ГЕОФІЗИКА

УДК 550.837

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.90.05>

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: vsa@univ.net.ua;

В. Онищук, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: vitus16@ukr.net;

І. Онищук, канд. геол. наук, старш. наук. співроб.,

E-mail: oivan1@ukr.net;

М. Рева, канд. фіз.-мат. наук, доц.,

E-mail: mvreva@gmail.com;

О. Шабатура, канд. геол. наук,

E-mail: dard@ukr.net;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна**ГЕОФІЗИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗСУВНИХ ТЕРИТОРІЙ ПРАВОГО БЕРЕГА РІЧКИ ДНІПРО
(ЛІСОСТЕПОВА ЗОНА)***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М.І. Орлюком)*

Присвячено висвітленню методичних принципів застосування геофізичних методів досліджень при вивченні зсувних територій. Наводяться геолого-геофізичні моделі зсувних ділянок. Наведено завдання, що ставляться при спеціалізованих дослідженнях зсувів, і геофізичні методи їхнього вирішення. Виділено три етапи спеціалізованих досліджень зсувних процесів: рекогносцирувально-методичний, детальний та моніторинговий, визначено комплекс геофізичних методів досліджень для цих етапів.

Наголошено, що раціональний комплекс геофізичних методів при дослідженні зсувних процесів визначається для кожної окремої природної обстановки (окремої ділянки) з урахуванням: можливості виконання польових досліджень окремим геофізичним методом на даній ділянці; наявності диференціації порід за фізичними властивостями, що використовуються конкретним геофізичним методом; економічної ефективності застосування даного геофізичного методу.

Для прикладу наведено деякі результати геофізичних досліджень, виконаних на характерних зсувних ділянках у межах правого берега р. Дніпро лісостепової зони України поблизу Трипільської теплоелектростанції.

Ключові слова: інженерно-геофізичні дослідження, зсуви, електричний опір, мікроелектрозондування, геолого-геофізичні моделі.

Постановка проблеми. В останній час міські території привертають увагу з необхідності оцінки ризику прояву небезпечних природних і природно-техногенних явищ і процесів, що становлять загрозу для безпечного проживання людини та функціонування об'єктів господарської інфраструктури. Для території міських агломерацій найбільш суттєвими є такі процеси: сучасні повільні тектонічні (вертикальні й горизонтальні) та сейсмічні рухи земної кори; активізація крипових рухів по розломах – з ендегенної групи; гравітаційні (зсуви), ерозійні та суфозійно-просадкові, заболочування – з екзогенної групи. Останнім часом набувають важливого значення такі загрозові явища природно-техногенного та техногенного походження, як підтоплення, осідання ґрунту внаслідок ущільнення порід підвалин споруд тощо.

Слід зазначити, що зсувні процеси належать до категорії найбільш небезпечних і широко розповсюджених екзогенних геологічних явищ. Унаслідок циклічності активізації та катастрофічності проявів зсувні процеси створюють постійну загрозу виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенного, природного і техногенно-природного характеру. Вивчати їх – означає визначати ті послідовні зміни складу і властивостей гірських порід, які виражають деякі об'єктивні закономірності, без знання яких неможливе досягнення головної мети – наукового прогнозу розвитку зсувних процесів. Регіональне вивчення зсувних процесів базується на аналізі інженерно-геологічних умов території, історії її геологічного розвитку, кліматичних умов, а також окремих космічних факторів (циклічність сонячної активності, взаємне місцезнаходження Землі, Місяця та Сонця тощо).

Геофізичні методи застосовуються для вивчення гідрогеологічних та інженерно-геологічних умов зсувної ділянки, впливу їх на екологічну обстановку, об'єкти господарської інфраструктури. При цьому вивчаються закономірності часових змін різних геофізичних полів і параметрів середовища, які відображають особливості

розвитку зсувного процесу. Об'єктивна оцінка зсувонебезпечності територій потребує вирішення цілої низки завдань. Основними з них є: визначення будови схилу, його складу, стану, властивостей, умов залягання та геометричних параметрів окремих товщ гірських порід, їхнього водонасичення і режиму підземних вод. Вирішення цих завдань, разом з даними про кліматичні та гідрологічні умови району, матеріалами про техногенні навантаження та історію розвитку зсуву, служать основою для проведення розрахунків стійкості схилу.

Основна увага при цьому звертається на детальні екогеофізичні дослідження верхньої частини розрізу (ВЧР) – приповерхневої частини геологічного середовища потужністю в десятки, рідше перші сотні метрів. Вона включає ґрунти, гірські породи, поверхневі, ґрунтові та підземні води, екзогенні фізико-геологічні явища (зсуви, карст тощо). ВЧР найбільшою мірою зазнає впливу екзогенних (атмосферних, поверхневих) і техногенних (фізико-хімічних, енергетичних) процесів, а також ендегенних (внутрішньоземних) факторів. ВЧР часто характеризується екстремальним проявом як природних (різкою геологічною та петрофізичною неоднорідністю у просторі та часі), так і техногенних (максимальним проявом різноманітних штучних фізичних полів) процесів. Особливістю верхньої частини геологічного середовища, що зазнає значних техногенних навантажень, є яскраво виражена залежність усіх його характеристик від координат точок спостережень – властивості й стан ґрунтів і гірських порід верхньої частини розрізу помітно змінюються від точки до точки як по латералі, так і по вертикалі. Різко змінюється у просторі й часі поведінка різних геофізичних полів.

