегідь розміщених уздовж одного профілю на рівних відстанях один від одного. Перемикання електродів здійснюється спеціальним комутатором каналів. Основна мета даної методики – одночасне простежування



розрізу уздовж профілю і по глибині. У кожен момент часу здійснюється вимір з електророзвідувальною установкою, що володіє заданим розташуванням живильних і прийомних електродів, чинним розносом і положенням точки запису. Застосовуються установки: двохелектродна (AM), трьохелектродні односторонні або двосторонні (AMN+MNB), симетричні чотириелектродні Шлюмберже і Веннера і дипольна осьова (ABMN).

Окремою проблемою багатоелектродних спостережень є вибір установки. Деякі фахівці вважають за краще конкретну установку, інші – вважають, що всі установки рівнозначні, тому будь-яку з них можна розрахувати на основі вимірів з двоелектродною установкою AM. Багато хто вважає двухелектродну установку найзручнішою, оскільки на неї нібито мінімальний вплив надають приповерхневі неоднорідності. На наш погляд, найбільш зручні установки з виміром не потенціалу (U), а електричного поля (E). Потенціал-установка, що вимагає двох ліній нескінченності і вельми чутлива до електромагнітних завад, має більше недоліків, ніж переваг. Ця установка має слабшу, порівняно з градієнтними установками, чутливість як до горизонтальних, так і до вертикальних границь. Можливість перерахунку будь-якої установки з AM також сумнівна, тому що перерахунок здійснюється за допомогою диференціювання, а дані містять похибки. Отже, кращою є установка AMN+MNB, бо вона вимірює не потенціал, а електричне поле, поле одного точкового джерела, тобто більш просте, і дає два зображення, співставлення яких допомагає краще визначити положення глибинних неоднорідностей. При роботі на обмеженій площі, де немає умов для розміщення нескінченності, використовують дипольну осьову установку ABMN. Для цієї установки з рівними диполями друге зображення можна отримати зміщенням точки запису на основі принципу взаємності, тобто без додаткових вимірів.

Польові роботи виконувалися відповідно до вимог інструкції по електророзвідці [3] методом опорів одно-дипольною осьовою установкою. Схема польової установки приведена на рис. 2.2. Як приймач електромагнітного поля на частоті 1.22 Гц в приймальному диполі MN був використаний вимірювач ЕІН-209М. Розміри приймального і живильного

диполів становили 10 м. В якості джерела струму використовувався генератор ГЕР-1/300.

За результатами польових вимірювань отримано псевдорозрізи. Особливості побудови псевдорозрізів можна зрозуміти з рис. 2.3. Крайній зліва диполь використовується як живильний, а ряд диполів праворуч від нього як прийомні. Точка запису відноситься до середини розносу установки і до глибини  $Z$ , для знаходження якої з центрів диполів під кутом  $45^\circ$  проводять лінії до перетину в точці запису. При зміні розносу установки точка запису змінює свою глибину.

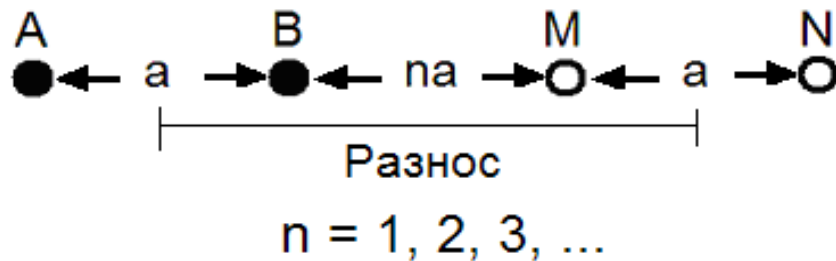


Рисунок 2.2 – Схема польової установки ЕТ

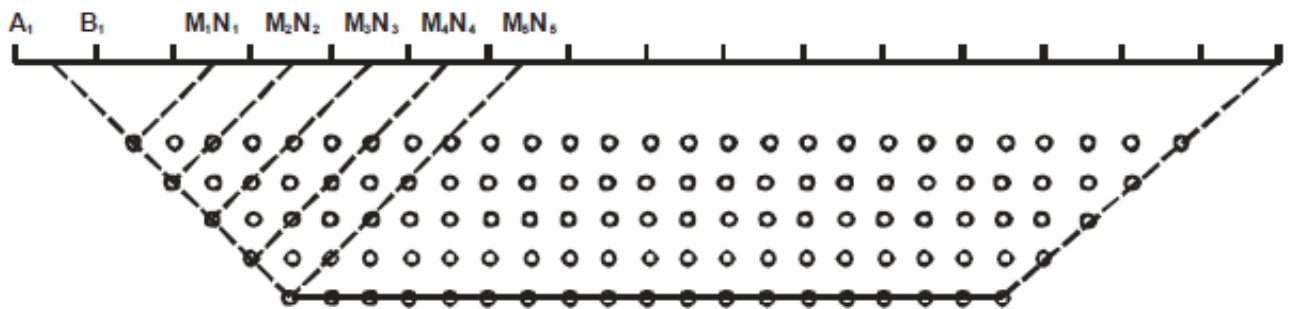


Рисунок 2.3 – Схема розташування точок запису на розрізі ЕТ

Сітка послідовних положень живильного і прийомних диполів утворює поле точок, в якому наносять значення  $r_k$  і проводять ізолінії, що відображають зміни геоелектричного розрізу по лінії профілю і в деякому інтервалі глибин. Природно, що псевдорозріз не дає точного уявлення про розподіл дійсних параметрів розрізу, а лише є простою і досить наочною формою відображення

результатів вимірювань. Сучасні багатоелектродні системи дозволяють збільшити інтервал простеження розрізу по глибині. Коли число каналів в межах однієї розстановки електродів виявляється вичерпаним, частина електродів переміщується по профілю таким чином, щоб отримати безперервне продовження псевдорозрізу (так звана установка, що котиться).

Вимірювання виконувалися вздовж чотирьох профілів на відмітках 57.5 м (профіль 1), 59.5 м (профіль 2), 63.0 м (профіль 3), 69.0 (профіль 4). Положення профілів наведено у Текстовому Додатку 3. Необхідно відзначити, що для отримання повного розрізу до глибини 30 м в інтервалі пікетів ПК13-ПК17, польові виміри виконувалися в інтервалі пікетів ПК12-ПК18.

Для контролю якості польових вимірювань, згідно [2], виконувалися контрольні вимірювання в обсязі 10% від їх загальної кількості.

### **2.3 Обробка результатів польових вимірювань методом ЕТ**

Вирішення оберненої задачі електророзвідки здійснювалося програмою res2Dinv [4]. Процедура інверсії, що використовується програмою, заснована на методі найменших квадратів з обмеженнями гладкості. Може бути також використана нова реалізація методу найменших квадратів, заснована на квазі-Ньютонівському методі оптимізації. Цей метод більш ніж в 10 разів швидший, ніж звичайний метод найменших квадратів для великих обсягів даних і вимагає менше пам'яті. Метод найменших квадратів з обмеженнями гладкості заснований на наступному рівнянні:

$$(JTJ + uF)d = Jg,$$

де  $F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$ ;  $f_x$  – горизонтальний згладжувальний фільтр;  $f_z$  – вертикальний згладжувальний фільтр;  $J$  – матриця часткових похідних;  $u$  – показник затухання;  $d$  – вектор збільшень параметрів моделі;  $g$  – вектор нев'язок. Однією з переваг цього методу є можливість налаштування показника загасання і згладжуючих фільтрів, щоб задовольнити різним типам даних.

Можливо також використання в цій програмі звичайного методу Гаусса-Ньютона. Він набагато повільніше, ніж квазі-Ньютонівський метод, але в місцях з контрастами опорів більше ніж 10:1, він дає кращі результати. Третьою

можливістю в цій програмі є використання методу Гаусса-Ньютона для перших двох – трьох ітерацій, після чого використовується квазі-Ньютонівський метод. У багатьох випадках це дає найкращий результат.

