



**Б. Т. Ладанівський^{1,2}, Л. Г. Савків¹, О. Я. Сапужак¹, О. І. Романюк¹, О. І. Підвірний¹, В. В. Коляденко¹,
О. В. Сироєжко¹, С. А. Дециця¹**

¹ Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, м. Львів, Україна,

² Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ЕКСПРЕС-АНАЛІЗ ДАНИХ ЗОНДУВАННЯ СТАНОВЛЕННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ, ОТРИМАНИХ НА ДАМБИ ХВОСТОСХОВИЩА У СТЕБНИКУ

Електромагнітні (ЕМ) методи геофізики дають змогу відобразити розподіл електропровідності під поверхневого середовища шляхом аналізу даних, отриманих на поверхні Землі. Метод зондування становленням поля у ближній зоні (ЗСБ) є ЕМ методом геофізики з керованим джерелом, який дає змогу вивчати розподіл електропровідності під поверхневих шарів землі, аналізуючи нестационарний перехідний процес загасання ЕМ поля у провідному середовищі після його збудження ступінчастим струмом, що описується функцією Хевісайда. Викладено математичні та алгоритмічні засоби для експрес-аналізу експериментальних даних зондування становленням електромагнітного (ЕМ) поля у ближній зоні (ЗСБ), практичне застосування яких під час польових досліджень іноді має важливе значення, оскільки дає змогу приймати оперативні рішення щодо оптимізації виконання експериментальних польових робіт та швидко оцінювати стан досліджуваного об'єкта. Запропонований алгоритм експрес-аналізу розроблено на підставі трансформації експериментальної кривої методу ЗСБ, відомої ще як S-інверсія, котра водночас базується на апроксимації провідного півпростору тонкою плівкою, що занурюється у півпростір з плином перехідного процесу в ЕМ полі. Для зменшення впливу завад на дані вимірів в алгоритмі проведено апроксимацію експериментальної кривої зондування, що розроблена з врахуванням таких речей: розв'язків рівнянь поширення ЕМ поля у провідному середовищі; функції кубічного сплайну; елементів математичного аналізу неперервних функцій. За даними профільних спостережень з використанням розроблених засобів експрес-аналізу було отримано одновимірні моделі питомого електричного опору та на їхній основі побудовано псевдодвовимірну модель геоелектричного розрізу дамби хвостосховища, що розташована поблизу Стебника. Аналіз отриманих моделей дав змогу виявити дві ділянки, де бажано провести додаткові дослідження для уточнення геологічної ситуації. Звичайно, алгоритми інверсії експериментальних даних як з математичного, так і з погляду реалізації алгоритму, є набагато складнішими. Проте якщо реалізувати швидкий і ефективний алгоритм одновимірної інверсії даних ЗСБ, замість зазначеної вище трансформації, то можна буде значно підвищити достовірність результату.

Ключові слова: польові вимірювання; експериментальні дані; кубічний сплайн; електропровідність; геоелектричний розріз.

Вступ

Індукційні електромагнітні (ЕМ) методи геофізики базуються на тому факті, що змінне в часі магнітне поле, згідно з законом ЕМ індукції Фарадея (друге рівняння Максвелла), індукує змінний електричний струм у провідному середовищі землі. Вимірюючи змінні електричні та магнітні поля на земній поверхні та беручи до уваги рівняння, що описують поширення ЕМ поля у провідному середовищі, можна зробити висновки про розподіл електропровідності цього підповерхневого провідного середовища. Водночас цей розподіл пов'язаний з геологічною будовою, фізичними і хімічними властивостями середовища та його станом.

