

АНОТАЦІЯ

Чернов А.П. Георадарний метод при вирішенні задач інженерної геофізики, гідрогеології, гляціології. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 – Науки про Землю. – ННІ «Інститут геології, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, 2020.

Робота здобувача направлена на узагальнення та вдосконалення чинної методики досліджень, алгоритмів обробки, створення методичних рекомендацій для проведення, обробки та інтерпретації результатів георадарних досліджень при вирішенні окремих завдань інженерної геофізики, гідрогеології, гляціології.

У Вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами. Визначено мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження, зазначено наукову новизну одержаних результатів, окреслено їх практичне значення, подано відомості про апробацію та опублікування результатів, про особистий внесок здобувача, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі «Сучасний стан георадарних досліджень при вирішенні задач інженерної геофізики, гідрогеології, гляціології» надано огляд історії виникнення та розвитку георадарних досліджень, основних публікацій на тему роботи, визначено основні сучасні тенденції розвитку методу при вирішенні задач інженерної геофізики, гідрогеології, гляціології.

Перший опис використання електромагнітних сигналів для виявлення підземних об'єктів з'явився у 1910 році в німецькому патенті Леймбаха і Лоуї (Leimbach and Lowy). Суть їх практичного використання полягала у заглибленні передавальних і вимірювальних дипольних антен у вертикальні свердловини і порівнянні величини сигналів, що приймалися вимірювальною антеною. Відтак, у результаті отримували хвильову картину для певного геологічного розрізу за рахунок того, що об'єкти мали більшу електропровідність, ніж оточуюче середовище, і поглинали електромагнітне випромінювання. Ці автори також описали наземні модифікації окремо розташованих антен, за допомогою яких можна відшукати поклади води або ж рудні поклади. Подальший розвиток

технології дозволив проводити визначення співвідношення часу приходу прямої хвилі (від джерела до приймача) до часу приходу електромагнітних хвиль, відбитих від відповідних меж в геологічному середовищі, що дало можливість визначити глибину до розташованих під поверхнею землі об'єктів.

Інтенсивний розвиток георадарного методу розпочався в 1920-х – 1930-х рр., коли електромагнітні методи на змінній частоті почали застосовувати для визначення потужності льодового покриву, знаходження прісної води та покладів солі, для досліджень в пустелі та гірських порід. Георадарний метод набув інтенсивного розвитку після Другої Світової війни за рахунок виникнення нових термінових завдань та виробництва нових георадарів. А.Д. Петровський був одним з перших дослідників СРСР, хто почав розвивати теорію георадарних досліджень і проводити практичне втілення радіохвильового методу («тіньовий метод»), що базувався на вивченні високочастотних хвильових полів. З 1970-х рр. дотепер область застосування георадарного методу неухильно зростає. Сьогодні дослідники мають широкий вибір георадарного обладнання та технічних засобів, які можливо застосовувати при геофізичних дослідженнях.

В ННІ Інститут геології георадарний метод досліджень почав використовуватись з 2013 року. Науковці кафедри геофізики використовують георадари VIУ як один з методів для дослідження археологічних об'єктів, пошуку підземних комунікацій, дослідження місць зволоження ґрунтів.

За результатами аналізу публікацій та наукових праць (фахові журнали видавництва Elsevier, наукометрична база Scopus, дисертації написані в Україні) набуто висновку, що георадарний метод є ефективним геофізичним методом досліджень при вирішенні приповерхневих інженерно-геологічних та геофізичних задач. В літературних джерелах описуються різноманітні методики та приклади застосування георадарного методу при вирішенні інженерно-геологічних, гідрологічних, літологічних, структурно-геологічних, екологічних, гляціологічних задач. Однак існує потреба узагальнення та вдосконалення існуючих методик дослідження, та алгоритмів обробки для вирішення окремих завдань, є потреба у розробці методичних рекомендацій для проведення георадарних досліджень, вдосконаленні алгоритмів для їхньої обробки та

інтерпретації. Цим підтверджується актуальність визначеної тематики дисертаційного дослідження.

Другий розділ «Фізико-геологічні передумови застосування георадарних досліджень» охоплює теоретичні основи методу, геологічні та фізико-хімічні засади використання георадарного методу.