Двовимірна (2D) модель, яка використовується цією програмою, ділить напівпростір на ряд прямокутних блоків. Мета роботи програми полягає у визначенні опорів прямокутних блоків, що дають псевдорозріз уявних опорів, які співпадають з польовими вимірами. Для дипольної осьової установки потужність першого ряду блоків становить 0.3 розносу електродів. Потужність кожного глибшого шару зазвичай збільшується на 10% (або 25%). Глибини шарів також можуть бути змінені користувачем вручну. Метод оптимізації зазвичай намагається зменшити різницю значень уявного опору розрахованого і виміряного шляхом варіації опорів блоків моделі. Мірою цієї відмінності є середньоквадратична помилка (RMS). Однак модель з найменшою можливою помилкою RMS іноді може давати великі і нереальні зміни опорів моделі і не завжди може виявитися «найкращою» моделлю в геологічному відношенні. Загалом, найбільш розумним методом є вибір моделі для тієї ітерації, після якої помилка RMS вже не змінюється значно.

Для підвищення стійкості розв'язання оберненої задачі крок точок вимірювання вздовж профілів ET був згущений в два рази і прийнятий рівним 5 м.

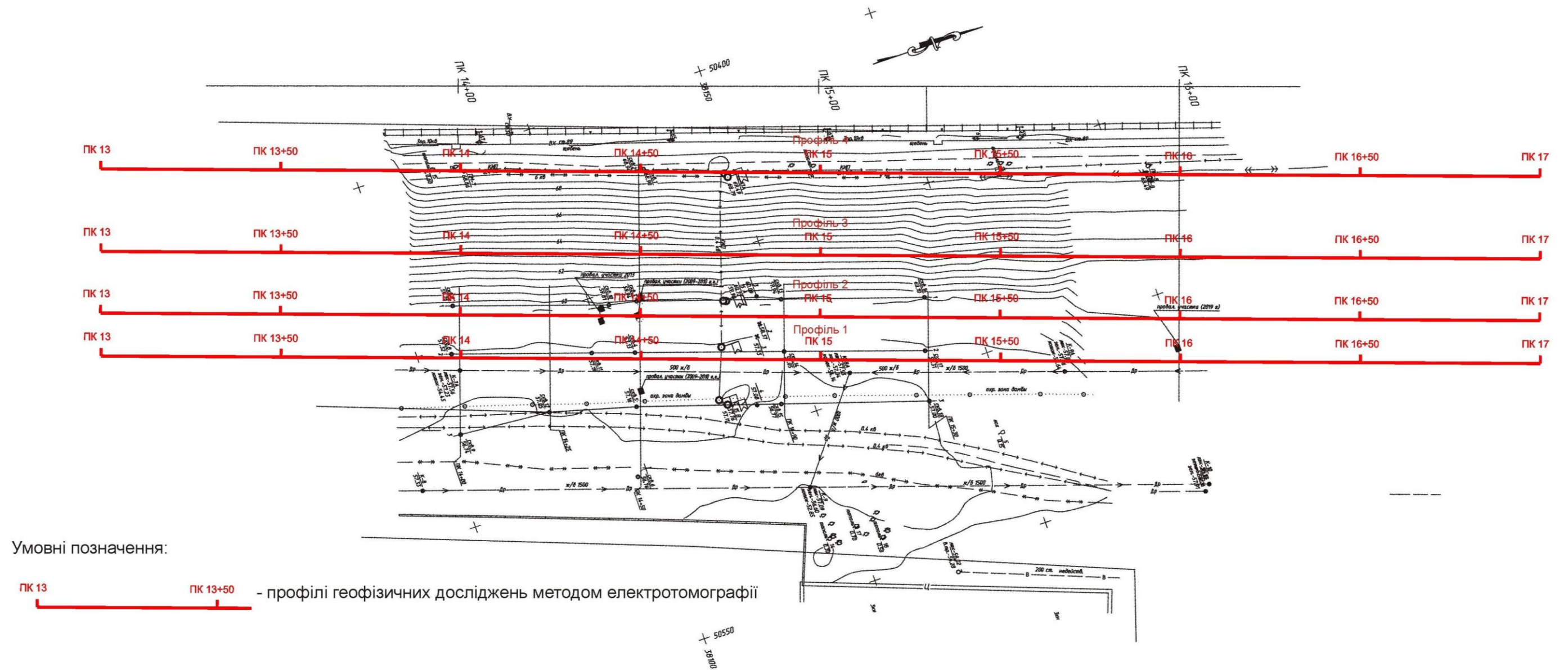


Рисунок 2.4 – Положення профілів електротомографії

## 2.4 Результати електророзвідувальних робіт методом ЕТ

Результати розв'язання оберненої задачі ЕТ у вигляді геоелектричних розрізів (розподіл питомого електричного опору ( $\rho$ ) середовища вздовж профілів до глибини 30 м) представлені на рисунку 2.5.

В зв'язку з тим, що вздовж профілю (в першу чергу по глибині) мають місце зміни питомого електричного опору ( $\rho$ ) у дуже широких межах (від десятків до тисяч Ом\*м), для зручності візуалізації та подальшої інтерпретації ізолінії на геоелектричних розрізах проведені у десятковому логарифмі значень питомого електричного опору ( $\rho$ ) –  $\lg(\rho)$ .

Загальний принцип інтерпретації геоелектричних розрізів – чим нижчі значення питомого опору ( $\rho$ ) або  $\lg(\rho)$ , тим більш вологим є ґрунт.

В результаті виконаних електророзвідувальних робіт локалізовано ряд аномальних зон в товщі техногенних ґрунтів і ґрунтів природної основи нижче кривої депресії.

На геоелектричних розрізах положення аномальних зон пониженого питомого опору показано червоною пунктирною лінією.

Аномальні зони знаходяться нижче кривої депресії і мають складну форму. При цьому, у верхньої частині розрізу (вище кривої депресії) не виявлено контрастних аномальних зон питомого електричного опору. В цілому, на геоелектричних розрізах уздовж профілів 1 – 3 зазначається наявність аномальних зон зниженого питомого електричного опору в інтервалі пікетів ПК13+75 – ПК16+50.

Для аномальних зон характерно зниження питомого електричного опору, яке, ймовірно, обумовлено виносом пилуватих і мулистих частинок за рахунок механічної суфозії і відносним зменшенням твердої частини в обсязі ґрунту в результаті фільтраційних процесів.