Прогнозування зсувних ділянок базується на вивченні мікродинаміки напружених мас порід, що знаходить відображення у вимірних геофізичних полях. Застосування геофізичних досліджень дозволяє обстежити великі площі

при детальності спостережень, яка недоступна для прямих методів інженерно-геологічних вишукувань з використанням буріння великої кількості свердловин. Вони дешевші за прямі методи і можуть бути виконані за короткий термін. Завдяки всебічному аналізу досліджуваної системи і масовому характеру спостережень геофізична інформація найбільш повно забезпечує можливість моделювання, яке є необхідним елементом інженерно-геологічного моніторингу зсувних процесів.

Моніторингові інженерно-геофізичні дослідження при вивченні зсувів призначені для натурного спостереження за змінами геологічного середовища в зоні розвитку зсувних процесів (Вижва та ін., 2018; Кузьменко та ін., 2015). Отримані геофізичні матеріали використовуються для прийняття науково-технічних рішень на проведення оптимальних захисних інженерно-технічних заходів. Необхідність та обов'язковість спеціалізованих геолого-геофізичних досліджень у районі зсувних територій з метою прогнозування імовірних геоекологічних змін докільця впливає із численних прорахунків в об'єктуванні будівництва та експлуатації різних природно-техногенних систем.

Слід зазначити, що нехтування організацією моніторингових інженерно-геофізичних та екогеофізичних досліджень зсувонебезпечних територій підвищує ризики катастрофічного розвитку ситуації. Значна кількість аварій, що сталися внаслідок різкої активізації зсувних процесів, призводить до загибелі людей та втрати матеріальних цінностей.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Існує низка публікацій, присвячена застосуванню методів геофізики для вивчення зсувних процесів (Вижва та ін., 2017, 2018; Vyzhva et al., 2019; Горяїнов та ін., 1987; Кузьменко та ін., 2009, 2015; Огильви, 1990), проте систематичні спеціалізовані геофізичні дослідження, а тим більше геофізичний моніторинг, практично не проводяться. В основному, по можливості, використовуються матеріали геофізичних зйомок, раніше виконаних на площі досліджень з метою геологічного картування та пошуків родовищ корисних копалин. Слід зауважити, що кількість публікацій на дану тему з практичними прикладами застосування геофізичних методів для вивчення зсувів є незначною.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Стаття присвячена висвітленню особливостей застосування електрометричних досліджень зсувних територій правобережжя р. Дніпро в умовах лісостепової зони України. Слід зауважити на досить складних геоелектричних умовах досліджень, пов'язаних з природною обстановкою та загалом із слабкодіференційованим геоелектричним розрізом, що потребує підвищеної точності польових вимірювань, застосування статистичних методів обробки та нових підходів до інтерпретації польових геофізичних даних.

Мета досліджень – висвітлення особливостей геофізичних досліджень при вивченні зсувів.

У статті наведено результати комплексних геоелектричних досліджень верхньої частини розрізу характерних зсувних ділянок у районі сіл Гребені й Вітачів Київської області на правобережжі р. Дніпро.

Геолого-геофізичні моделі зсувного масиву. Геологічна обстановка, що впливає на виникнення зсувів, визначається умовами залягання, властивостями і станом корінних порід і більш молодих утворень, які їх перекривають. У першу чергу звертають увагу на виділення у межах схилів геологічних тіл, що за своїми геотехнічними показниками є найбільш схильними до зсувних процесів. Це головним чином глинисті породи з високими коефіцієнтами пластичності, які характеризуються електричними опорами, що не перевищують перших десятків Ом·м.

На розвиток усіх типів зсувів значний вплив мають особливості залягання і руху підземних вод. У свою чергу водонасичення порід впливає на зміну їхніх фізичних властивостей, передусім на суттєве зниження питомого електричного опору. Тому необхідно вивчати ґрунтові, пластові й тріщинні води, які насичують пласти і тріщини, що виклинюються у межах схилу. Особливо важливим фактором, від якого залежить надходження води до схилових відкладів, є наявність і положення регіональних водотривів.

У процесі геолого-геофізичного вивчення зсувних масивів важливо з'ясувати деталі їхньої будови. Потрібно мати на увазі, що для зсувних масивів характерним є найрізноманітніше поєднання тією чи іншою мірою контрастних, різноорієнтованих меж поділу з поступовою градієнтною зміною фізичних властивостей.

Слід відмітити, що зсувоутворення – це динамічний процес, який на кожній стадії свого розвитку визначається сукупністю різноманітних природних факторів, що призводять до порушення стійкості схилів.

