

- ЧЕРЕПАНСЬКА І. Ю.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0003-0741-7194
e-mail: cherepanskairina@gmail.com
- БЕЗВЕСІЛЬНА О. М.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0002-6951-1242
e-mail: o.bezvesilna@gmail.com
- НІЧИК В. С.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
e-mail: vitalika3399c@gmail.com
- КОТЛЯР С. С.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0002-6747-5698
e-mail: s.tkachenko@kpi.ua
- НЕЧАЙ С. О.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0002-0056-6341
e-mail: prilad@ukr.net

АВТОМАТИЗОВАНА ГРАВИМЕТРИЧНА СИСТЕМА З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПОШУКУ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Стаття присвячена актуальній на сьогодні проблемі – гравіметричним дослідженням Землі на наявність у ній покладів корисних копалин. Для вирішення проблеми було розроблено систему автоматизованої гравіметричної зйомки з елементами штучного інтелекту для пошуків корисних копалин. Запропонована система інтелектуального визначення корисних копалин при гравірозвідувальних роботах використовує в якості чутливого елемента двоканальний ємнісний гравіметр. До переваг даної системи можна навести швидкість визначення ключових точок, в яких присутні відхилення вільного падіння, можливість роботи у важкодоступних регіонах земної кулі за допомогою використання безпілотних літальних апаратів, висока точність, завдяки використанню новітнього двоканального ємнісного MEMS гравіметра, в якому висока точність досягається за рахунок зменшення основних вимірюваних похибок шляхом використання двох каналів, економічністю, адже не потребується використання великої кількості коштовних приладів та систем. Розроблено правила визначення копалин у залежності від значення вільного падіння.

Ключові слова: корисні копалини, штучний інтелект, гравіметр, автоматизована гравіметрична система, гравірозвідка.

IRINA CHEREPANSKA, OLENA BEZVESILNA, VITALII NICHYK, SVITLANA KOTLIAR, SERHII NECHAY
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

AUTOMATED GRAVIMETRIC SYSTEM WITH ELEMENTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO SEARCH FOR MINERALS

The article is devoted to a topical problem - gravimetric study of the Earth for the presence of mineral deposits. To solve the problem, a system of automated gravimetric surveying with elements of artificial intelligence for the search for minerals has been developed.

The proposed system of intelligent determination of minerals in gravitational exploration works uses a two-channel capacitive gravimeter as a sensitive element. The advantages of this system include: the speed of determining the key points where there is a deviation of free fall acceleration, the ability to work in hard-to-reach regions of the globe with unmanned aerial vehicles, high accuracy through the use of the last two-channel capacitive MEMS gravimeter. The advantages of MEMS (Micro Electro-Mechanical System) include high accuracy compared to analog devices, low cost of production in mass production. The small size of MEMS-gravimeters allows to expand the scope and increase the functionality of use in miniature research systems. The high accuracy of the gravimeter used in the system is achieved by reducing the main measurement errors by using two channels. The advantages also include efficiency, as it does not require the use of a large number of expensive devices and systems. The dependences of mineral on the magnitude of free fall acceleration are determined in the work and fuzzy rules of their determination are developed.

According to engraving, conducted using the proposed automated gravimetric system with elements of artificial intelligence, we can with some probability talk about the presence of minerals such as copper, magnetite, coal and others. At the same time information processing time is reduced. Further clarification of the depth and size of the mineral deposit requires additional geological and geophysical research, such as the use of remote spectral and structural analysis of minerals with the involvement of satellite exploration.

Keywords: minerals, artificial intelligence, gravimeter, automated gravimetric system, engraving

Постановка проблеми

Сучасна гравірозвідка як метод пошуку родовищ корисних копалин потребує застосування сучасних інноваційних технологічних методів отримання та обробки гравіметричних даних для прийняття рішень у складних ситуаціях та режимі реального часу, що обумовлюється тим, що різні корисні копалини, які у надрах Землі можуть знаходитись на різній глибині та мати різні об'єми запасів, створюють майже однакові аномалії прискорення сили тяжіння. Тому особливо гостро стоїть проблема підвищення точності гравіметрів, що використовуються у геолого-розвідувальних роботах для пошуку родовищ корисних

копалин, та побудови на їх основі швидкодіючих, високоточних, автоматизованих вимірювальних систем, що працюють у режимі реального часу.