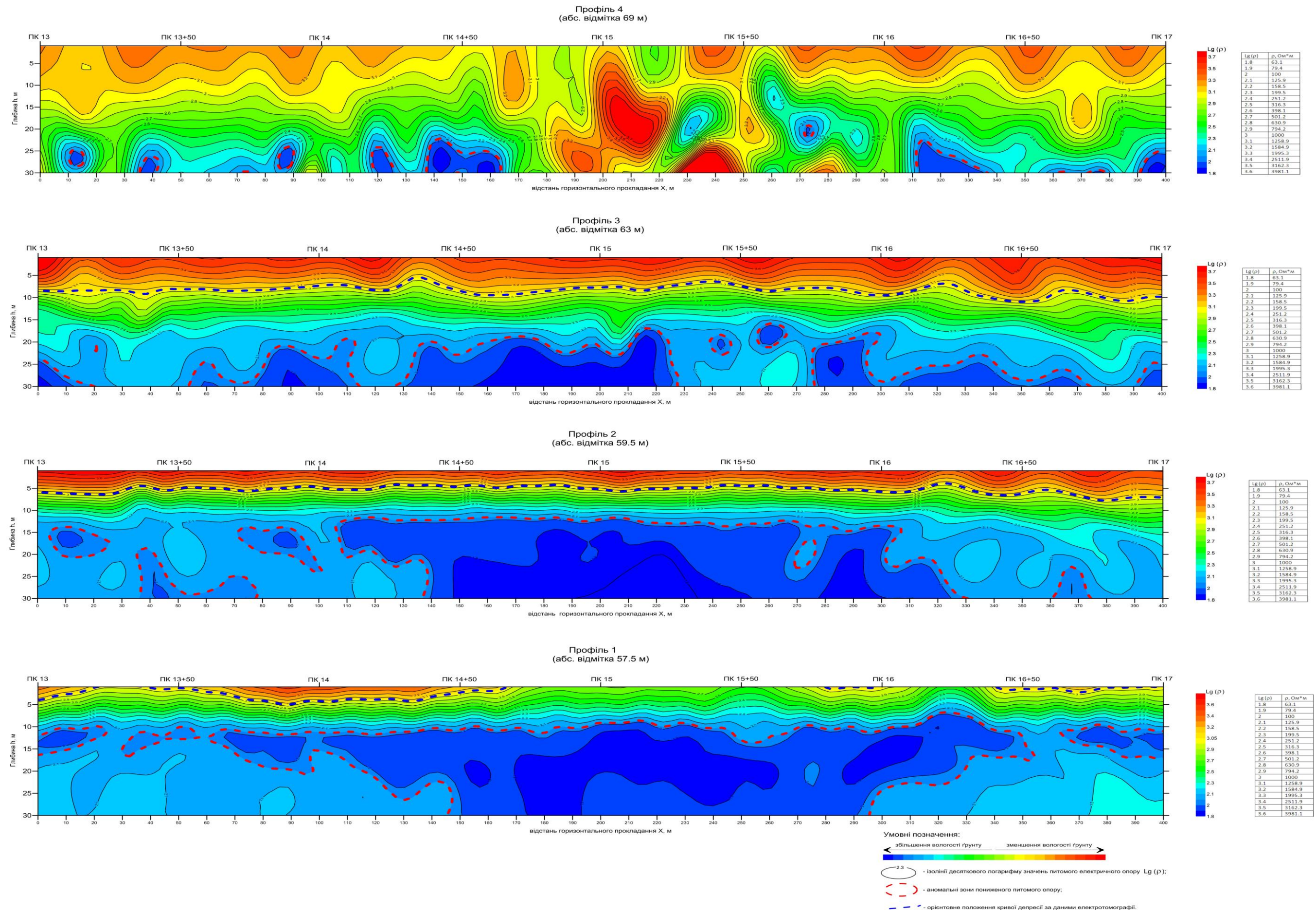


Рисунок 2.5 – Розподіл питомого електричного опору ( $\rho$ ) середовища вздовж профілів

### ГЛАВА 3 МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ГІДРОГЕОМЕХАНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ГРУНТОВОГО МАСИВУ ГІДРОТЕХНІЧНОЇ СПОРУДИ

#### 3.1 Процедура гідрогеомеханічного моделювання при вивченні стану грунтового масиву гідротехнічної споруди

Для оцінки гідрогеомеханічної стійкості низового укосу хвостосховища застосована реалізована у програмному комплексі Phase2 деформаційна пружно-пластична модель середовища з внутрішнім тертям, яка поєднує дві теорії, на яких базується сучасна механіка гірських порід: теорію пружності і теорію граничного стану [5].

Процедура чисельного рішення в методі кінцевих елементів заснована на передумові силової взаємодії між елементами модельованої області тільки у вузлових точках. При цьому умова безперервності середовища задовольняється нерозривністю вузлових зв'язків між елементами.

Деформування елементів обумовлене прикладанням з боку сусідніх елементів чи зовнішніх впливів вузлових сил  $F_i, F_j, F_k$ , кожна з яких розкладається на дві складові уздовж координатних осей. Залежність шести компонентів вузлових сил від шести компонентів вузлових переміщень встановлена виходячи з відомого в будівельній механіці принципу можливих переміщень: при нескінченно малому переміщенні вузлових точок робота вузлових сил повинна дорівнювати роботі внутрішніх напружень.

Результатом чисельного рішення є встановлення переміщень вузлів моделі виходячи з заданих вузлових сил, обумовлених зовнішнім навантаженням і власною вагою елементів моделі. За встановленими значеннями переміщень розраховуються осьові і головні деформації і відповідні їм напруження.

У скороченій формі рівняння кінцевих елементів може бути представлено у вигляді:

$$K \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_n \end{Bmatrix} = F \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_n \end{Bmatrix},$$

(3.1)



де  $\mathbf{K}^-$  – матриця жорсткості;  $\mathbf{a}^-$  – вектор вузлових переміщень;  $\mathbf{R}^-$  – вектор вузлових навантажень;  $\mathbf{R}_b^-$  – власна вага ґрунту;  $\mathbf{R}_s^-$  – сили поверхневого тиску;  $\mathbf{R}_i^-$  – зосереджена вузлова сила.

Матриця жорсткості визначається наступним чином:

$$\mathbf{K}^- = \int_v \mathbf{B}_T^- \mathbf{C}^- \mathbf{B}^- dv, \quad (3.2)$$

де  $\mathbf{B}^-$  – матриця "напруження-деформації";  $\mathbf{C}^-$  – матриця пружності.

Вектор деформацій визначається з наступного виразу:

$$\mathbf{a}^- = \mathbf{B}^- \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}, \quad (3.3)$$

де  $u, v$  – вузлові переміщення в напрямках осей  $X$  і  $Y$  відповідно.

Вектор деформації також визначається складовими:

$$\mathbf{a}^- = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (3.4)$$

Для завдання плоскої деформації  $\varepsilon_z$  дорівнює нулю, і матриця деформацій має вигляд:

$$\mathbf{B}^- = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial N_8}{\partial y} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial y} & \frac{\partial N_8}{\partial x} \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Відповідно до теорії пружності основна формула залежності напружень і деформацій має вигляд:

$$\mathbf{\sigma} = \mathbf{\Gamma}^{-1} \mathbf{\varepsilon},$$

(3.6)

де  $\mathbf{\Gamma}^{-1}$  – матриця пружності, що визначається за такою залежністю:

$$\mathbf{\Gamma}^{-1} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix},$$

(3.7)

де  $E$  – модуль Юнга (модуль пружності);  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Напруження обчислюються в кожній точці сітки кінцевих елементів за допомогою матриці  $\mathbf{\Gamma}^{-1}$  наступним чином:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \mathbf{\Gamma}^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}.$$

(3.8)

В результаті перетворення формул (3.8) і (3.9) отримуємо формулу для визначення напружень і деформацій:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}.$$

(3.9)

Врахування граничного стану модельованого масиву гірських порід і реалізація пластичної течії в області позамежних деформацій у чисельній моделі базується на методі початкових напружень, який полягає в наступному.

Чисельне рішення досягається при початково заданих пружних властивостях середовища і постійній матриці жорсткості системи.

В умовах плоскої деформації при напруженнях у середовищі, що не перевищують заданого граничного рівня, зв'язок напружень і деформацій описується законом Гука:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= E_n \left[ \epsilon_1 + \nu_n \epsilon_3 \right] \left[ -\nu_n^2 \right], \\ \sigma_3 &= E_n \left[ \epsilon_3 + \nu_n \epsilon_1 \right] \left[ -\nu_n^2 \right],\end{aligned}$$

(3.10)

де  $\sigma_1$  і  $\sigma_3$  – відповідно найбільше і найменше головні напруження;

$E_n = E / \left[ -\nu^2 \right]$ ,  $\nu_n = \nu \left[ -\nu \right]$  – "плоскі" аналоги відповідно модуля деформації  $E$  і коефіцієнта Пуассона  $\nu$ .

В області розтягання граничні деформації обмежуються міцністю на розтягання  $T$  ( $T < 0$ ):

$$\sigma_3 = T,$$

(3.11)

а в області стискання – критерієм Кулона-Мора:

$$\sigma_1 = S + \sigma_3 \text{Ctg} \varphi,$$

(3.12)

де  $S = 2C \text{Ctg} \left[ 45 - \varphi / 2 \right]$ ,  $\text{Ctg} \varphi = \left[ + \text{Sin} \varphi \right] \left[ - \text{Sin} \varphi \right]$ ;  $C$  і  $\varphi$  – відповідно питоме зчеплення і кут внутрішнього тертя.