Метод зондування становленням ЕМ поля у ближній зоні (ЗСБ) є ЕМ методом геофізики з керованим джерелом, який дає змогу вивчати розподіл електропровідності підповерхневих шарів землі, аналізуючи нестационарний перехідний процес загасання ЕМ поля у провідному середовищі після його збудження ступінчастим струмом, що описується функцією Хевісайда. На практиці ЗСБ часто використовують для розв'язання інженерно-геологічних та екологічних задач, дослідження підповерхневої частини геологічного розрізу з метою виявлення зсувних процесів, екологічно-небез-

печних явищ, поширення забруднень, ділянок утворення провалів чи порожнин, зсувонебезпечних зон, загрози руйнування гребель і дамб, а також для пошуків корисних копалин, геотермальних зон тощо.

Геолого-геоелектричне обґрунтування. Сприятливим чинником застосування методу ЗСБ на дамбах хвостосховищ є істотна мінералізація рідкої фази (води), що спричиняє значне зростання електропровідності, порівняно з консолидованим геологічним середовищем у зонах проникнення та витікання розсолів.

Зіставлення теоретичних і експериментальних залежностей поздовжньої провідності й електричного опору від глибини для характерних моделей геоелектричних розрізів ґрунтів тіла дамби показують, що стан геологічного середовища упевнено визначається за змінною електропровідності (опором) відповідних горизонтів. Так, теоретичні та експериментальні дані свідчать про можливість виділення у тілі дамби розущільнених ґрунтів із підвищеною фільтрацією розсолів, які надійно відзначаються за приростом електропровідності (зниження питомого електричного опору).

Мета дослідження полягає в розробленні алгоритму експрес-аналізу на підставі трансформації експериментальної кривої методу ЗСБ, відомої ще як S-інверсія, котра водночас базується на апроксимації провідного

півпростору тонкою плівкою, що занурюється у півпростір з плином перехідного процесу в ЕМ полі.

Отже, польові роботи методом ЗСБ зони виконали за стандартними методиками. За такого підходу якість та інформативність зібраних даних визначали в процесі камерального оброблення, що здійснюється після завершення усіх польових робіт. Окрім цього, в разі потреби виконали повторні та контрольні виміри з додатковим виїздом на об'єкт дослідження, на що знову витратили час і ресурси. Тому під час польових вимірювань важливими завданнями є: по-перше, візуально оцінити ще на поточній точці спостережень якість отриманих первинних експериментальних даних і прийняти рішення про продовження вимірів у наступній точці згідно з планом, чи про вживання контрольних заходів у поточній; по-друге, візуально, наочно проаналізувати структуру геологічного середовища, отримати його хоч би наближену модель і на підставі цього скоригувати відстань до наступної точки спостережень або визначити, за потреби, додаткові точки спостережень. Вирішити окреслені завдання та зменшити всі витрати можна на підставі розроблення та використання відповідних програмно-технічних засобів. Такі засоби для експрес-аналізу експериментальних даних ЗСБ часто на практиці є пріоритетними для застосування. Наближений результат, отриманий під час вимірів, дає змогу приймати оперативні рішення під час польових робіт щодо оптимізації їх виконання, давати оперативні оцінки стану досліджуваного об'єкта та виділяти ділянки для подальших докладних досліджень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Методи опрацювання польових експериментальних даних, викладені в літературних джерелах, описують класичну інтерпретацію даних методу ЗСБ, що є складною і тривалою процедурою, яка охоплює поетапні, послідовні багатокрокові розрахунки із розв'язанням як прямих, так і обернених задач з урахуванням апріорної геолого-геофізичної інформації. Недоліком є те, що така робота потребує чималих затрат часу та зусиль кваліфікованих спеціалістів, використання потужної обчислювальної техніки з відповідним математичним і програмним забезпеченням. Питання швидкого експрес-аналізу польових даних, орієнтованого на опрацювання даних у процесі виконання польових експедиційних робіт, залишаються поза увагою.

Загалом проведений аналіз сучасного стану наукових досліджень та існуючих методів, моделей та засобів показав, що невирішеними є питання експрес-аналізу первинних польових даних електромагнітних досліджень методом ЗСБ їх опрацювання та подання в режимі реального часу.