Найважливішою особливістю геолого-геофізичної моделі (ГГМ) зсувного масиву є наявність поверхні (зони) ковзання. У цій зоні природна структура породи зазнає найбільших змін. Порушуються властиві гірській породі зв'язки, змінюється її структура, підвищується вміст і мінералізація порової води. Ці зміни відображаються у низці геофізичних параметрів, зокрема, у зниженні електричного опору породи. Установлено, що значення електричного опору проб води в зоні ковзання у 1,5–2 рази нижче, ніж опору, характерного для підземних вод досліджуваної ділянки. Підвищення мінералізації в даному випадку – це, головним чином, результат гідратації глинистих мінералів, чому сприяє перетирання та інтенсивна механічна переробка порід. Найістотніше зростає електропровідність матеріалу, що являє собою зону ковзання породи (типу аргілітів, сланців, глинистих пісковиків) і меншою мірою глин з високими показниками пластичності. Також чітко виявляється у цій зоні зменшення швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль і зростання коефіцієнтів їхнього поглинання. Кожне наступне переміщення зсувного масиву порушує нормальний стан порід у зоні ковзання, що відповідно призводить до зміни їхніх електричних і швидкісних параметрів. При цьому виникає середовище з градієнтною, поступовою зміною фізичних властивостей (Вижва та ін., 2017, 2018; Vyzhva et al., 2019; Горяїнов та ін., 1987; Кузьменко та ін., 2009, 2015; Огильви, 1990).

Також відбуваються інтенсивні зміни порід, що становлять основне тіло зсуву. Зміщуючись схилом, ці породи механічно руйнуються і стають менш стійкими, їхній електричний опір знижується. Істотно різняться значення електричних опорів порід тіла зсуву й однотипних утворень за його межами.

Швидкості поширення пружних хвиль у лесових породах на деформованих схилах можуть бути на 40–60 % нижчі, ніж на стійких ділянках, розташованих за межами зсуву. Складний характер руху зсуву створює різноманітні поєднання зон стиснення і розтягнення, які найбільш чітко виявляються у пружних параметрах. Зсувне тіло відрізняється анізотропією всіх геофізичних параметрів. Основу цього явища становить тріщинуватість, яка є однією з найбільш характерних особливостей зсувних масивів. Чітко виявляється анізотропія у молодих активних зсувах. Це явище ефективно вивчається електричними і сейсмоакустичними методами.

Більшість зсувів належить до пластичних і структурних типів. Для перших характерно зміщення мас гірських порід у більш-менш однорідному масиві по поверхні ковзання. У другому відбувається сповзання блоків порід по

ослаблених контактах між похилими шарами порід. В особливу групу виділяються зсуви в лесових породах, які широко розвинені в степовій і лісостеповій зонах, зокрема на правобережжі Дніпра в межах Київської області (Вижва та ін., 2018; Горяинов та ін., 1987; Кузьменко та ін., 2009). Зсувні явища в цих відкладах тісно пов'язані з різким зменшенням їхньої механічної міцності під час розмокання і подальшої дезінтеграції.

Пластичні зсуви утворюються в однорідних породах, що відрізняються зазвичай зниженими електричними опорами ($\rho = 5\text{--}60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) і швидкостями поширення поздовжніх і поперечних пружних хвиль ($V_p = 500\text{--}1700 \text{ м/с}$, $V_s = 200\text{--}600 \text{ м/с}$). Фізичні властивості самого зсуву визначаються ступенем зруйнованості порід тіла зсуву, наявністю тріщин та їхнім заповнювачем, напруженням станом порід, потужністю зони аерації, обводненістю окремих частин зсуву та деякими іншими факторами.

Специфічними особливостями характеризується приповерхневий шар зсувних масивів, що перебуває під інтенсивним впливом процесів вивітрювання. Він відрізняється дуже низькими значеннями швидкостей пружних хвиль і високим коефіцієнтом їхнього поглинання. Його питомий електричний опір може змінюватися від $5\text{--}10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (у період дощів) до $100\text{--}200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ на тій же ділянці – у посушливу пору року. Виконані дослідження дозволяють припускати, що фізичні властивості, у тому числі пружні й електричні, у зонах інтенсивного вивітрювання змінюються з глибиною за законом, близьким до експоненціального.

У зоні аерації зсуву значення електричних опорів помітно перевищують цей параметр тих же порід за межами зсуву або, у рідкісних випадках, приблизно рівні їм. Швидкості сейсмічних хвиль майже не відрізняються від характерних для тих же порід у корінному заляганні. Межа між зоною аерації й повного водонасичення зазвичай носить розмитий характер, причому особливості зміни параметрів тут залежать від ступеня розвитку "капілярної облямівки".

Структурні зсуви відрізняються особливостями поверхонь ковзання, які приурочені до ослаблених зон на межах між геологічними тілами. Ці поверхні можуть бути плоскими, похило-ступінчастими і в окремих випадках хвилястими.

Повсюдно поширено зсуви, що виникають у результаті зміщення делювію по похилих поверхнях корінних порід. Особливо часто зустрічаються зсуви такого типу в Карпатах. У більшості випадків їх можна успішно вивчати геофізичними методами. У зоні аерації в межах товщі делювію поведінка електричних і сейсмічних параметрів загалом аналогічна характерним особливостям цих параметрів у зсувних тілах пластичних порід.