Георадарний метод є однією з модифікацій електромагнітних методів. Головні фізичні принципи методу базуються на наступних фізичних властивостях: відносна діелектрична проникність середовища (ϵ) – безрозмірна фізична величина, яка характеризує у скільки разів сила взаємодії двох електричних зарядів у досліджуваному середовищі менша, ніж у вакуумі; питомий електричний опір (ρ , Ом·м) чи питома електрична провідність середовища ($\gamma=1/\rho$, Ом⁻¹/м=См/м); відносна магнітна проникність середовища (μ) – безрозмірний параметр, що характеризує здатність середовища концентрувати в собі магнітні силові лінії зовнішнього магнітного поля. На сьогодні вважають домінуючою фізичною властивістю, яка використовується в георадарному методі, діелектричну проникність середовища. Врахуючи, що верхня частина розрізу практично немагнітна ($\mu=1$), головний вплив на електромагнітний сигнал має діелектрична проникність.

За результатами попередніх досліджень визначено, що водонасичення пластів є основним фактором, який впливає на зміну діелектричної проникності і, відповідно, на швидкість електромагнітної хвилі. У високочастотному діапазоні, у якому працює георадар, вода має відносне значення діелектричної проникності 81, для сухих гірських порід це значення коливається в межах від 2 до 10 і зростає по мірі зволоження. На межі середовищ із різною діелектричною проникністю й виникає відбиття електромагнітної хвилі. Згідно з даними у проаналізованих публікаціях, перепад у 3% вологості викликає значну зміну в амплітуді сигналу.

У третьому розділі: «Методика проведення георадарних досліджень для вирішення задач інженерної геофізики, гідрогеології, гляціології» зазначено рекомендації по параметрам налаштування георадара, діапазони робочих частот, проаналізовано використані види антен для отримання найкращої інформативності георадарних досліджень для вирішення задач дисертаційної

роботи. Експериментальним шляхом визначено оптимальні налаштування для обладнання, процедури обробки і їх налаштування, які дозволяють виділити об'єкти пошуку при вирішенні задач інженерної геології, гідрогеології, гляціології. Здобувач застосовує процедури обробки, які описані в наукових публікаціях, але підібрані оптимальні набори фільтрів та їх налаштування для вирішення окремих задач. Спочатку застосовувався стандартний граф обробки: встановлення «нуля по часу», деконволюція (deconvolution), корегування форми хвилі (wavelet optimization), пригнічення фонових лінійних шумів (background removal), підсилення сигналу, частотна фільтрація даних. Для виділення характерних особливостей об'єктів визначено інформативність таких інструментів обробки для вирішення відповідних задач: 1) автоматичне підсилення – за аналізом розрахованої програмою Synchrono автоматичної функції підсилення, здобувачем були виявлені пустоти в масиві гіпсу. Процедура автоматичного підсилення в публікаціях застосовується для підсилення сигналу по глибині профілю, а при дисертаційному дослідженні визначено інформативність функції автоматичного підсилення для виявлення пустот. 2) кольорові палітри – виділення характерних амплітуд відбиття для прослідковування шаруватості геологічного розрізу та льоду, зон намокання ґрунту, локалізація археологічних об'єктів; 3) фільтр Гільберта – виділення місць із максимальною енергією відбиття та інші інструменти, які описані в розділі 3 та результати застосування наведено у графічних додатках до дисертації.

У четвертому розділі «Результати застосування георадарного методу при вирішенні задач інженерної геофізики, гідрогеології, геоекології» представлено результати застосування георадарного методу для вивчення внутрішніх неоднорідностей в льодовиках (потужність льодового покриву, шаруватість льодовиків, моніторинг процесів розвитку тріщинуватості та зон накопичення вологи), дослідження історичних пам'яток (виявлення підземних ходів, місця скупчення археологічних об'єктів, крипт), ділянок розвитку зсувних процесів, визначення ділянок зволоження ґрунту, знаходження підземних комунікацій, границь між шарами порід.

Наукова новизна:

1. Уперше підготовлені зведені методичні рекомендації по обробці та інтерпретації георадарних досліджень для об'єктів інженерної геофізики, гідрогеології, гляціології. З врахуванням центральної частоти сигналу, кроку, глибинності досліджень, амплітудних та частотних особливостей отриманих даних наведено методичні рекомендації по польовому та камеральному етапу георадарних досліджень.