Аналіз останніх джерел

Аналіз відомих інформаційних джерел вказує, що на сьогодні відома низка різних автоматизованих гравіметричних систем, що можуть використовуватись для дистанційного пошуку корисних копалин. Всі вони відрізняються своєю будовою, точністю, швидкодією, рівнем автоматизації та принципами обробки вимірювальної інформації. Так, у роботі [1] представлено автоматизовану гравіметричну систему для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння на базі МЕМС-гравіметра, що має вищу точність (1 мГал) та швидкодію у порівнянні із відомими. Проте інформація у роботі представлена фрагментарно, що не дає можливості повного уявлення про принципи роботи системи та обробки вимірювальної інформації.

У роботі [2] наведено апаратно-програмний комплекс для дослідження емнісного гравіметра. Показано принципову схему апаратно-програмного комплексу, а також варіанти схем підключення емнісного гравіметра до ЕОМ для отримання інформації про прискорення. Показано також інтерфейс програмного забезпечення апаратно-програмного комплексу, за допомогою якого здійснюється задання параметрів роботи вібростенду та отримання результатів. Проте в статті наведено лише апаратну частину запропонованої авторами статті системи та не наведено данні що дозволяють використовувати гравіметр для гравіметричної розвідки.

У роботі [3] розглядається варіант безплатформного супутниково-інерційного навігаційно-гравіметричного комплексу, структура його датчиків первинної інформації та функціональні алгоритми роботи, що забезпечують можливість досягнення достатньої точності векторних гравіметричних вимірювань, визначення параметрів орієнтації та навігації. Проте інформація представлена фрагментарно і не в повному обсязі, що ускладнює її сприйняття та детальне вивчення тощо.

У роботі [4] викладено основні відомості про геоінформаційну систему (ГІС) РАПІД, яка орієнтована на спільну обробку та аналіз наземних та космічних даних. Система об'єднує інструментарій універсальних ГІС з математичним апаратом Data Mining, що орієнтований на інтелектуальний аналіз великих об'ємів даних та надає можливість інтегрувати різні типи багаторівневі дані та добувати з них корисну інформацію. Проте система описує лише процес прийняття рішень за умови наявності корисних копалин та у відповідності до наперед готових гравіметричних карт Землі, що значно звужує її функціональні можливості та унеможливує використання цієї системи у режимі реального часу при гравіметричній розвідці нових, раніше невідомих родовищ корисних копалин. Крім того, у роботі не розглядаються методи збору гравіметричної інформації, а опис технології застосування Data mining щодо гравіметричної розвідки представлено фрагментарно.

У роботі [5] розглядається новий клас алгоритмів розв'язання обернених задач гравіметричної розвідки. Вибір найкращого рішення із множини допустимих варіантів інтерпретації здійснюється за допомогою критеріїв оптимальності, запозичених з теорії прийняття рішень та адаптованих до геофізичної проблематики. Обговорюється концепція здобуття інформації про джерела гравітаційних аномалій, у результаті чого приймається не одне глобально-оптимальне рішення зворотної задачі, а набір окремих локально-оптимальних рішень. Проте у даній роботі в якості джерел інформації виступають евристичні припущення, що знижує достовірність отриманих результатів.

У роботі [6] підвищено роль емпіричних методів визначення наявності корисних копалин шляхом кластеризації раніше відомих даних про корисні копалини та застосування технології нечіткої логіки для підвищення швидкодії, простоти та точності гравіметричної розвідки. Досліджено емпіричний зв'язок між геологічними даними відомих мінералів та їх наявністю у Земній корі. Проте у роботі має місце деяка декларативність та фрагментарність описів нечітких правил, що покладені в основу методів визначення корисних копалин.

Таким чином, можна стверджувати, що на сьогоднішній день відсутній загальний та комплексний підхід до автоматизації процесу визначення наявності корисних копалин з високою точністю та швидкодією у режимі реального часу. Представлені результати наукових досліджень у відомих роботах [1–6] характеризуються фрагментарністю та декларативністю описів гравіметричних систем, принципів їх роботи та побудови, правил прийняття рішень. Вказане і визначає актуальність даної статті.