При виході деформованого стану елемента середовища на границю зони пружності напруження в елементі контролюються рівняннями стану, що на ділянці поза межних деформацій встановлені щодо головних напружень  $\sigma_1^T$  і  $\sigma_3^T$ :

$$\sigma_3^T = \left[ E_n \left[ \epsilon_1 + \epsilon_3 \right] + S \left[ \nu_n - 1 \right] \right] \left[ -\nu_n \text{Ctg} \beta + \text{Ctg} \beta - \nu_n \right],$$

(3.13)

$$\sigma_1^T = S + \text{Ctg} \psi \sigma_3^T.$$

(3.14)

Кут  $\beta$  визначає закон пластичної течії: при значенні  $\beta$ , встановленому для моделі рівним  $\psi$ , течія є асоційованою, що дозволяє врахувати розуцільнення порід в області поза межних деформацій.

Величини головних напружень  $\sigma_1^T$  і  $\sigma_3^T$  представляють собою відповідні досягнутому рівню деформацій теоретичні напруження, до яких прагне чисельне рішення на  $i$ -ому кроці ітераційного процесу.

Крім того, в моделі передбачена можливість дослідження областей розривів, які фіксуються на ділянках деформацій розтягнення за умовою (3.11).

Реалізований в програмному комплексі Phase2 спільно з методом кінцевих елементів метод зниження параметрів міцності при оцінці запасу стійкості породного масиву забезпечує можливість одночасного визначення положення поверхні ковзання і коефіцієнта стійкості при відсутності будь-яких обмежень щодо геометрії механізму руйнування.

Згідно методу, що використовується, розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості знаходиться з відношення максимально можливої міцності ґрунту до мінімального значення, необхідного для забезпечення рівноваги

$$k_s = \frac{\tau_{гран}}{\tau_{діюч}}.$$

(3.15)

При поданні формули (3.15) у вигляді стандартної умови Кулона-Мора вона набуває вигляду:

$$k_s = \frac{\sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi + C}{\sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_r + C_r},$$

(3.16)

де  $C$  і  $\varphi$  – вихідні параметри міцності – відповідно питоме зчеплення і кут внутрішнього тертя;  $\sigma_n$  – фактичне нормальне напруження;  $C_r$  і  $\varphi_r$  – параметри міцності, знижені в ході розрахунку до мінімальних значень, достатніх для підтримки рівноваги.

При цьому в умовах дії порового тиску розрахунок зсувної міцності ґрунту  $\tau_r$  проводиться з використанням критерію міцності Кулона-Мора, поданого у вигляді:

$$\tau_r = \sigma_n - u \operatorname{tg} \varphi + C,$$

(3.17)

де  $u$  – поровий тиск.

Метод зниження міцності за принципом розрахунку схожий з методом Р.Р. Чугаєва, відомим в гідротехнічному будівництві. У розрахунковій схемі прогноз руйнування здійснюється шляхом одночасного зниження обох показників зсувної міцності:

$$C_r = \frac{C}{k},$$

(3.18)

$$\varphi_r = \frac{\varphi}{k},$$

(3.19)

де  $k$  – коефіцієнт зниження міцності, відповідний коефіцієнту стійкості в момент руйнування.

Перевагою використання методу зниження міцності є його єдність з іншими можливостями чисельного моделювання, що дозволяє прийняти до уваги занурену частину укосів при розрахунку стійкості на слабких (стисливих) ґрунтах з урахуванням процесів консолідації основи і його зміцнення, а також виконувати розрахунок стійкості з урахуванням надлишкового парового тиску, що формує "відпір" в центральній частині укосів і сприяє зниженню їх стійкості.

### **3.2 Розрахункова схематизація та методика розрахунків**

Гідрогеомеханічне моделювання для гідротехнічної споруди і оцінка її гідрогеомеханічної стійкості виконано для розрізу наведеного на рис. 1.5.

Розрахунки виконувались для двох моделей:

1. модель без ослабленої зони;
2. модель з ослабленою зоною за даними електротомографії.

Гідродинамічні розрахунки виконані для стаціонарного режиму фільтрації в умовах насичено-ненасиченого ґрунтового потоку. Значення гідравлічної проникності розрахункових різностей ґрунтів в основі

гідротехнічної споруди та матеріалу дамби прийняті за даними інженерно-геологічних вишукувань.

При виконанні розрахункової схематизації до уваги були прийняті геометричні розміри греблі та особливості геологічної будови її низового укосу, характер залягання породних шарів в тілі ґрунтової греблі та її основі, положення основних гідродинамічних елементів (елементів дренажної системи), що визначають деформації гідравлічного потоку в межах ділянок розрахункового профілю.

На рисунках 3.1 – 3.5 наведено геометричні параметри моделей, їх кінцево-елементні апроксимації та розрахункові фізико-механічні параметри моделі.

Методика розрахунку стійкості гідротехнічної споруди передбачала вирішення прямих гідрогемеханічних задач, які на першому етапі полягали в оцінці напружено-деформованого стану, на другому – оцінці її стійкості в умовах дії основного навантаження.

Відповідно до класу (підкласу) відповідальності ССЗ, до якого віднесено задану гідротехнічну споруду, для періоду експлуатації при основному розрахунковому сполученні навантажень для категорії відповідальності конструкції та її елементів [16] значення нормованого коефіцієнту надійності згідно з ДБН В.2.4-3:2010 [18] становить  $\gamma_n = 1,25$ .

Для забезпечення просторової визначеності модельованих масивів на бічних границях розрахункових профілів задавались нульові горизонтальні переміщення, а на їх нижньому контурі – нульові горизонтальні і вертикальні переміщення. Силова взаємодія між елементами моделі визначалася гравітаційними (об'ємними) силами в ґрунтовій товщі.

У загальному вигляді чисельні моделі в межах оцінюваних профілів представлені трикутними шестивузловими кінцевими елементами 6 типів відповідно до геолого-літологічного складу та властивостей ґрунтів основи та матеріалу греблі.

Основними параметрами, що визначають стан модельованого масиву і його поведінку в умовах пружно-пластичного деформування, є питома вага  $\gamma$ , модуль деформації  $E$ , коефіцієнт Пуассона  $\nu$ , питома зчеплення  $C$  і кут внутрішнього тертя  $\varphi$ , тобто набір характеристик, одержуваних при проведенні стандартного комплексу інженерно-геологічних вишукувань.

Прийняті до розрахунку значення фізико-механічних характеристик літологічних різностей, встановлені за результатами статистичної обробки вибірових даних з урахуванням коефіцієнта надійності по ґрунту  $\gamma_m \in \text{—}$  для першої групи граничних станів.