2. Уперше розроблено методику моніторингових спостережень за неоднорідностями у льодовому покриві із застосуванням георадарного методу для дослідження острівних льодовиків Аргентинських островів (Західна Антарктика).

3. Отримані нові геологічні результати, зокрема **вперше**:

3.1. Досліджено потужність острівних льодовиків на Аргентинських островах, Архіпелаг Вільгельма, Західна Антарктида. Найбільша потужність льоду спостерігається на льодовику о. Галіндез і складає 35.3 м.

3.2. Виявлено шарувату будову льодовиків на островах Галіндез, Вінтер, Скуа (Західна Антарктида).

3.3. Виявлено за даними георадарних досліджень річну динаміку змін у внутрішній структурі льодовиків на островах Галіндез та Вінтер (Західна Антарктида).

4. Удосконалено методику виконання, обробки та інтерпретації георадарних досліджень. Визначено рекомендований перелік процедур для обробки та інтерпретації георадарних даних для вирішення задач інженерної геофізики, гляціології та гідрогеології.

Ключові слова: георадар, інженерна геофізика, льодовики, гляціологія, Антарктида, археологія, гідрогеологія.

ANNOTATION

Chernov A.P The application of ground penetrating radar for engineering investigations in geophysics, hydrogeology and glaciology. Георадарний метод при вирішенні задач інженерної геофізики, гідрогеології, гляціології. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript. Thesis for a scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 103 – Earth Sciences (10 – Natural Sciences). – ESI “Institute of Geology”, Taras Shevchenko National University of Kyiv. - Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 2020.

The research is devoted to generalization and development of a current investigation methodology, processing algorithms, manual recommendations for a field work, processing and interpretation of the ground penetrating radar (GPR) investigations for engineering geophysics, hydrogeology, glaciology.

In the introduction the relevance of the research topic and connection with scientific programs are justified. Aims, objects, scientific novelty of the results and its practical benefit, information about publications and presentations of the main results, personal contribution of the Ph.D. candidate, structure and content of the manuscript are specified.

The first chapter “Current state of the GPR investigations for solving problems of engineering geophysics, hydrogeology, glaciology” represents the origin and development of the method, review of publications, the modern trends of GPR method development are mentioned.

The first description of electromagnetic signals use for location of buried objects appeared in a German patent by Leimbach and Lowy in 1910. Their technique consisted of burying dipole antennas in an array of vertical boreholes and comparing the magnitude of signals received when successive pairs were used to transmit and receive. In this way, a crude image could be formed of any region within the array which, through its higher conductivity than the surrounding medium, preferentially absorbed the radiation. These authors described an alternative technique, which used separate, surface-mounted antennas to detect the reflection from a sub-surface interface due to ground water or to an ore deposit. An extension of the technique led to an

indication of the depth of a buried interface, through an examination of the interference between the reflected wave and that which leaked directly between the antennas over the ground surface.

Intense development of the method started in 1920-1930th, when electromagnetic methods with variable frequency of the signal were applied for measurement of the ice thickness, investigation of salt deposits, desert sand and rocks. Ground penetrating radar method was developed rapidly after World War II, because of urgent research topics and technological development of the manufacturers. Petrovskiy A.D. was one of the first researchers of GPR method in the USSR. He started to investigate theoretical aspects of the approach and practical use of radio wave method (“shadow method”), which was based on investigation of high frequency fields. Since 1970th the range of topics for GPR investigations is raising steadily. Nowadays there are many GPRs and following technical devices, which can be used for geophysical investigations.

Researchers from the NSI Institute of geology started to use Ground penetrating radar method in 2013. VIY GPR is applied in combination with other geophysical approaches for archaeological investigations, underground utilities localization, areas of soils with higher moisture content.

According to the information in publications (Elsevier, Scopus, dissertations of Ukrainian scientists), GPR is productive geophysical method for solving near surface problems of engineering geology and geophysics. There are different methodological approaches for the GPR investigations in engineering geology, for hydrogeology, lithology, structural geology, ecology, glaciology, which are described in publications. However, there is a need in generalization and development of current practical methodology for GPR investigations. Development of processing flow for exact objects, instructions for the field work, processing and interpretation stages should be obtained. Therefore this Ph.D. research was organized.