Метою статті є запропонувати на основі аналізу фізичних принципів гравіметрії, принципів роботи двоканального емнісного гравіметра та технологій FuzzyLogic автоматизовану гравіметричну систему з елементами штучного інтелекту підвищеної точності та швидкодії для дистанційного пошуку корисних копалин.

Виклад основного матеріалу

Опис запропонованої автоматизованої гравіметричної системи з елементами штучного інтелекту для пошуку корисних копалин. Запропонована автоматизована гравіметрична система з елементами штучного інтелекту для пошуку корисних копалин є інноваційною розробкою, яка обумовлюється такими перевагами, як:

- швидкість інтерпретації гравіметричної розвідки у зрозумілий для людини вигляд;
- можливість застосування в умовах невизначеності, які виникають на первісних етапах геолого-розвідувальних робіт, а також при розвідці у важкодоступних місцях;
- точність, яка забезпечується використанням у складі системи в якості первісного вимірювального засобу прецизійного гравіметра, що може бути встановлений на безпілотному літальному апараті

(наприклад, на квадрокоптері). Останнє дозволяє проводити гравіметричну розвідку у важкодоступних місцях та виконувати гравіметричну зйомку з великою роздільною здатністю;

– можливість інтеграції результатів гравіметричної розвідки з аерокосмічною зйомкою, що дозволяє з високою точністю та швидкодією в режимі реального часу визначати види корисних копалин, їх запаси та глибину залягання.

Структурна схема запропонованої авторами автоматизованої гравіметричної системи з елементами штучного інтелекту (АГСШІ) показана на рис. 1. АГСШІ сформована, як багаторівнева сукупність деяких технічних засобів, що мають неоднорідні властивості.