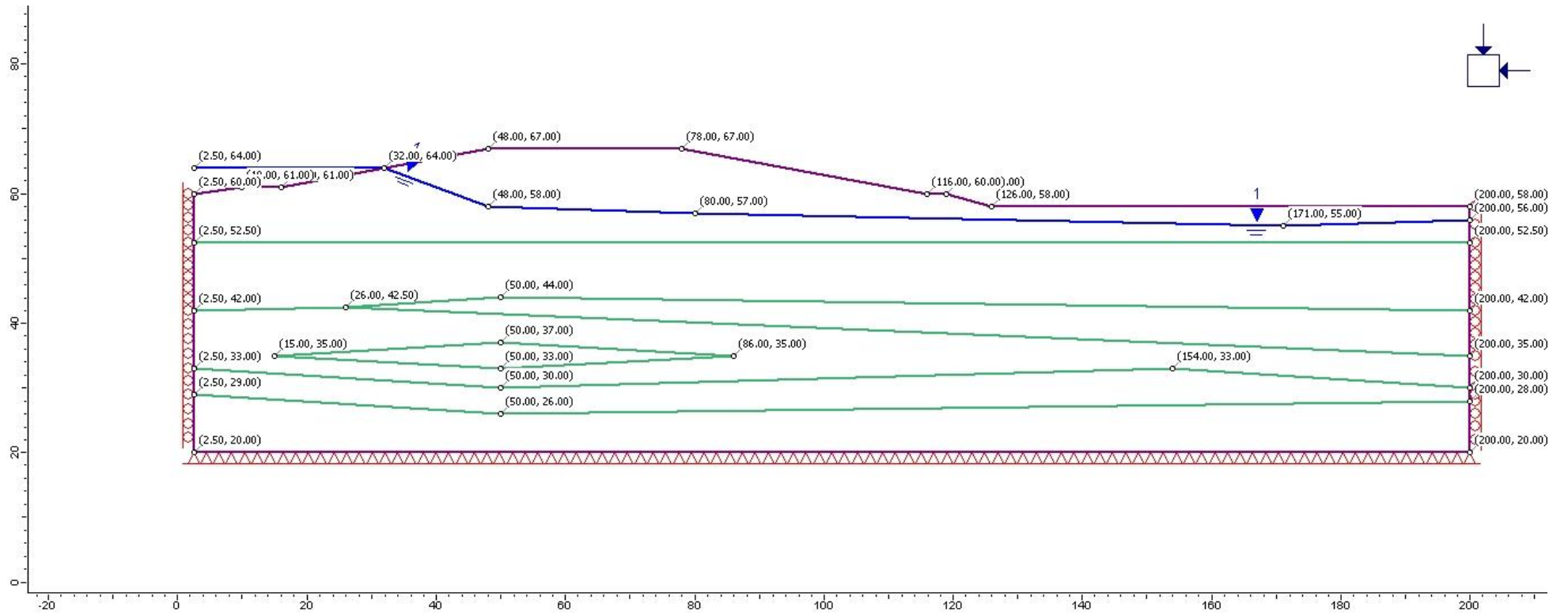


Рисунок 3.1 – Геометричні параметри моделі (без ослабленої зони)



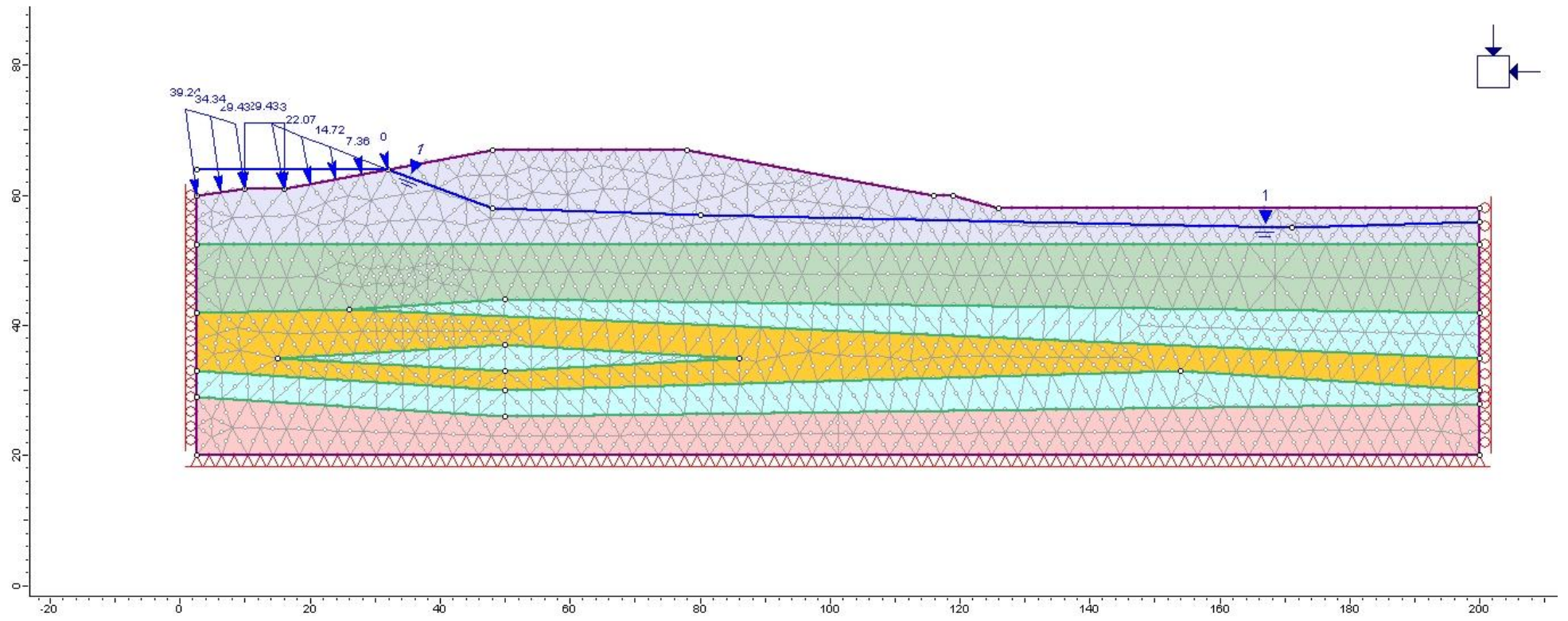


Рисунок 3.2 – Кінцево-елементна апроксимація моделі (без ослабленої зони)

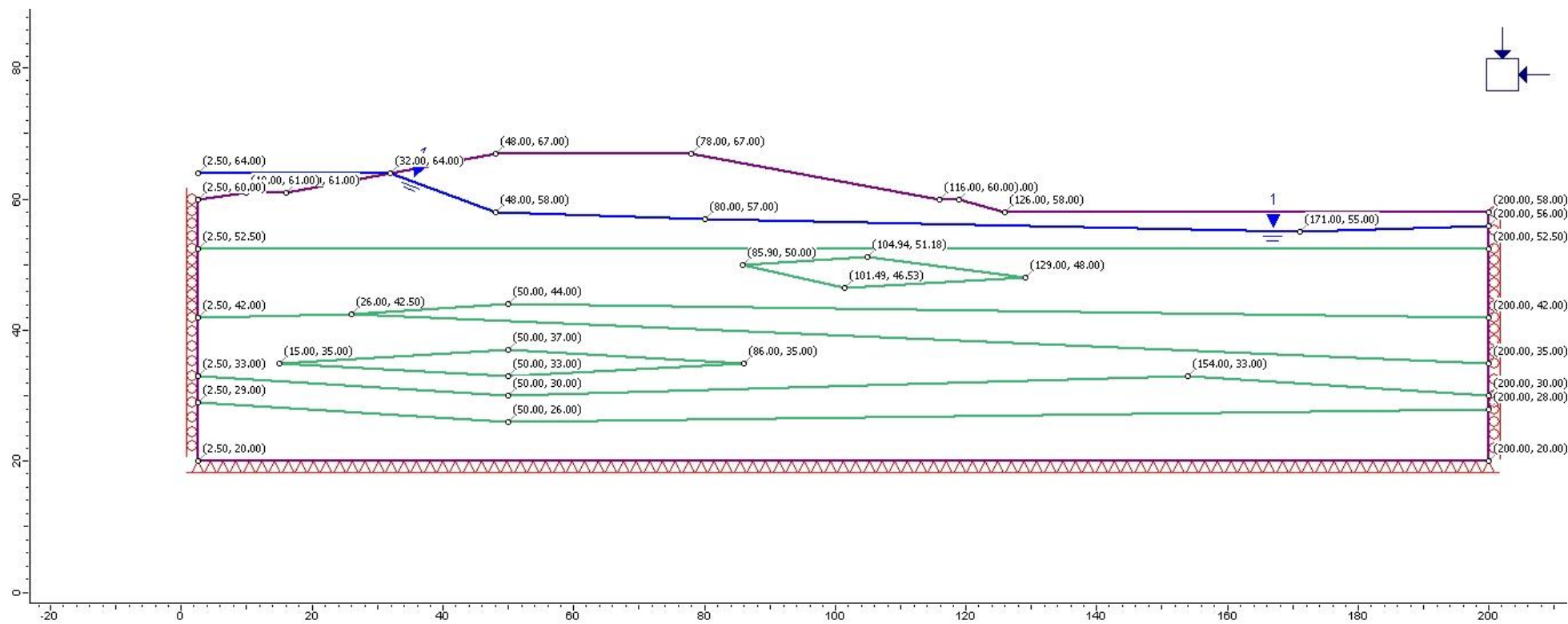


Рисунок 3.3 – Геометричні параметри моделі (з ослабленою зоною за даними електротомографії)