Апроксимація провідного середовища землі тонкими плівками, що використовували у цій роботі, базується на формулах, які описують проникнення ЕМ поля у провідний півпростір. Останнім часом концепція фрактальної геометрії стає популярною для опису складності геологічного середовища у багатьох науках про Землю [1], [2]. Принципи і застосування таких підходів до ЗСБ добре продемонстровано у роботах [12], [13]. У цій роботі наведено підхід для побудови одновимірних (1D) моделей електропровідності геологічного середовища, що базується на математичному аналізі неперервних функцій та відомій трансформації експериментальних

кривих ЗСБ, яка ґрунтується на використанні апроксимації провідного середовища тонкими плівками скінченної провідності [7], [8], [15]. Хоча для ефективної інтерпретації таких результатів необхідно враховувати додаткову інформацію про розріз (результати каротажу, інформацію про геологічну будову регіону досліджень тощо), водночас трансформації експериментальних кривих, на яких базуються подібні алгоритми експрес-аналізу, є відносно простими і дають можливість дуже швидко отримати якісну оцінку геологічного розрізу. Отже, подібні наближені алгоритми для аналізу даних ЗСБ часто пропонують до застосування [9], [10].

Геоелектричну псевдодвовимірну (2D) модель розрізу дамби хвостосховища підприємства "Полімінерал" у м. Стебнику, яку наведено у цій роботі, побудовано на підставі 1D моделей, що є результатом застосування розроблених алгоритмів до експериментальних даних ЗСБ, отриманих у листопаді 2017 р. Розроблені засоби дають змогу приймати оперативні рішення під час польових вимірювань щодо якості даних, а також давати оперативні оцінки стану досліджуваного об'єкта.

Викладення основного матеріалу

Апроксимація експериментальної кривої. У реальних експериментальних даних завжди присутні похибки спостережень і завади різного походження. Одним із способів зменшення їх впливу на результат є згладжування експериментальної кривої. Водночас, подальше застосування трансформацій експериментальних даних (див. наступний підпункт), що базується на асимптотичних формулах, отриманих на підставі апроксимації провідного середовища тонкими плівками, потребує чисельного розрахунку похідних і експериментальної $V(t)$, і результуючої $S(t)$ кривих. Для отримання якісної моделі електропровідності середовища необхідно, щоб ці похідні також були гладкими і неперервними залежностями. І останнє, для виділення границь шарів необхідно розрахувати другу похідну результуючої кривої $S(t)$ за часом. Це потребує багатократного згладжування експериментальної кривої, котре призводить до часткової втрати інформації про розріз. Щоб цього уникнути, ми розробили алгоритм апроксимації експериментальної кривої ЗСБ $V(t)$ на підставі рівнянь поширення ЕМ поля у провідному середовищі та функції кубічного сплайну. У такому випадку похідні (до третьої) розраховують, використовуючи коефіцієнти поліному для кожного вузла експериментальної кривої.

Трансформація експериментальної кривої ЗСБ $V(t)$ базується на тонко-плівковій апроксимації провідного півпростору. У методі ЗСБ реальний неоднорідний провідний півпростір у момент часу t характеризується позірною поверхневою провідністю шару S_t з товщиною, яка приблизно рівна ефективній товщині h_t проникнення поля у середовище. Цей шар замінюється тонким провідним шаром нульової товщини, але зі скінченною провідністю S_t , що залягає на ефективній глибині h_t . Для такої тонко-плівкової моделі та для пізньої стадії перехідного процесу становлення ЕМ поля величину S_t можна розрахувати аналітично [7], [8], [15]. Деталі розрахункового алгоритму можна знайти в таких роботах, як [7], [11], [14].