Особливість даного виду зсувів полягає в контрастному характері межі поділу між породами, що зміщуються і породами корінного ложа. При цьому швидкості поздовжніх V_p і поперечних V_s хвиль у корінних породах здебільшого мають підвищені значення. Електричний опір зростає, коли ложе складено скельними слабо вивітряними породами, а в разі глинистих корінних порід він зменшується. Для напівскельних корінних порід співвідношення опорів залежить як від їхнього складу, так і від складу, стану і ступеня обводнення зсувних товщ.

Інший тип ГГМ структурних зсувів зустрічається в моноклінально похилих шаруватих масивах корінних порід. Їхнє сповзання відбувається у вигляді блоків по прошарках пластичних (найчастіше глинистих) порід, що відрізняються низькими величинами швидкостей пружних хвиль і електричних опорів. Завдяки незначній товщині подібні прошарки лише в рідкісних випадках відобража-

ються у вимірюваних на поверхні схилу геофізичних полях. Водночас на каротажних діаграмах (за наявності свердловин) вони чітко фіксуються практично всіма реєстрованими параметрами.

Аналіз ГГМ зсувних масивів свідчить про те, що, використовуючи який-небудь один геофізичний параметр, далеко не завжди вдається отримувати достовірну і достатню інформацію. Тому для вивчення зсувів доцільно застосовувати комплекс геофізичних методів і визначати комплексні показники, розрахунок яких передбачає подання результатів усіх окремих методів у рівнозначних безрозмірних величинах показників контрастності. Таким шляхом, зокрема, вдається виділяти малопотужні зволожені зони в нижніх шарах лесових порід, а також зони з низьким ступенем порушеності. Використання функції комплексних безрозмірних параметрів сприяє успішному вивченню полів вологості й деформації у зсувних масивах, що підвищує надійність і обґрунтованість їхнього виділення.

Завдання і комплекс геофізичних досліджень зсувів. Вивчення зсувних процесів є одним з найскладніших завдань для інженерної геофізики, оскільки дослідження необхідно виконувати на досить крутих схилах, а зона зсуву характеризується значною мінливістю геофізичних параметрів. Розміри досліджуваної ділянки (поперечні розміри зсуву) зазвичай невеликі, що ускладнює проведення спостережень за стандартною методикою.

Досвід геофізичних досліджень зсувних масивів показує, що вони вкрай неоднорідні за всіма своїми показниками як за площею, так і за глибиною. Тіло зсуву відрізняється анізотропією всіх геофізичних параметрів. В основі цього явища лежить тріщинуватість, яка служить однією з найбільш характерних особливостей зсувних масивів.

При вивченні зсувонебезпечних ділянок за допомогою геофізичних методів вирішуються такі основні завдання:

1. Визначення зовнішніх меж зсуву та меж окремих його блоків.
2. Визначення глибини залягання поверхні (зони) зміщення.
3. Розчленування тіла зсуву (у плані й розрізі) на окремі комплекси порід, які відрізняються за літологічним складом, характером і ступенем тріщинуватості й напруженого стану.
4. Визначення положення рівня ґрунтових вод і верховодки, напрямку та швидкості руху фільтраційного потоку.
5. Оцінка стану зсувного схилу, вивчення водно-фізичних і фізико-механічних властивостей порід тіла зсуву та корінного ложа.
6. Організація геофізичного каналу моніторингу зсувних процесів, вивчення їхньої динаміки, прогнозування розвитку негативних змін і видача рекомендацій для прийняття захисних інженерно-технічних заходів.
7. Спостереження за ефективністю протизсувних інженерно-технічних заходів – оцінка якості роботи дренажних систем, підпірних стін, штучного закріплення ґрунтів тощо.

При вивченні зсувонебезпечних ділянок геофізичні дослідження мають такі специфічні особливості:

1. Об'єктом вивчення служить верхня частина розрізу – геологічне середовище, яке має свою структуру, речовинно-літологічний склад, петрофізичні й водно-фізичні особливості та спектр завад. При цьому постійно змінюються його геофізичні властивості.
2. Інформативні anomalії спостерігаються на фоні дуже високого рівня різних завад, що тягне за собою, з одного боку, необхідність виконання великої кількості високоточних вимірювань, а з іншого – потребує гнучкого комплексування геофізичних методів з інженерно-геологічними та гідрогеологічними дослідженнями.

3. Досить густа мережа спостережень, яка відповідає масштабу 1 : 2 000 – 1 : 5 000 і визначається конкретною геолого-геофізичною обстановкою району робіт і поставленими завданнями.

4. Спостереження виконуються у максимально стислі терміни, щоб уникнути похибок, викликаних власне зсувним процесом.

5. Поряд з наземними широко використовуються спостереження у внутрішніх точках середовища (каротажні методи). Особливо велика роль цих досліджень у вирішенні такої задачі, як визначення поверхні (зони) зміщення зсуву та спостереження за її станом.

6. Під час моніторингових досліджень перший цикл спостережень виконується у період відносної стабілізації зсуву, а наступні – у періоди активізації процесу. Для надійного прогнозування розвитку зсувних процесів необхідно провести мінімум три цикли спостережень.