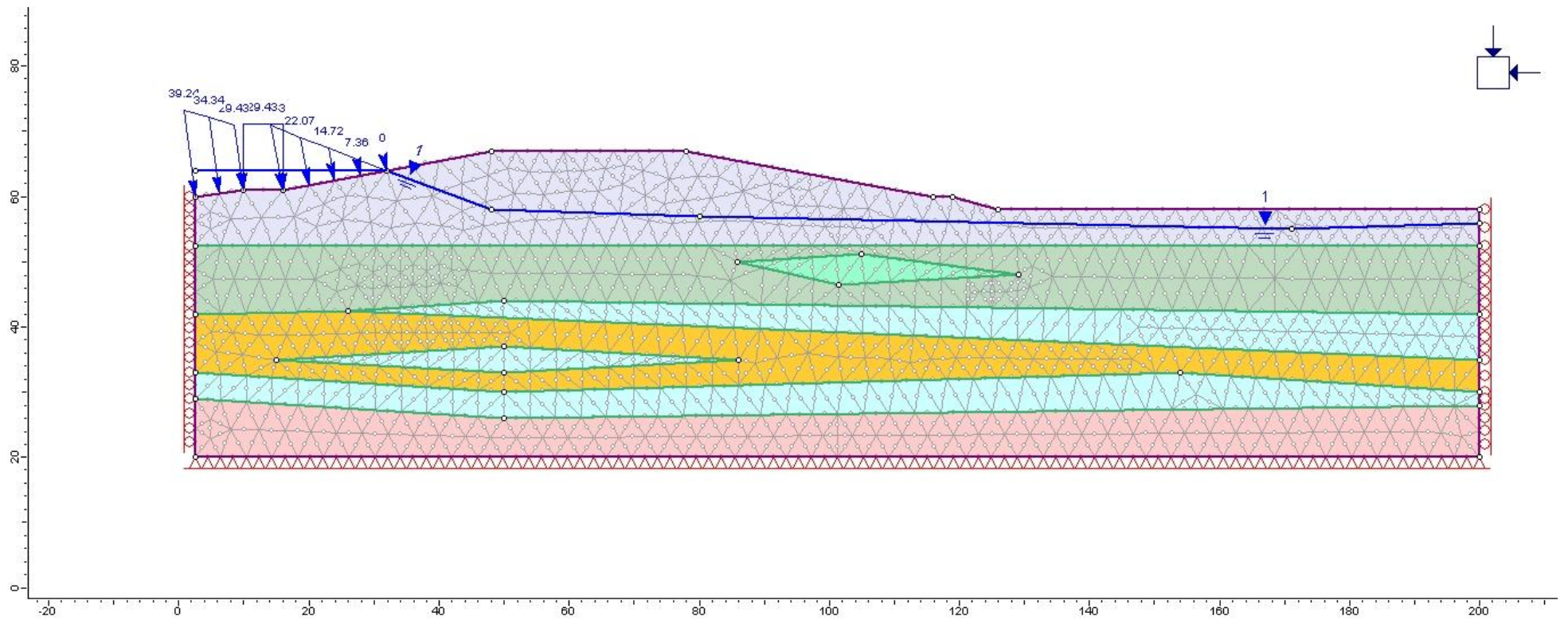


Рисунок 3.4 – Кінцево-елементна апроксимація моделі (з ослабленою зоною за даними електротомографії)







Material Name	Color	Initial Element Loading	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Elastic Type	Young's Modulus (kPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Tensile Strength (kPa)	Dilation Angle (deg)	Friction Angle (peak) (deg)	Friction Angle (residual) (deg)	Cohesion (peak) (kPa)	Cohesion (residual) (kPa)	Piezo Line	Hu
Пісок дрібний ( гребля)		Field Stress and Body Force	19.4	Isotropic	23000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	26.4	26.4	0.7	0.7	1	1
Пісок дрібний		Field Stress and Body Force	19.8	Isotropic	30000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	28.2	28.2	1.2	1.2	1	1
Пісок середній		Field Stress and Body Force	20.2	Isotropic	40000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	33.6	33.6	1.5	1.5	1	1
Суглинок		Field Stress and Body Force	20.1	Isotropic	25000	0.33	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	10	10	47	47	1	1
Граніт		Field Stress and Body Force	30.4	Isotropic	1.32e+008	0.25	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	34.5	34.5	34000	34000	1	1
Пісок розпушений		Field Stress and Body Force	19	Isotropic	28000	0.3	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	21.2	21.2	0.1	0.1	1	1

Рисунок 3.5 – Розрахункові значення фізико-механічних характеристик ґрунтів основи і матеріалу конструктивних елементів гідротехнічної споруди

### 3.3 Результати розрахунку гідрогеомеханічної стійкості гідротехнічної споруди

За результатами виконаних розрахунків встановлено, що в умовах відсутності зафіксованої за даними електротомографії ослабленої зони в основі гідротехнічної споруди розвиток зсувних деформацій можливий у низовому укосі греблі, причому, призма зсуву для даних умов характеризується її розташуванням вище кривої гідравлічної депресії в тілі греблі і її ґрунтовій основі. Завдяки цьому для ділянки низового укосу ґрунтової греблі встановлена за результатами гідрогеомеханічного моделювання величина коефіцієнту запасу стійкості становить  $k_s = 2,88$ , що значно перевищує її нормовану величину, рівну  $\gamma_n = 1,25$ .

Характер деформування ґрунтової греблі при можливому розвитку зсувних процесів в умовах, що розглядаються, наведено на рис. 3.6, а зони максимальних зсувних напружень, що відповідають положенню вірогідних зсувних деформацій в тілі греблі – на рис. 3.7.

За наявності в ґрунтовій основі греблі ослабленої зони, встановленої за даними електротомографії на глибині близько 7,0 - 8,0 м від подошви гідротехнічної споруди, очікуваний розвиток зсувних деформацій в межах контуру низового укосу може охоплювати ділянку, еквівалентну за розмірами ґрунтовій греблі, а зсувне деформування відбуватися безпосередньо в межах обводненої товщі ґрунтів природного залягання.

Особливості розвитку зсувних деформацій, що відповідають умові досягнення граничної стійкості, ілюструються рис. 3.8 і 3.9.

Величина коефіцієнту запасу стійкості за наявності ослабленої зони в основі гідротехнічної споруди, встановлена за даними моделювання, становить  $k_s = 2,77$ . Оскільки отримана величина перевищує нормативне значення  $\gamma_n = 1,25$ , то і за наявності ослабленої зони в ґрунтовій основі греблі також буде забезпечуватись її стійкість.