The second chapter “Physics and geological conditions for application of ground penetrating radar method” contains theoretical, geological and physical background of GPR method.

Ground penetrating radar is one of the electromagnetic methods. The main physical principles of the method are based on several physical properties of the medium. Relative dielectric permittivity of the medium (ϵ) – dimensionless physical property that shows the factor by which the electric field between the charges is decreased in the material relative to vacuum. Specific electrical resistivity (ρ , ohm·m) or specific conductance of the medium is the reciprocal of electrical resistivity $\gamma=1/\rho$, (ohm⁻¹/m=S/m). Relative magnetic permeability of the medium (μ) is dimensionless parameter, which describes magnetization that a material obtains in response to an applied magnetic field; it is the ratio of the permeability of a specific medium to the permeability of free space. The upper part of the geological medium in most occasions is non-magnetic ($\mu=1$), therefore relative dielectric permittivity is the main influencer on the results. Therefore, nowadays relative dielectric permittivity of the medium is considered the main property that considered during the GPR investigations.

Results of the previous investigations show that water saturation is the main factor, which regulates the variation of dielectric permittivity and velocity of electromagnetic wave. For ground penetrating radar high frequency range, dielectric permittivity of the water is 81, for dry rocks it changes in the range between 2 – 10 and rises if moisture content is higher. The reflection of electromagnetic wave happens on the border between parts of the medium with different dielectric permittivity. According to the data in publications, 3% change of the moisture content leads to recognizable change of the amplitude.

The third chapter “Methodology of GPR investigations for solving problems of engineering geophysics, hydrogeology, glaciology” depicts recommendations for the equipment settings, description of the applied antennas and their informativeness for solving problems of Ph.D. thesis. Results of the experiments help to obtain optimal settings for the field work, processing flow and its settings, which allow to localize objects of investigation for solving problems of engineering geology, hydrogeology, glaciology. The major applied processing tools are described in the publications, but the aim was to obtain optimal processing flow and tools settings for solving problems of the Ph.D. research. First of all, standard processing flow was applied: time zero correction, deconvolution, wavelet optimization, background removal, signal gain,

frequency filtering. For identification of informative features of the objects, there are several tools for solving of the exact problems: 1) “auto gain” function in Synchro software is applied for identification of the voids in gypsum. This tool is described by authors of the publications as an approach just for a signal gain along the depth of the profile, but during this Ph.D. research Auto gain was successfully used for voids identification; 2) color palettes are used for highlighting of specific amplitudes of the signal for layering identification in the rocks and ice, zones with higher moisture, localization of archaeological objects; 3) Hilbert filter is applied for identification of the areas with maximum reflection energy and other tools are described in the chapter 3 and results are shown in the appendixes.

The fourth chapter “Results of ground penetrating radar application for solving problems of engineering geophysics, hydrogeology, glaciology” represents the results of GPR application for investigations of heterogeneities in glaciers (the ice thickness, its layering, monitoring of crevasses and water saturation development), of historical heritages (localization of the underground passages, archaeological objects, crypts), sites of landslides development, identification of the underground areas with higher moisture content, utilities searching, borders between layers in the rocks and soils.

The novelty of the study:

1. *For the first time* generalization of methodological recommendations for the processing and interpretation of the GPR data for the objects of engineering geophysics, hydrogeology, glaciology. A central frequency of an antenna, step of measurements, depth of the investigations, amplitude and frequency spectrum of the data were considered for field work and processing flow methodological summary.

2. *For the first time* methodology for monitoring observations of heterogeneities inside of the ice for investigations of ice caps on Argentine islands (West Antarctica)

3. New geological results were obtained:

- 3.1. The thickness of the ice caps on the Argentine islands (Wilhelm Archipelago, West Antarctica). The maximum thickness of the ice was 35.3 m on Galindez island.

- 3.2. Layering of the ice caps on the islands Galindez, Winter, Skua (West Antarctica) was identified.

3.3. Annual interglacial dynamics of the ice caps on the islands Galindez and Winter (West Antarctica) was identified.

4. The methodology of field work, processing and interpretation of GPR data were improved during the research. Processing and interpretation flow for solving problems of engineering geophysics, glaciology and hydrogeology were obtained.