7. Необхідно виконувати комплексний аналіз усієї геолого-геофізичної інформації з тісною ув'язкою матеріалів різних геофізичних методів.

Виділяють три етапи геофізичних досліджень зсувів: рекогносцирувально-методичний, детальний та моніторинговий. На рекогносцирувально-методичному етапі досліджень виконуються дистанційні геофізичні зйомки (радіолокаційна, радіотеплова тощо) та комплексні геофізичні спостереження на окремих профілях. За матеріалами цих досліджень визначаються загальні геофізичні особливості району робіт, ефективність окремих геофізичних методів і розробляється їхній раціональний комплекс для проведення детальних робіт.

На етапі детальних досліджень проводяться комплексні наземні та каротажні спостереження за системою профілів. За матеріалами цих досліджень вирішуються задачі, поставлені в технічному завданні, визначаються геофізичні параметри та геолого-геофізичні моделі зсувних ділянок, даються рекомендації щодо прийняття захисних інженерно-технічних рішень. Аналіз цих даних дозволяє зробити також вибір характерних (ключових) профілів і точок для організації моніторингових спостережень.

На етапі моніторингових досліджень виконуються режимні геофізичні спостереження за змінами геофізичних полів у часі, які зв'язані з динамікою розвитку зсувних процесів. Крім того, контролюється ефективність проти-зсувних інженерно-технічних заходів. Дослідження проводяться комплексом геофізичних методів на попередньо вибраних ключових профілях. Частота циклів геофізичних вимірювань визначається швидкістю розвитку зсувних процесів, конкретною геолого-геофізичною обстановкою району досліджень. Комплексний аналіз матеріалів моніторингових спостережень дозволяє зробити прогноз розвитку зсувних процесів, вносити корективи в ході виконання захисних інженерно-технічних заходів і контролювати їхню ефективність.

Як зазначалося, зсувні масиви вкрай неоднорідні середовища за всіма своїми показниками як за площею, так і за глибиною. Аномалії, спричинені зсувними процесами, спостерігаються зазвичай на фоні дуже високого рівня різних завад, що спонукає, з одного боку, до необхідності отримання великої кількості високоточних даних, а з іншого – вимагає гнучкого поєднання геофізичних методів з інженерно-геологічними та гідро-геологічними способами досліджень.

У цих умовах виконання дискретних геофізичних спостережень недостатньої густоти не дає надійних результатів. Крім того, нерегулярна мережа спостережень на зсувах також може призвести до неефективності досліджень. Якщо з економічних і технічних міркувань неможливо створити на всій досліджуваній площі зсуву

рівномірну густу мережу спостережень, геофізичні дослідження виконуються за системами профілів. При цьому рекомендується не менше трьох профілів орієнтувати зверху вниз уздовж тіла зсуву. Потім, виходячи з розмірів зсуву, розбивають ряд профілів поперек його тіла. Профілі геофізичних досліджень мають виходити за межі зсуву з тим, щоб дати можливість порівняти параметри стійкого схилу і зміщених зсувних мас.

Для вирішення завдань, пов'язаних з вивченням зсувних процесів, комплекс геофізичних методів включає дистанційні (аерометоди), електрометричні, сейсмометричні, еманайні, гравіметричні, магнітометричні, термометричні та каротажні дослідження (*Вижва та ін., 2018; Vyzhva et al., 2019; Горяїнов та ін., 1987; Огильви, 1990*). Слід зазначити, що раціональний комплекс геофізичних методів розробляється з урахуванням геолого-геофізичних і геоморфологічних умов кожної конкретної зсувної ділянки, а також економічної ефективності досліджень.

Дистанційні методи включають радіолокаційну та радіотеплову зйомки і виконуються на рекогносцирувальному етапі. Залежно від поставлених завдань вони дозволяють здійснити або узагальнене інтегральне обстеження місцевості та аналіз прояву регіональних факторів, або деталізацію окремих ділянок з метою визначення зон розвитку зсувних процесів. На основі дистанційних зйомок і ретроспективної інформації по досліджуваній території створюється перша наближена модель масиву зсуву, яка надалі конкретизується й уточнюється наземними та свердловинними геофізичними методами.

Комплекс електрометричних методів включає: вертикальне електричне зондування (ВЕЗ) у модифікації мікроелектрозондувань (МЕЗ); МЕЗ способом викликаної поляризації; електропрофілювання (симетричне, комбіноване, дипольне, природного електричного поля тощо), азимутальне структурно-геодинамічне картування (СГДК-А), спосіб природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПІЕМПЗ) та метод зарядженого тіла (МЗТ). За допомогою електрометричних досліджень вирішуються більшість наведених вище завдань. Основний обсяг інформації при вивченні зсувів отримують з даних електричних зондувань та електропрофілювань.

Методом МЕЗ при сприятливих умовах вивчаються просторові параметри зсуву, визначаються системи тріщинуватості порід тіла зсуву (рис. 1). Найкращих результатів методом МЕЗ досягають при вивченні зсувів видавлювання, зрізання та ковзання, де зазвичай існує чітко виражена поверхня ковзання у глинистих породах, а тіло зсуву складено породами, що відрізняються підвищеною дезінтеграцією.