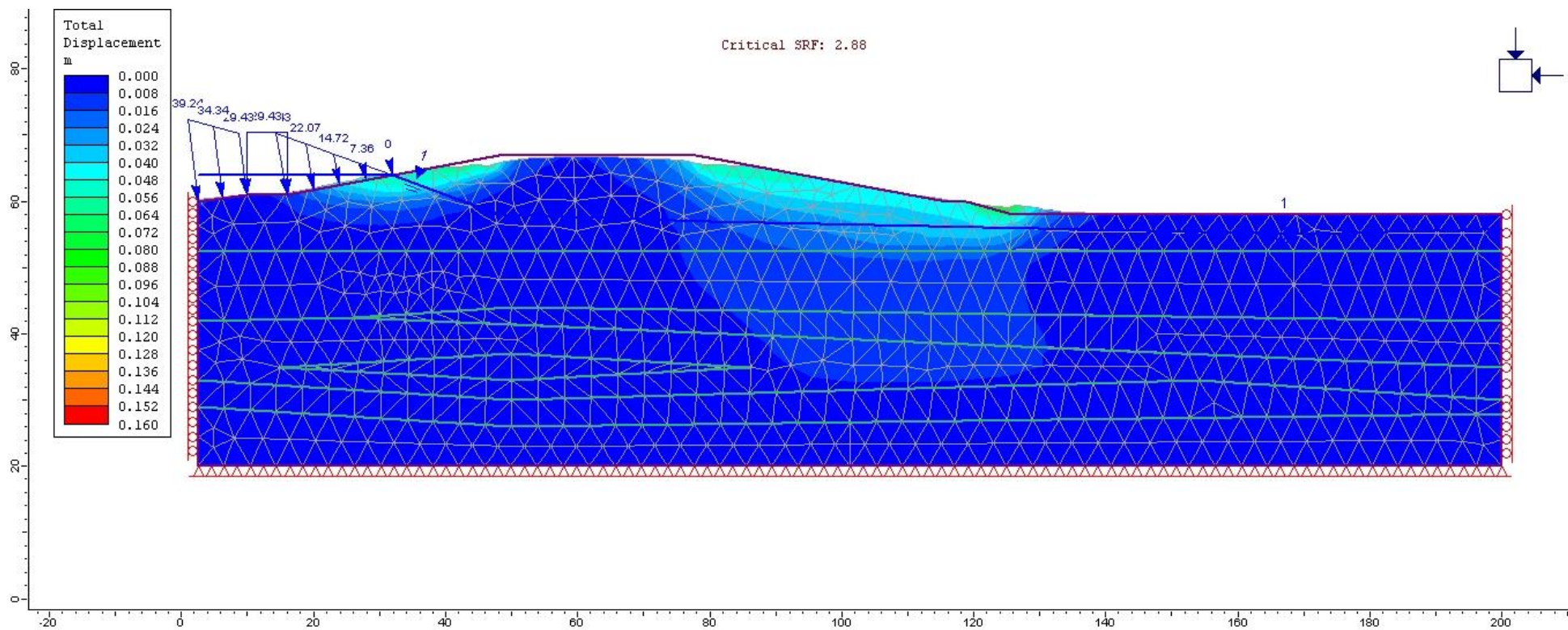


Рисунок 3.6 – Модуль вектора переміщень (модель без ослабленої зони)

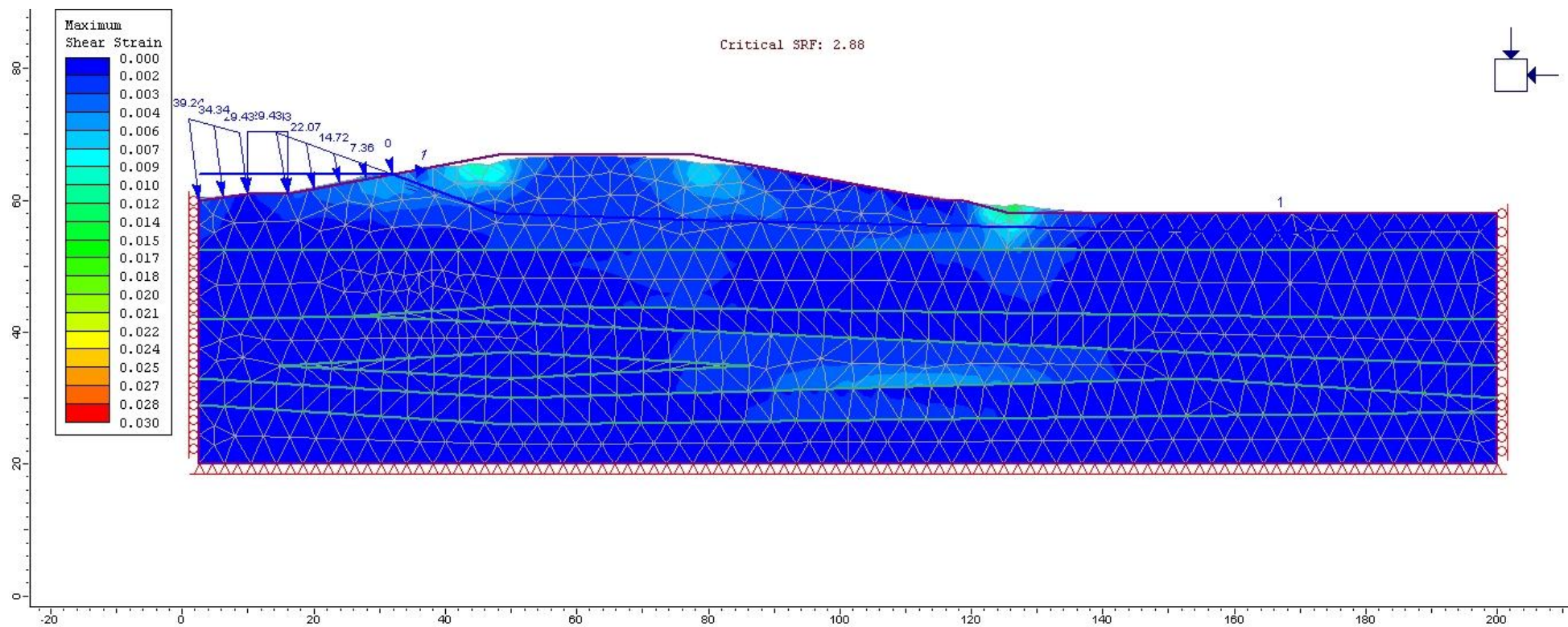


Рисунок 3.7 – Максимальні зсувні напруження (модель без ослабленої зони)

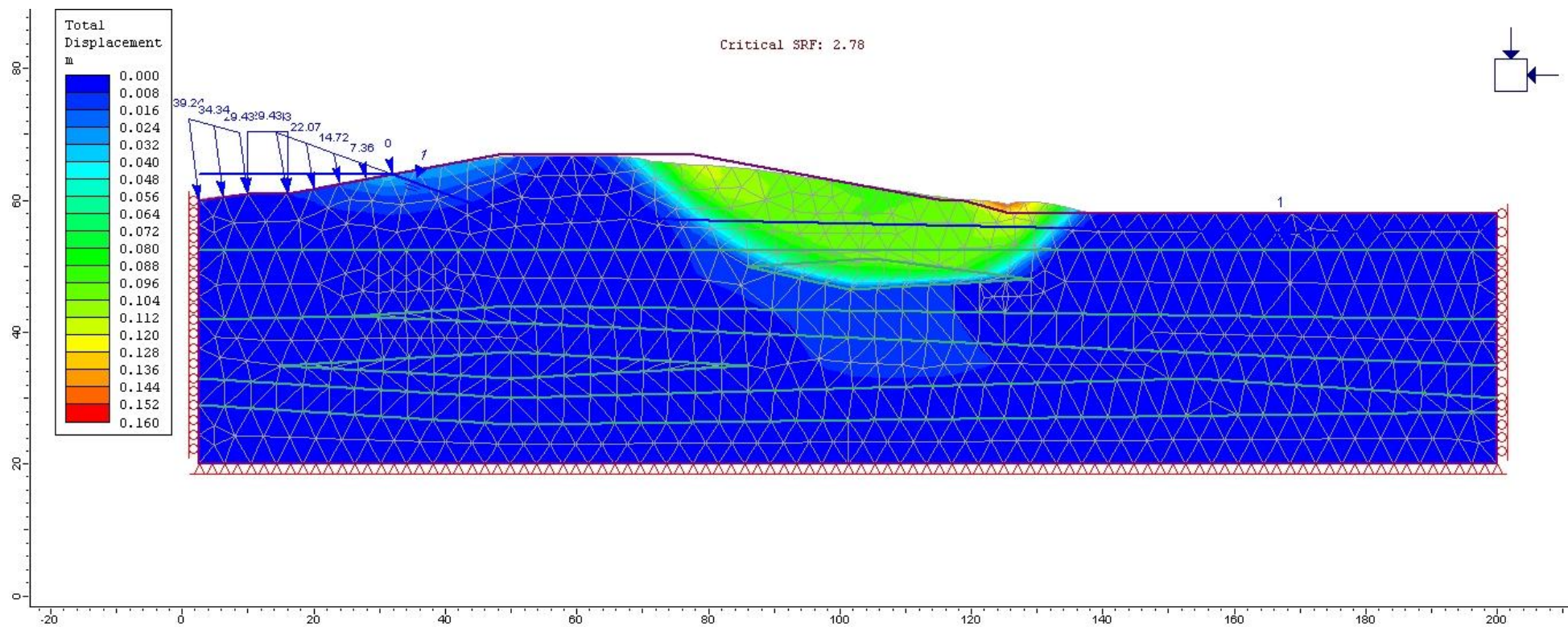


Рисунок 3.8 – Модуль вектора переміщень (модель з ослабленою зоною за даними електротомографії)