Побудова одновимірної моделі. Крива залежності питомого опору від глибини $\rho(h)$ можна легко розраху-

вати як похідну за глибиною від кривої $S(h)$, отриманої на попередньому етапі внаслідок трансформації. Проте 1D геоелектричну модель середовища, як результат досліджень методом ЗСБ, доцільно представити у величинах товщини шарів і їх питомого опору. Беручи до уваги той факт, що внаслідок зазначеної вище трансформації отримано все-таки не реальне, а позірне значення питомого опору $\rho(h)$, то у першому наближенні тут можна вважати, що реальний питомий опір шару ртутний або близький до максимального чи мінімального значення позірного опору. Максимуми і мінімуми кривої $\rho(h)$ знаходяться у точках, де перша похідна цієї кривої дорівнює нулю. Відповідно, межами шарів середовища можна вважати точки перегину кривої $\rho(h)$, де її друга похідна дорівнює нулю (змінює знак на протилежний). Коефіцієнти поліному, розраховані для кожного вузла кривої $\rho(h)$ внаслідок застосування алгоритму апроксимації кубічним сплайном, про який йшлося вище, дають змогу легко знайти її екстремуми і точки перегину. І останнє, для отримання надійнішої моделі ми ігнорували ті випадки, коли щонайменше три значення послідовної другої похідної змінюють знак на протилежний, розглядаючи таку ситуацію як вплив завад чи похибки вимірювань.

Геоелектрична модель перерізу дамби хвостосховища. Експериментальні вимірювання методом ЗСБ виконували вздовж дамби хвостосховища біля м. Стебник у листопаді 2017 р. (рис. 1). Хвостосховище заповнене рідкими відходами виробництва підприємства "Полімінерал" – водним розчином солей. Вимірювання проводили з метою оцінки стану дамби як перший крок для подальшого його моніторингу. Довжина дамби становить понад 3 км, вздовж гребеня якої було проведено вимірювання методом ЗСБ так званою установкою "петля в петлі" у 95 точках. У 58 точках вимірювання виконували з генераторною петлею розміром 20×20 м і вимірювальною – 10×10 м. У 37 точках застосовано генераторну петлю розміром 10×10 м і вимірювальну – 5×5 м. В усіх випадках використовували одиниткові квадратні петлі. На рис. 1 зеленими точками введено такі позначено: генераторна петля 20×20 м, вимірю-

вальна – 10×10 м. Фіолетові точки: генераторна петля 10×10 м, вимірювальна – 5×5 м

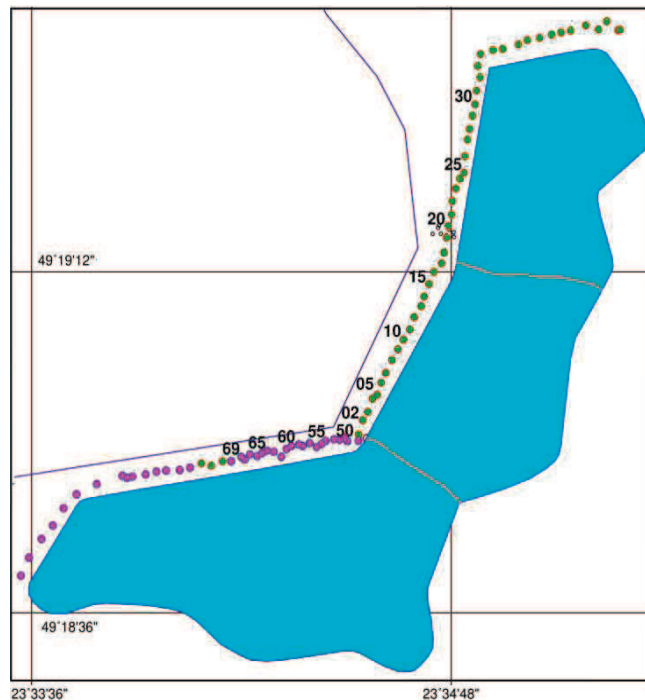


Рис. 1. План хвостосховища підприємства "Полімінерал" зі схематичним розташуванням точок спостережень ЗСБ на дамбі