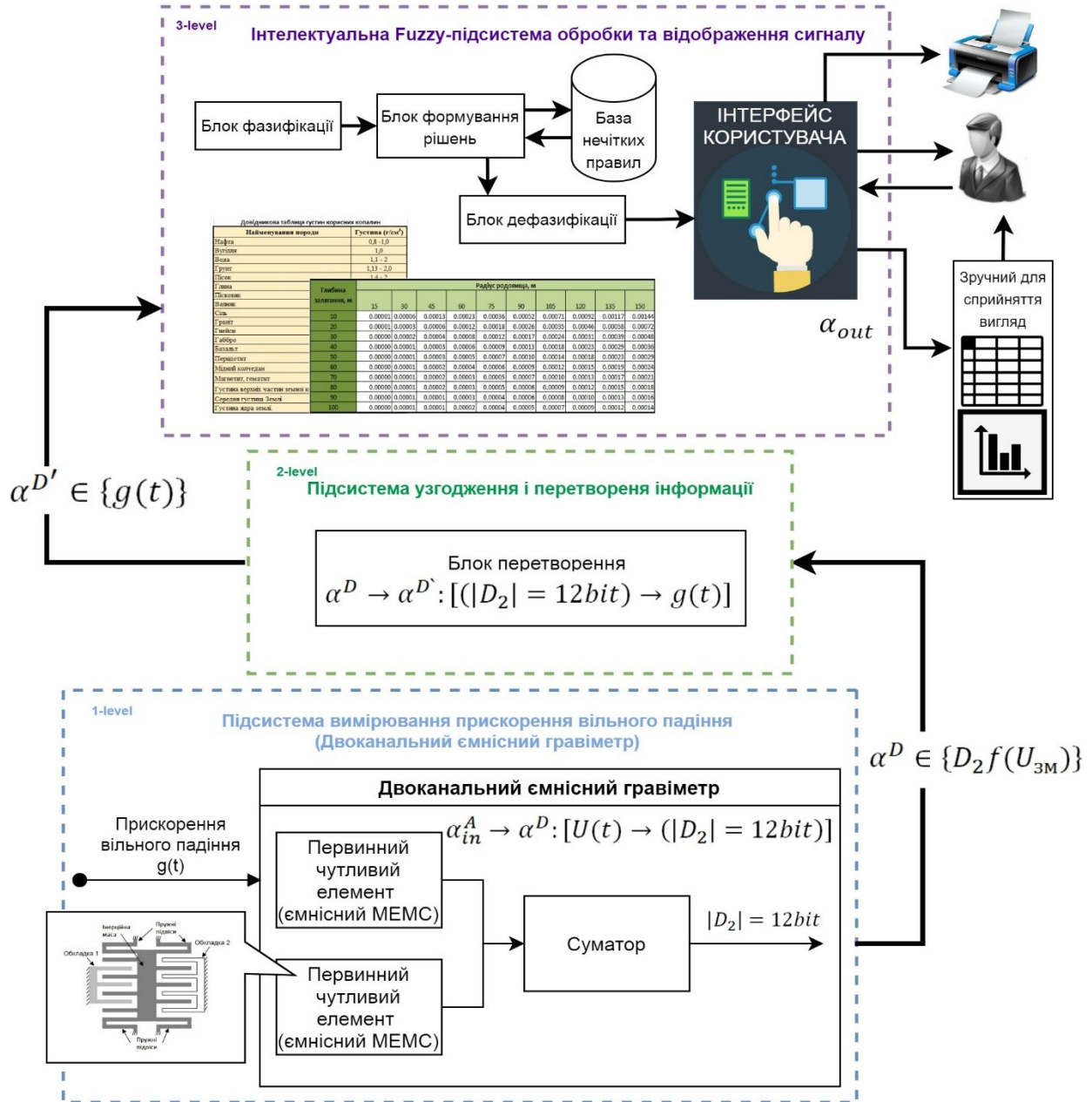


Рис. 1. Структурна схема АГСШІ

Перший рівень(1-level) запропонованої АГСШІ, представляє собою рівень формування вхідного вимірювального сигналу α_{in}^A . Він реалізований у вигляді *підсистеми вимірювання прискорення сили тяжіння*, основним елементом якої є *двоканальний ємнісний гравіметр* (ДЕГ). У кожному каналі ДЕГ встановлено ідентичні одноканальні ємнісні гравіметри (ЄГ), чутливі елементи яких представляють собою дві металеві пластини, що розділені діелектриком (рис. 2). Одна із пластин рухома, інша закріплена жорстко. До рухомих пластин прикріплено інерційні маси m_1 та m_2 . Під дією прискорення сили тяжіння змінюється відстань між пластинами конденсатора. Зміна відстані між обкладинками перетворюється у зміну ємності С конденсатора. На електродах чутливого елемента зміна ємності С перетворюється у зміну напруги U. Оскільки застосовується двоканальна схема, то необхідно додавати значення вихідних напруг на виході кожного із ЄГ. Результатом буде подвоєний сигнал прискорення вільного падіння.

У цілому на 1-level вимірюється значення прискорення вільного падіння, і перетворюється у

цифровий двійковий 12-бітний сигнал: $\alpha_{in}^A \rightarrow \alpha^D$: $[U(t) \rightarrow (|D_2| = 12\text{-bit})]$, α^D – є двійковим цифровим сигналом, що несе інформацію виду $2g(t)$.

Наступний рівень (2-level) представляє собою **підсистему узгодження і перетворення інформації**. Тут відбувається перетворення 12-бітного двійкового сигналу, що відповідає подвоєному прискоренню вільного падіння на Землі, у число десяткової системи числення, що є зручним для сприйняття користувачем та відображає значення прискорення вільного падіння $g(t)$. Основним елементом даного рівня є мікрокомп'ютер, що виконує основну задачу – перетворення сигналу.

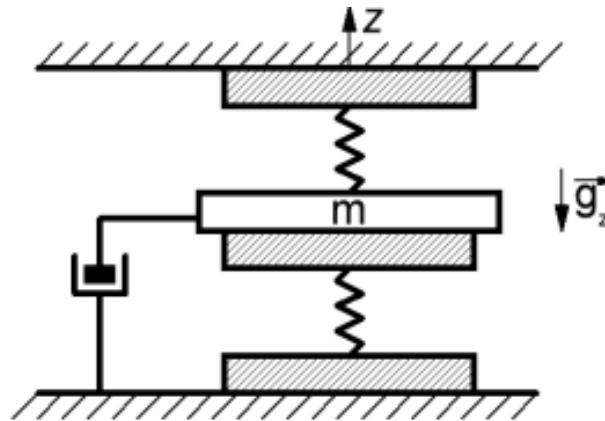


Рис. 2. Принципова схема одноканального ЄГ [2]

З 2-го рівня множина вимірних значень прискорення передається далі на наступний рівень (3-level) **інтелектуальної Fuzzy підсистеми обробки та відображення сигналу**, що представляє собою підсистему обробки вхідного сигналу та відображення ймовірності наявності корисних копалин у зручному для розуміння вигляді.