При вирішенні завдань картування зсувних масивів широко використовується електропрофілювання, яке виконується за напрямками, що з'єднують точки електрозондувань, а також заповнює ділянки між ними. Електропрофілювання виконується установками, що забезпечують дослідження на двох глибинах: на глибині, відповідній дзеркалу зсуву, і на рівні, що характеризує верхню частину розрізу (головним чином зону аерації). Оптимальні розноси вибирають за даними попередньо виконаних одиночних зондувань. Доцільно використовувати трьохелектродні або дипольні установки, що дають можливість виділяти вузьколокалізовані тіла і, зокрема, тріщинуваті зони. Найбільш повну об'ємну геоелектричну картину зсувного масиву надають спостереження, які здійснюються дипольними установками, що являють собою комбінацію зондувань і профілювання (багатоелектродні установки).

Крім спостережень з використанням штучних електричних полів, на зсувних масивах проводять дослідження методом природного електричного поля, що

характеризують поведінку геофільтраційних процесів. Методом природного електричного поля (ПЕП), як правило, оконтурюють породи різного літологічного складу або структури, зони інфільтрації поверхневих вод і

атмосферних опадів, і зони розвантаження підземних вод, завдяки чому цим методом можуть здійснюватися режимні спостереження за розвитком зсувних процесів.

Рис. 1. Приклад визначення тріщинуватості зсувних порід за допомогою кругових МЕЗ

Методами ПЕП і МЗТ ведуть вивчення гідрогеологічних особливостей зсуву, використовуючи кореляційні зв'язки між електричними параметрами порід і коефіцієнтами фільтрації.

Режимними зйомками комплексом методів МЕЗ, ПЕП, МЗТ вивчають динаміку зсувного масиву й окремих його ділянок.

Електрометричні методи радіолокаційного підповерхневого зондування (РЛЗ) і природного імпульсного електромагнітного поля Землі, які останнім часом почали застосовувати для вивчення зсувів, базуються на вимірюванні характеристик змінних електромагнітних полів штучного та природного походження. Порівняно з іншими геофізичними методами радіолокаційний метод має високу роздільну здатність по вертикалі, яка визначається довжиною (тривалістю) зондувального сигналу. Чим коротший сигнал, тим вища роздільна здатність методу. В основі методу ПІЕМРЗ лежить ефект генерації електромагнітних імпульсів гірськими породами при дії на них механічних напружень.

Електрометричні методи за значним обсягом вирішуваних специфічних завдань, експресністю та можливістю їхнього виконання у складних геоморфологічних умовах є найбільш універсальними і ефективними при детальному вивченні зсувних ділянок.

Сейсмометричні дослідження виконуються кореляційним методом заломлених хвиль (КМЗХ) з використанням як поздовжніх, так і поперечних хвиль. Метод КМЗХ ґрунтується на реєстрації та простеженні (кореляції) перших і наступних вступів поздовжніх, а також поперечних заломлених хвиль. За допомогою цього методу вирішуються завдання, пов'язані з вивченням будови зсуву: визначення його зовнішніх границь, навіть у тих випадках, коли вони явно не виділяються за геоморфологічними ознаками, глибини залягання поверхні зміщень, а також дається оцінка стану та властивостей гірських порід. Поверхні ковзання зсуву впевнено картується сейсмічним методом за найбільш сприятливої ситуації, коли зміщення відбувається по контакту різних порід. Перехід від

стійкої частини схилу до порушеного масиву супроводжується суттєвими змінами сейсмічних характеристик: зменшенням швидкостей пружних хвиль, зростанням коефіцієнтів сейсмічної анізотропії за рахунок орієнтованої тріщинуватості й особливостей розподілу напружень усередині зсувного масиву.

На вивченні закономірностей змін стану і властивостей порід у часі ґрунтується принципова можливість розрахунку змін коефіцієнта стійкості схилу на основі розрахованих (за визначеними за допомогою сейсморозвідки швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль) значень пружних параметрів: динамічного модуля пружності та коефіцієнта Пуассона.

Сучасний рівень систем збору та реєстрації сейсмічних даних і можливості систем обробки та інтерпретації сейсмометрії дозволяють застосовувати для вивчення зсувних схилів просторову або тривимірну зйомку.

Високоточні мікромагнітна та гравіметрична зйомки сприяють оперативному картуванню меж окремих зсувних блоків, вивченню динаміки зсувних процесів. Еманційна зйомка в комплексі із СГДК-А дозволяє виділяти і простежувати зони тріщинуватості (геодинамічні зони). Малоглибинна термометрія доповнює метод природного електричного поля при вивченні гідрогеологічних умов ділянки досліджень.