До даних з кожної точки спостережень було застосовано описаний вище алгоритм експрес-аналізу даних ЗСБ, внаслідок чого для кожної з них було отримано 1D моделі питомого опору. Проектуючи точки спостережень на профіль вздовж дамби і комбінуючи графічні зображення 1D моделей на один рисунок, ми отримали псевдо 2D модель геоелектричного розрізу дамби. Для побудов у цій роботі використано не всі наявні точки спостережень, а лише зі середньої частини дамби, де стан дамби викликає найбільше зацікавлення. Точки виміру 2-33 з розмірами петель 20×20 м і 10×10 м – права частина рис. 2, а точки 48-69 – 10×10 м і 5×5 м ліва його частина.

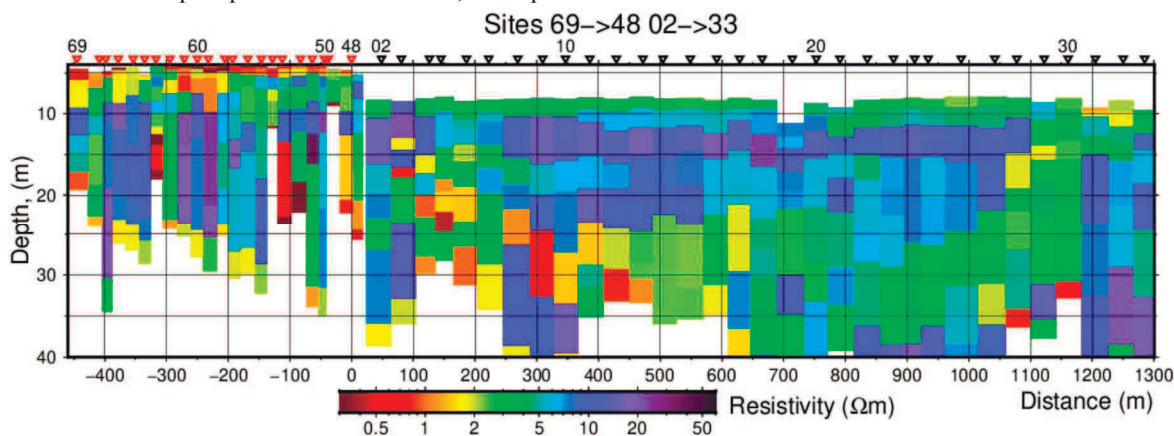


Рис. 2. Псевдо двовимірна геоелектрична модель геологічного розрізу дамби хвостосховища, побудована за результатами експрес-аналізу даних ЗСБ на листопад 2017 р.

Отже, за результатами експрес-аналізу можна стверджувати, що в тілі дамби до глибини 20-25 м переважають шари з відносно низькою електропровідністю (підвищеним питомим опором). Тому можна стверджувати, що не виявлено загрозливих місць потенційного просо-

чення розсолів. Проте виділено дві ділянки, де бажано виконати додаткові дослідження для уточнення геологічної ситуації. Ці ділянки в околицях точок 5-7 та 29-31, де спостерігаємо незначне зниження питомого опору середовища.

Висновки

У наведеній роботі на прикладі дамби хвостосховища у м. Стебнику продемонстровано ефективність застосування засобів експрес-аналізу експериментальних даних ЗСБ, котрі для окремих практичних випадків, є пріоритетними. Наближений результат, отриманий у точці спостережень під час вимірів, дає змогу приймати оперативні рішення під час польових робіт і в такий спосіб оптимізувати їх виконання. Швидка побудова наближених моделей дає змогу оперативно оцінювати стан досліджуваного об'єкта та виділяти ділянки для докладних досліджень без трудомісткої геологічної інтерпретації. І наостанок, такі наближені моделі можуть виступати як стартові для подальшого докладного моделювання досліджуваного об'єкта.