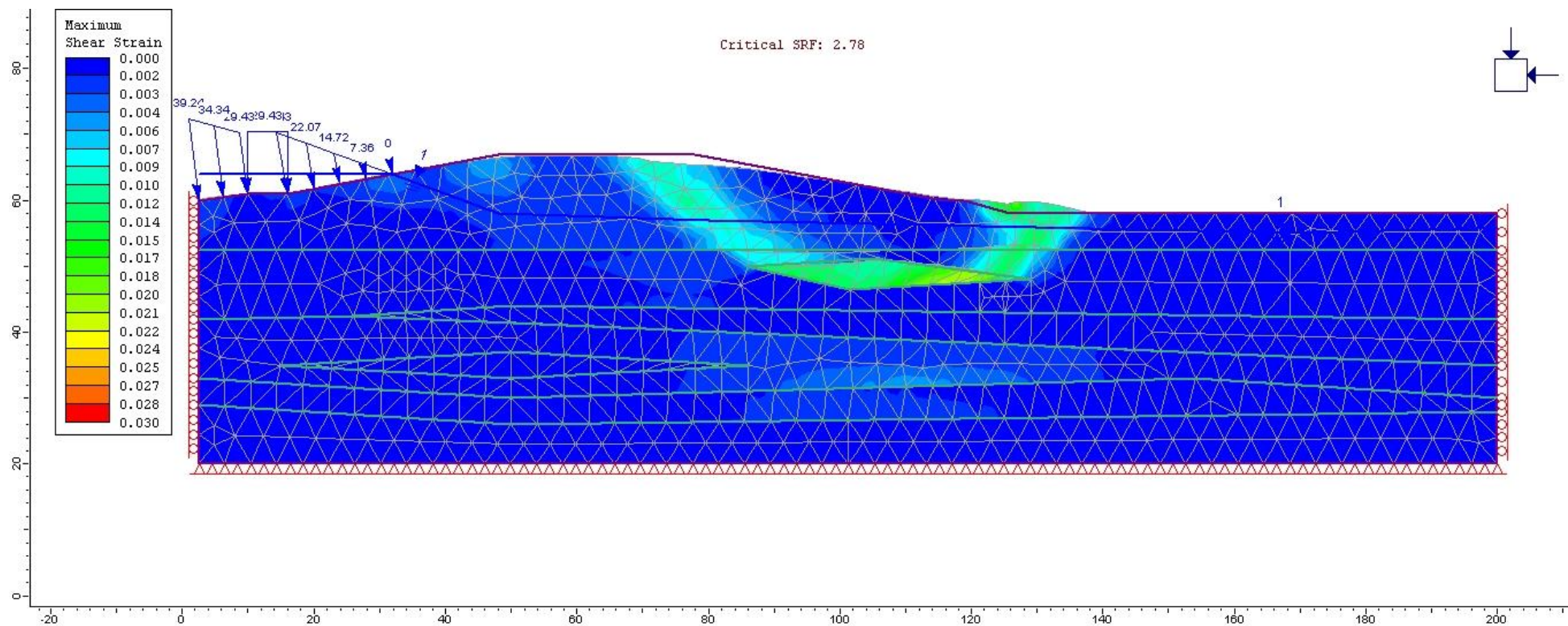


Рисунок 3.9 – Максимальні зсувні напруження (модель з ослабленою зоною за даними електротомографії)

Однак, отримані результати гідрогеомеханічного моделювання свідчать також про існуючу можливість розвитку зсувних деформацій у низовому укосі греблі та досягнення ними ослабленої зони, встановленої за даними електророзвідувальних досліджень. Це дозволяє рекомендувати проведення моніторингових електророзвідувальних робіт з періодичністю один раз на рік.

Подібні роботи дозволять не тільки локалізувати найбільш проблемні ділянки, а й вивчити динаміку зміни стану ґрунтового масиву в тілі греблі і природної основи.

## ВИСНОВКИ

В дипломній роботі проаналізовано результати геофізичних робіт з електротомографії та виконано гідрогеомеханічне моделювання на низовому укосі гідротехнічної споруди з метою визначення причин провальних явищ.

Встановлено, що однією з причин розвитку деформацій осідань і локальних провалів в межах низового укосу греблі, складеної піщаними ґрунтами, може бути механічна суфозія, яка виникає під дією фільтрації підземних вод в тілі греблі. Умовою для її виникнення є наявність в ґрунтовому розрізі різнозернистих пісків, що містять прошарки і лінзи пілуватих та мулистих піщаних різностей, частинки яких під впливом гідравлічного градієнту приходять до руху і виносяться за межі низового укосу до елементів дренажних споруд. Такий висновок добре узгоджується з оцінкою гранулометричного складу пісків, намитих в тіло греблі: дрібні – 70% від загального числа відібраних проб, а піски середньої крупності – 30%, а також з наявністю винесення піску в закритий трубчастий дренаж пригреблевої території правобережної греблі. На геоелектричних розрізах уздовж профілів 1 – 3 зазначається наявність аномальної зони зниженого питомого електричного опору в інтервалі пікетів ПК13+75 – ПК16+50. Аномальна зона знаходиться нижче кривої депресії і має складну форму. На геоелектричних розрізах положення аномальних зон пониженого питомого опору показано червоною пунктирною лінією. Судячи з усього, зазначена аномальна зона обумовлена виносом пілуватих і мулистих частинок за рахунок механічної суфозії і відносним зменшенням твердої частини в обсязі ґрунту нижче кривої депресії.

На розвиток процесів механічної суфозії на низовому укосі може також впливати коливання рівня води на верхньому б'єфі ґрунтової греблі, що в умовах недостатнього ущільнення ґрунтів в тілі греблі буде сприяти періодичному зважуванню частинок ґрунту зі створенням можливостей для їх руху. В останньому випадку це пов'язано зі зменшенням ефективних напружень (або утримуючих сил) в ґрунтовому масиві при збільшенні

нейтральних напружень – сил гідростатичного зважування. Дійсно, мали місце такі особливості наміву частини греблі, де мають місце процеси провалоутворення.

Отримані результати електророзвідувальних досліджень і гідрогеомеханічного моделювання дозволяють рекомендувати проведення моніторингових електророзвідувальних робіт з періодичністю раз на рік. Подібні роботи дозволять не тільки локалізувати найбільш проблемні ділянки, а й вивчити динаміку зміни стану ґрунтового масиву в тілі греблі і природної основи.

## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- [1] Геологическая карта СССР м-ба 1:200000. Серия Центрально-Украинская. Лист М-36-XXXV / М-во геологии и охраны недр СССР. – Л.: Госгеолтехиздат, 1959.
- [2] Инструкция по электроразведке / М-во геологии СССР. – Л.: Недра, 1984.
- [3] Якубовский Ю. В., Ляхов Л. Л. Электроразведка. – Москва, «Недра», 1982.
- [4] Loke M.H. Time-lapse resistivity imaging inversion. 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society European Section Proceedings. Em1. – 1999.
- [5] <https://www.scribd.com>