Основним елементом даної підсистеми є нечітка система прийняття рішень, яка містить базу з нечітких правил та лінгвістичних змінних, а також блоки фазифікації, дефазифікації та прийняття рішень, що реалізована як спеціальний програмний додаток на ЕОМ. Блок фазифікації виконує перетворення чисельних вхідних значень у ступінь відповідності до лінгвістичних змінних. Блок дефазифікації перетворює вихідні результати в чисельні значення, а блок прийняття рішень виконує вибір відповідного нечіткого правила, та виведення результату.

Для кожної точки на Земній поверхні існує теоретичне значення прискорення вільного падіння g_φ , яке розраховується за формулою:

$$g_\varphi = g_0(1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi), \tag{1}$$

де g_φ – прискорення вільного падіння для певної географічної широти, g_0 – прискорення вільного падіння на екваторі, φ – географічна широта.

У режимі реального часу система перетворює вхідний сигнал у вигляді прискорення вільного падіння g у різницю між реальним і теоретичним значенням Δg . Саме різниця прискорення вільного падіння, так звана аномалія Буге є основним показником наявності у земних надрах корисних копалин. Залягання на певній глибині певного матеріалу відомої густини, може спричинити виникнення гравітаційної аномалії, яку і вловлює високоточний гравіметр. У роботі було розраховано аномалії таких корисних копалин, як мідь, магнетит та вугілля. Теоретичні значення аномалії прискорення вільного падіння Δg розраховувались за так званою прямою задачею гравірозвідки для безкінечно довгого кругового циліндра за формулою (2)[6]:

$$\Delta g = \frac{2Gh\pi R^2(\sigma - \sigma_0)}{x^2 + h^2}, \tag{2}$$

де G – гравітаційна стала, $m^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, h – глибина залягання копалини, м; R – радіус родовища, м; σ – густина копалини, $\text{кг}/\text{м}^3$, σ_0 – густина основної породи, $\text{кг}/\text{м}^3$; x – відстань від центру мас, м.

Аномалій прискорення вільного падіння в залежності від радіусу родовища, що змінюється з кроком у 15м та глибини залягання для корисних копалин: міді, магнетиту, вугілля, що змінюється з кроком у 10м представлено у таблиці 1. Отримані дані є основою синтезу нечітких правил визначення залягання корисних копалин, які наведені у таблиці 2. Очевидно, що використання вже сформованих правил, дає можливість використовувати систему у режимі реального часу.

Більш детально відомості щодо особливостей конструкції, основних похибок ємнісного MEMS гравіметра, уточненого алгоритму для отримання інформації щодо прискорення вільного падіння або його аномалії можна знайти у [7, 8].

Таблиця 1

Аномалії прискорення вільного падіння в залежності від глибини та розміру родовища

Глибина залягання, м	Радіус родовища, м									
	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
10	0.00001	0.00004	0.00014	0.00033	0.00064	0.00110	0.00175	0.00261	0.00372	0.00510
20	0.00000	0.00002	0.00007	0.00017	0.00032	0.00056	0.00089	0.00132	0.00188	0.00258
30	0.00000	0.00001	0.00004	0.00009	0.00017	0.00030	0.00047	0.00070	0.00100	0.00137
40	0.00000	0.00001	0.00002	0.00005	0.00010	0.00018	0.00028	0.00042	0.00060	0.00082
50	0.00000	0.00000	0.00001	0.00003	0.00007	0.00012	0.00019	0.00028	0.00040	0.00054
60	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00005	0.00008	0.00013	0.00020	0.00028	0.00038
70	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00004	0.00006	0.00010	0.00015	0.00021	0.00029
80	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00003	0.00005	0.00008	0.00011	0.00016	0.00022
90	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00004	0.00006	0.00009	0.00013	0.00017
100	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00003	0.00005	0.00007	0.00010	0.00014