Можливості геофізичних методів суттєво підвищуються в разі використання свердловинних спостережень. Застосовуються методи електричного опору, природного електричного поля, вертикального сейсмічного профілювання, міжсвердловинного сейсмічного просвічування, точковий акустичний каротаж, гамма-каротаж, нейтрон-нейтронний каротаж, термокаротаж. При цьому особливо високу ефективність мають сейсмоакустичні методи. Геофізична інформація свердловинних досліджень дозволяє визначити точні геометричні параметри геологічного розрізу, фізичні властивості порід і підземних вод. На основі цих даних установлюються кореляційні зв'язки між геофізичними та інженерно-геологічними параметрами.

Слід зазначити, що раціональний комплекс геофізичних методів при дослідженні зсувних процесів визначається для кожної окремої природної обстановки (окремої ділянки). При цьому враховується: можливість виконання польових досліджень окремим геофізичним методом з точки зору рельєфу денної поверхні ділянки; наявність диференціації порід за фізичними властивостями, що використовуються конкретним геофізичним методом; економічна ефективність застосування окремого геофізичного методу та важливість завдань, що ним вирішуються.

Експериментальні дослідження. Для прикладу наведемо деякі результати геофізичних досліджень, виконаних у межах правого берега р. Дніпро на Трипільській ділянці (район с. Вітачів і с. Гребені) поблизу Трипільської теплоелектростанції.

У результаті впливу водосховищ активізуються зсувні процеси на правому високому березі Дніпра. На Трипільській ділянці зсуви характеризуються двоповерховою будовою – наявністю двох терас зсування. Верхня тераса складена, головним чином, лесоподібними суглинками. Зсувні ґрунти представлені також (крім цих суглинків, похованих ґрунтами) флювіогляціальними пісками, моренними суглинками, бурими глинами. У межах нижньої зсувної тераси зсувні маси являють собою: глинисті ґрунти (бури й строкаті глини) – у западинах; полтавські та харківські піски, наглинок – на гребнях. Поверхня корінного ложа складена мергелем, глинистим мергелем та наглинком Київської світи.

На дослідженій території виділяються декілька водонесних горизонтів: у лесових відкладах ("верховодка"); у слабопроникливих суглинках і делювіогляціальних відкладах, що залягають на бурих глинах; у пісках харківської світи, що залягають на київських мергелях; у зсувних ґрунтах, що мають локальний розвиток.

Зважаючи на складний рельєф місцевості та економічну доцільність, для вивчення зсувних тіл застосовувався комплекс геоелектричних досліджень методами мікроелектрозондування (МЕЗ) із кроком 25 м і природного електричного поля (ПЕП) із кроком 10 м на окремих профілях-створах. За результатами цих досліджень

складено геоелектричні моделі зсувних ділянок за окремими профілями-створами.

Зіставлення геоелектричних моделей і геологічних розрізів по створах, що пересікають зсувну ділянку, дозволяє говорити про можливість вирішення таких завдань: вивчення будови корінного ложа зсуву; визначення потужності, складу і фільтраційних властивостей ґрунтів, що сповзли; виділення водонесних горизонтів (водонасичених порід).

На попередніх геологічних розрізах, складених за результатами буріння, показана горизонтально розташована поверхня київського мергелю, яка є ложем зсувів. Результати геофізичних досліджень показали, що поверхня порід київської світи не плоска і не горизонтальна (рис. 2). При цьому фіксується значна їхня диференціація за електричним опором, що свідчить про літологічну неоднорідність порід київської світи. Поряд із значно поширеними на ділянці мергелями, опір яких становить переважно 12–20 Ом·м, зустрічаються ще два різновиди порід: породи з пониженим питомим електричним опором (менше 12 Ом·м) – глинистий мергель; породи з підвищеним питомим електричним опором (25–60 Ом·м) – наглинок.

У результаті інтерпретації МЕЗ з достатньою точністю визначається потужність осадових відкладів, схильних до зсувних процесів. За даними геоелектричних досліджень, зсувні ґрунти (породи), які залягають на корінному ложі, вельми невтримані за літологічним складом, що досить контрастно окреслюється на геоелектричних моделях. Суттєво переважають суглинки середні, зустрічаються дрібнозерністі піски глинисті, електричний опір яких становить переважно від 12 до 30 Ом·м. Поряд із цим встановлено ділянки поширення пісків і глин. Піски і піщані відклади відрізняються підвищеним значенням електричного опору (50–80 Ом·м). При цьому досить високі значення опору характерні для неводонасичених пісків (сотні Ом·м). Глинисті відклади і глини відрізняються зниженими і низькими електричними опорами (15–20 Ом·м).

Рис. 2. Геоелектрична модель зсуву в районі с. Вітачів.