Key words: ground penetrating radar (GPR), engineering geophysics, ice caps, glaciology, Antarctica, archaeology, hydrogeology.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. J. Karušs, K. Lamsters, A. Chernov. M. Krievāns, J. Ješkins Subglacial topography and thickness of ice caps on the Argentine Islands Antarctic Science. 31(6), 332–344 (2019) <https://doi.org/10.1017/S0954102019000452>
2. Anatolii Chernov, Dariusz Dziubacki, Martina Cogoni and Alexandru Badescu. (2018). First conclusions about results of GPR investigations in the Church of the Assumption of the Blessed Virgin Mary in Klodzko, Poland”, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 7, 123–128, 2018 <https://doi.org/10.5194/gi-7-123-2018>
3. Chernov. (2017). Informativeness of ground penetrating radar method for investigations of the glaciers on Galindez, Winter and Skua islands (the argentine islands, results for the period April to November 2017), *Український Антарктичний Журнал*, №16, 29—36. <http://uaj.uac.gov.ua/index.php/uaj/article/view/56/22>
4. Chernov, M. Reva. (2016). Informativeness of the GPR method on the example of results from experimental site, *Visnyk*, 3 (74), 38-43. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.74.07>
5. А. П. Чернов, Р. П. Голяка. (2016). Identification of heterogeneities in the upper part of geological medium with ground penetrating radar VIY3-300, *Збірник наукових праць інституту геологічних наук НАН України*, 48-53. http://transactions.igs-nas.org.ua/pdf2016/2016_st_48-53_Chernov.pdf

Наукові праці які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Ivanik O., Shabatura O., Hadiatska K., Chernov A., Kravchenko D., Khomenko R. (2020). Application of geophysical methods for monitoring of landslide hazards: case study from Glynka Lake (Kyiv, Ukraine), Second EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities, Kyiv, Ukraine, 8-11 September, 2020.
2. Anatolii Chernov, Denis Pishniak, Kristaps Lamsters, Jānis Karušs, and Māris Krievāns. (2019). Interglacial heterogeneities in the ice caps of the Argentine

islands and their dynamics during first 2 years of GPR investigations, *EGU General Assembly 2019*, Vienna, Austria, 7-12 April 2019.

3. А. Чернов, О. Данілов, С. Вижва. (2019). Comparison of Vertical Electric Sounding, resonance acoustic profiling and ground-penetrating radar survey informativeness for investigation of engineering geology conditions of metropolitan in Kyiv, *Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти: Міжнародна конференція*, Київ, Україна, 13-16 травня 2019.

4. Ксения Бондарь, Михаил Сохацкий, Мария Барышникова, Анатолий Чернов, Ярослав Попко, Олег Петрокушин, Мирослав Бойко. (2019). Геоархеологические исследования памятника трипольской культуры пещера Вертеба (Украина) геофизическими методами, Четвертая международная конференция "Археология и геоинформатика", Москва, Россия, 21-23 мая 2019.

5. Chernov, J. Karušs, K. Lamsters, M. Krievāns, Yu. Otruba. (2018). First results of glacier monitoring on Wozzle hill (Galindez island, the Argentine islands, Antarctica) for the period April 2017-August 2018, *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Kyiv, Ukraine, 13–16 November 2018.

Наукові праці які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Chernov, K. Lamsters, J. Karušs, M. Krievāns, Yu. Otruba, (2018). A brief review of GPR investigation results of ice caps on Galindez, Winter and Skua islands (Wilhelm archipelago, Antarctica) for the period April 2017 – January 2019, *Український Антарктичний Журнал*, №1 (17), 40—47. [https://doi.org/10.33275/1727-7485.1\(17\).2018.30](https://doi.org/10.33275/1727-7485.1(17).2018.30)

2. Anatolii Chernov, Pishniak Denis, Otruba Yu. (2019). Monitoring of ice caps interior heterogeneities on the Argentine Islands (Wilhelm Archipelago, Antarctica) during April 2017 – April 2019. *IX Міжнародна Антарктична конференція*, Київ, Україна, 14-16 травня 2019.

3. Chernov, O. Loshakov. (2016). Influence of GPR measure step and depth of investigation on quality of GPR profiles, *conference proceedings Geoinformatics 2016*, Kyiv, Ukraine, 10-13 May 2016. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600500>