References

- [1] Ge, J., Everett, M. E., & Weiss, C. J. (2012). *Fractional diffusion analysis of the electromagnetic field in fractured media*. Part I: 2D approach, *Geophysics*, 77, WB213–WB218, <https://doi.org/10.1190/GEO2012-0072.1>.
- [2] Ge, J., Everett, M. E., & Weiss, C. J. (2015). *Fractional diffusion analysis of the electromagnetic field in fractured media*. Part 2: 3D approach, *Geophysics*, 80, E175–E185, <https://doi.org/10.1190/GEO2014-0333.1>.
- [3] Grytsiuk, Yu. I., & Leshkevych, I. F. (2017). The Problems of Definition and Analysis of Software Requirements. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(4), 148–158. <https://doi.org/10.15421/40270433>.
- [4] Hrytsiuk, Yu. I., & Andrushchakevych, O. T. (2018). Means for determining software quality by metric analysis methods. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(6), 159–171. <https://doi.org/10.15421/40280631>.
- [5] Hrytsiuk, Yu. I., & Nemova, E. A. (2018). Management Features Process of Developing Software Requirements. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(8), 161–169. <https://doi.org/10.15421/40280832>.
- [6] Hrytsiuk, Yu. I., & Nemova, E. A. (2018). Peculiarities of Formulation of Requirements to the Software. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(7), 135–148. <https://doi.org/10.15421/40280727>.
- [7] Kamenetsky, F. M., Stettler, E. H., & Trigubovich, G. M. (2010). *Transient Geo-Electromagnetics*. Munich, Ludwig-Maximilian University, Vela Verlag, 304 p.
- [8] McNeill, J. D. (1980). *Applications of transient electromagnetic techniques*. Geonics Ltd., Ontario, technical note TN 7, 17 p.
- [9] Meju, M. A. (1995). Simple effective resistivity-depth transformations for infield or real-time data processing. *Computer & Geosciences*, 21, 985–992.
- [10] Meju, M. A. (1998). A simple method of transient electromagnetic data Analysis. *Geophysics*, 63, 405–410.
- [11] Sidorov, V. A. (1985). *Pulse inductive electromagnetic prospecting*. Moscow: Nedra, 192 p. [In Russian].
- [12] Vallianatos, F. (2017). *Transient Electromagnetic Method in the Keritis basin (Crete, Greece): Evidence of hierarchy in a complex geological structure in view of Tsallis distribution*. *Annals of Geophysics*, 60, GM675, <https://doi.org/10.4401/ag-7551>.
- [13] Vallianatos, F., Kouli, M., & Kalisperi, D. (2018). Evidence of Hierarchy in the Complex Fractured System of Geropotamos (Crete, Greece), as Extracted from Transient Electromagnetic Responses. *Pure and Applied Geophysics*, 175, 2895–2904, <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1835-8>.
- [14] Xue, G.-Q., Bai, C.-Y., Yan, S., Greenhalgh, S., Li, M.-F., & Zhou, N.-N. (2012). Deep sounding TEM investigation method based on a modified fixed central-loop system. *Journal of Applied Geophysics*, 76, 23–32, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.10.007>.
- [15] Zhdanov, M. S. (1986). *Electromagnetic prospecting*. Moscow: Nedra, 316 pp. [In Russian].

B. T. Ladanivskyy^{1,2}, L. H. Savkiv¹, O. Ya. Sapuzhak¹, O. I. Romanyuk¹, O. I. Pidvirny¹, V. V. Kolyadenko¹, O. V. Syroezhko¹, S. A. Deshchytsya¹

¹ Carpathian Branch of S. I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

² Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

EXPRESS ANALYSIS OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC DATA ACQUIRED ON THE WASTE RESERVOIR DAM IN STEBNYK

Electromagnetic (EM) methods of geophysics allow to image the subsurface conductivity distribution by analyzing data measured on the Earth surface. The transient electromagnetic (TEM) sounding method is a time-domain controlled source one which utilize a non-stationary transient process of the EM field decaying in the conductive medium due to the step current excitation which is described by the Heaviside function. The mathematical and algorithmic tools for express analysis of such experimental data acquired for the TEM method are presented in this article, the practical application of which is sometimes important for experimental in field measurements, since it allows as to make immediate decisions on optimization of experimental field work as well as to qualitatively estimate the state of the object under study.