Умовні позначення: 1 – точки МЕЗ та їхні номери; 2 – геологічні свердловини та їхні номери; 3 – границі геоелектричних горизонтів; 4 – питомий електричний опір (ρ), Ом·м; 5 – піски різнозерністі ($\rho > 200$ Ом·м); 6 – піски глинисті й супіски ($\rho = 60\text{--}200$ Ом·м); 7 – суглинок легкий із прошарками супіску і суглинка середнього ($\rho = 25\text{--}60$ Ом·м); 8 – суглинок середній ($\rho = 15\text{--}30$ Ом·м); 9 – суглинок важкий ($\rho = 12\text{--}15$ Ом·м); 10 – глина ($\rho < 12$ Ом·м); породи київської світи: 11 – мергель ($\rho = 12\text{--}20$ Ом·м); 12 – глинистий мергель ($\rho < 12$ Ом·м); 13 – наглинок ($\rho = 25\text{--}60$ Ом·м)

На зсувній ділянці в районі с. Вітачів глини з низьким електричним опором і низькими фільтраційними властивостями становлять невеликі западини на тілі зсуву як на нижній, так і на верхній терасах (рис. 2). На зсувній

ділянці в районі с. Гребені високопластичні глини розповсюджені на нижній зсувній терасі й практично відсутні на верхній (рис. 3). Загалом на основі геофізичних даних встановлено переважання слабкопроникних відкладів. У нижній частині вони обводнені.

References

- Goriainov, N.N., Bogoliubov, A.N., & Varlamov, N.M. (1987). Investigation of landslides by geophysical methods. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Kuzmenko, E.D., Bezsmertnyi, A.F., Vdovina, O.P. et al. (2009). Investigation of landslides by geophysical methods. Monograph. Ivano-Frankivsk : IFNTUOG Publishing. [in Ukrainian]
- Kuzmenko, E.D., Blinov, P.V., Vdovina, O.P. et al. (2015). Forecasting of landslides. Monograph. Ivano-Frankivsk: IFNTUOG Publishing. [in Ukrainian]
- Ogilvi, A.A. (1990). Fundamentals of engineering geophysics. Moscow : Nedra. [in Russian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Ivanchenko, K., Onyshchuk, I., Reva, M., Deineko, S. (2017). Research of geologic structure of territories of hydrotechnical systems allocation by means of geophysical methods (using

- "Senzhe" HPP as an example, Equatorial Guinea). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 77, 36–42. [In Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). Application of geophysical methods in the study of landslides. *"Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*, 2019 May 13–16, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902066>.
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). The mapping of submerged (flooding) lands by geophysical methods. *"Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 2019 November 12–15, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903225>.
- Vyzhva, S.A., Onyshchuk, V.I., Onyshchuk, I.I., Reva, M.V. (2018). Engineering geophysics. Kyiv : Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 21.05.18

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vyzhva_s@ukr.net;
V. Onyshchuk, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: vytus16@ukr.net;
I. Onyshchuk, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: oivan1@ukr.net;
M. Reva, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
O. Shabatura, PhD (Geol.),
E-mail: dard@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

GEOPHYSICAL RESEARCHES OF THE LANDSLIDE TERRITORIES OF THE RIGHT BANK OF THE DNIEPER RIVER (FOREST-STEPPE ZONE)

The paper discusses the details of the application of geophysical research methods in the study of the landslide areas of the right bank of the Dnieper River within the forest-steppe zone of Ukraine. Geological and geophysical models of landslides are given. The specific tasks that are posed in studies of landslides were highlighted. There are three stages in studies of landslides which were defined: reconnaissance-methodological, detailed and monitoring. Also, sets of geophysical methods for these stages were designated.

It is emphasized that the rational set of geophysical methods in the study of landslide processes is determined for each individual natural environment, taking into account: the possibility of performing field studies by a specific geophysical method on the area; the presence of differentiation of rocks by physical properties, that are used by the specific geophysical method; economic efficiency of application of the geophysical method.

As an example, we described some of the results of geophysical studies, which were carried out on exemplary landslide sites on the right bank of the Dnieper River within the forest-steppe zone of Ukraine near the Trypillia thermal power plant.

Keywords: engineering and geophysical studies, landslides, electrical resistivity, microelectric sounding, geological-geophysical models.

С. Выжва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;
В. Онищук, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: vytus16@ukr.net;
И. Онищук, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: oivan1@ukr.net;
Н. Рева, канд. физ.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
А. Шабатура, канд. геол. наук,
E-mail: dard@ukr.net;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПРАВОБЕРЕЖЬЯ РЕКИ ДНЕПР (ЛЕСОСТЕПНАЯ ЗОНА)

Рассмотрены методические принципы применения геофизических методов исследований при изучении оползневых территорий. Приводятся геолого-геофизические модели оползневых участков. Выделены задачи, которые ставятся при специализированных исследованиях оползней и определены геофизические методы их решения. Выделены три этапа специализированных исследований оползневых процессов: рекогносцировочно-методический, детальный, мониторинговый и определены комплексы геофизических методов для этих этапов.

Отмечено, что рациональный комплекс геофизических методов при исследовании оползневых процессов определяется для каждой отдельной природной обстановки (отдельного участка) с учетом: возможности выполнения полевых исследований отдельным геофизическим методом на данном участке; наличия дифференциации пород по физическим свойствам, используемым конкретным геофизическим методом; экономической эффективности применения данного геофизического метода.

Для примера приведены некоторые результаты геофизических исследований, выполненных на характерных оползневых участках в пределах правого берега р. Днепр лесостепной зоны Украины вблизи Трипольской теплоэлектростанции.

Ключевые слова: инженерно-геофизические исследования, оползни, электрическое сопротивление, микроэлектронзондирование, геолого-геофизические модели.