Таблиця 2

Нечіткі правила визначення наявності певного виду корисних копалин

Назва нечіткого правила	Формалізована форма нечіткого правила	Лінгвістична форма нечіткого правила
П1	П1: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = 0.00004$ ТО $\lambda = \text{Cu} \wedge R = 60$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0,00004$, то це відповідає заляганню міді радіусом 60 м
П2	П2: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = 0.00012$ ТО $\lambda = \text{Cu} \wedge R = 90$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0,00012$, то це відповідає заляганню міді радіусом 90 м
П3	П3: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = 0.00030$ ТО $\lambda = \text{Cu} \wedge R = 120$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0,0003$, то це відповідає заляганню міді радіусом 120 м
П4	П4: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = 0.00058$ ТО $\lambda = \text{Cu} \wedge R = 150$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0,00058$, то це відповідає заляганню міді радіусом 150 м
П5	П5: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = 0.00006$ ТО $\lambda = \text{Fe} \wedge R = 60$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0,00006$, то це відповідає заляганню магнетиту радіусом 60 м
П6	П6: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = 0.00020$ ТО $\lambda = \text{Fe} \wedge R = 90$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0,00020$, то це відповідає заляганню магнетиту радіусом 90 м
П7	П7: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = 0.000470$ ТО $\lambda = \text{Fe} \wedge R = 120$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0,00047$, то це відповідає заляганню магнетиту радіусом 120 м
П8	П8: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = 0.00092$ ТО $\lambda = \text{Fe} \wedge R = 150$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = 0,00092$, то це відповідає заляганню магнетиту радіусом 150 м
П9	П9: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = -0.00004$ ТО $\lambda = \text{C} \wedge R = 60$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = -0,00004$, то це відповідає заляганню вугілля радіусом 60 м
П10	П10: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = -0.00014$ ТО $\lambda = \text{C} \wedge R = 90$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = -0,00014$, то це відповідає заляганню вугілля радіусом 90 м
П11	П11: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = -0.00032$ ТО $\lambda = \text{C} \wedge R = 120$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = -0,00032$, то це відповідає заляганню вугілля радіусом 120 м
П12	П12: ЯКЩО $L = 50 \wedge \Delta g = -0.00063$ ТО $\lambda = \text{C} \wedge R = 150$	Якщо глибина залягання дорівнює 50 м і значення різниці прискорення $\Delta g = -0,00063$, то це відповідає заляганню вугілля радіусом 150 м

Висновки

Таким чином, за даними гравірозвідки, проведеної шляхом використання запропонованої автоматизованої гравіметричної системи з елементами штучного інтелекту, можна з певною ймовірністю говорити про наявність корисних копалин, таких, як мідь, магнетит, вугілля та ін. При цьому час обробки

інформації скорочується. Подальші уточнення глибини залягання, розміру родовища корисної копалини потребує додаткових геолого- і геофізичних досліджень, наприклад, застосування методів дистанційного спектрального та структурного аналізу корисних копалин із залученням супутникової розвідки.