The proposed express analysis algorithm is developed on the basis of a widely used transformation of the experimental TEM curve, also known as the S-inversion, which in turn is based on the approximation of a conductive half-space by a thin sheet which is immersing into a non-conductive half-space with the decaying of transient process in the EM field. To reduce the influence of noise into the measured data, we carrying out the approximation of the experimental sounding curves accounting several aspects: the solutions of equations which describe the penetration of EM field into a conducting medium; the function of the cubic spline; and elements of mathematical analysis of continuous functions.

According to profile measurements, one dimensional models of resistivity distribution were obtained using the created express analysis tools and a pseudo two dimensional model of the geoelectric cross-section of the waste reservoir dam which is next to the Stebnyk town was constructed on their basis. The analysis of the obtained models allowed us to detect two areas where it is desirable to carry out additional studies to clarify the geological situation. Of course, algorithms for inversion of experimental data, both as from a mathematical point of view as well as from the point of view of algorithm implementation, are much more complicated. However, if one implements a fast and efficient one-dimensional inversion algorithm for the TEM data instead of the transformation mentioned above, it will be possible to significantly improve the reliability of the result.

Keywords: in field measurements; experimental data; cubic spline; electrical conductivity; geoelectrical cross-section

Інформація про авторів:

Ладанівський Борис Теодорович, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник, завідувач відділу геоелектромагнітних методів, асистент, кафедра програмного забезпечення. **E-mail:** borys.t.ladanivskyu@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-6074-1247>, <https://publons.com/researcher/W-4834-2019>

Савків Лідія Григорівна, мол. наук. співробітник, відділ геоелектромагнітних методів. **E-mail:** lidia@cb-igph.lviv.ua

Сапужак Олег Ярославович, канд. фіз.-мат. наук, відділ геоелектромагнітних методів. **E-mail:** olgs@cb-igph.lviv.ua

Романюк Олег Іванович, мол. наук. співробітник, відділ геоелектромагнітних методів. **E-mail:** carp@cb-igph.lviv.ua

Підвірний Олег Іванович, мол. наук. співробітник, відділ геоелектромагнітних методів. **E-mail:** olehp@cb-igph.lviv.ua

Коляденко Василь Васильович, провідний інженер, відділ геоелектромагнітних методів. **E-mail:** carp@cb-igph.lviv.ua

Сироєжко Олена Василівна, провідний інженер, відділ геоелектромагнітних методів. **E-mail:** lena.sk@cb-igph.lviv.ua

Дешиця Степан Андрійович, канд. геол.-мінерал. наук, ст. наук. співробітник, відділ геоелектромагнітних методів.

E-mail: stepdesh@cb-igph.lviv.ua

Цитування за ДСТУ: Ладанівський Б. Т., Савків Л. Г., Сапужак О. Я., Романюк О. І., Підвірний О. І., Коляденко В. В., Сироєжко О. В., Дешиця С. А.. Експрес-аналіз даних зондування становленням електромагнітного поля, отриманих на дамбі хвостосховища у Стебнику. *Український журнал інформаційних технологій*. 2019, т. 1, № 1. С. 67–71.

Citation APA: Ladanivskyu, B. T., Savkiv, L. H., Sapuzhak, O. Ya., Romanyuk, O. I., Pidvirny, O. I., Kolyadenko, V. V., Syroezhko, O. V., & Deshchytsya, S. A. (2019). Express analysis of transient electromagnetic data acquired on the waste reservoir dam in Stebnyk. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 1(1), 67–71. <https://doi.org/10.23939/ujit2019.01.067>