Література

1. Безвесільна О. М. Автоматизована гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння на базі МЕМС-гравіметра [Електронний ресурс] / О.М. Безвесільна, А.О. Просюк // Тези I Всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення». – 2015. – Режим доступу : <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/358> (Дата звернення 01.11.2021).
2. Безвесільна О. М. Апаратно-програмний комплекс для експериментального дослідження емнісного гравіметра / О. М. Безвесільна, К. С. Козько // Вісник інженерної академії України. – 2013. – № 2. – С. 15–17.
3. Тювин А.В. Особенности использования функционально-избыточных блоков акселерометров в бесплатформенных навигационногравиметрических комплексах [Електронний ресурс] / А.В. Тювин, А.А. Афонин, А.С. Сулаков // Труды МАИ. – 2016. – Выпуск № 91. – Режим доступу : http://trudymai.ru/upload/iblock/60d/tyuvin_afonin_sulakov_rus.pdf?lang=ru&issue=91
4. Бусыгин Б.С. Специализированная геоинформационная система Рапид: структура, технологии, задачи [Електронний ресурс] / Б.С. Бусыгин, С.Л. Никулин // Геоінформація. – 2016. – № 1. – С. 22–36. – Режим доступу : <http://www.karbon-service.com.ua/wp-content/uploads/2015/01/2-1-2016.pdf>
5. Балк П.И. Обратные задачи гравиразведки как проблема принятия решения в условиях неопределенности и риска [Електронний ресурс] / П. И. Балк, А. С. Долгаль // Физика Земли. – 2017. – № 2. – С. 45–61. – Режим доступу: <http://www.psu.ru/files/docs/personalnye-stranitsy-prepodavatelej/dogal/FZE0045.pdf>
6. Johanna Torppa, Vesa Nykänen, Ferenc Molnár. Unsupervised clustering and empirical fuzzy memberships for mineral prospectivity modelling. *Ore Geology Reviews*. 2019. № 107. P. 58–71. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136818305195>.
7. Bezvesilna O., Tkachuk A., Khylichenko T., Kachniarz M., Korobiichuk I. Two-channel MEMS gravimeter of the automated aircraft gravimetric system. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. № 543. P. 481–487. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48923-0_51.
8. Bezvesilna O., Tkachuk A., Khylichenko T., Chepyuk L., Nechai S. Simulation of influence of perturbation parameters on the new dual-channel capacitive mems gravimeter performance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 6/7 (84). P. 50–57. <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/85463>

References

1. Bezvesilna O. M. Avtomatyzovana hravimetrychna systema dlia vymiryuvannia anomalii pryskorennia syly tiazhinnia na bazi MEMS-hravimetra [Elektronnyy resurs] / O.M. Bezvesilna, A.O. Prosiuk // Tezy I vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Kompiuterni tekhnologii: innovatsii, problemy, rishennia». – 2015. – Rezhym dostupu : <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/358> (Data zvernennia 01.11.2021).
2. Bezvesilna O. M. Aparatno-prohramnyi kompleks dlia eksperymentalnoho doslidzhennia yemnisnoho hravimetra / O. M. Bezvesilna, K. S. Kozko // Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy. – 2013. – № 2. – S. 15–17.
3. Tyuvin A.V. Osobennosti ispolzovaniya funktsionalno-izbytochnykh blokov akselerometrov v besplatformennykh navigatsionno-gravimetrycheskikh kompleksakh [Elektronnyy resurs] / A.V. Tyuvin, A.A. Afonin, A.S. Sulakov // Trudy MAI. – 2016. – Vypusk № 91. – Rezhim dostupu : http://trudymai.ru/upload/iblock/60d/tyuvin_afonin_sulakov_rus.pdf?lang=ru&issue=91
4. Busygin B.S. Specializirovannaya geoinformatsionnaya sistema Rapid: struktura, tehnologii, zadachi [Elektronnyy resurs] / B.S. Busygin, S.L. Nikulin // Geoinformatsiya. – 2016. – № 1. – S. 22–36. – Rezhim dostupu : <http://www.karbon-service.com.ua/wp-content/uploads/2015/01/2-1-2016.pdf>
5. Balk P.I. Obratnye zadachi gravirazvedki kak problema prinyatiya resheniya v usloviyakh neopredelennosti i riska [Elektronnyy resurs] / P. I. Balk, A. S. Dolgal // Fizika Zemli. – 2017. – № 2. – S. 45–61. – Rezhim dostupu : <http://www.psu.ru/files/docs/personalnye-stranitsy-prepodavatelej/dogal/FZE0045.pdf>
6. Johanna Torppa, Vesa Nykänen, Ferenc Molnár. Unsupervised clustering and empirical fuzzy memberships for mineral prospectivity modelling. *Ore Geology Reviews*. 2019. № 107. P. 58–71. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136818305195>.
7. Bezvesilna O., Tkachuk A., Khylichenko T., Kachniarz M., Korobiichuk I. Two-channel MEMS gravimeter of the automated aircraft gravimetric system. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. № 543. R. 481–487. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48923-0_51.
8. Bezvesilna O., Tkachuk A., Khylichenko T., Chepyuk L., Nechai S. Simulation of influence of perturbation parameters on the new dual-channel capacitive mems gravimeter performance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 6/7 (84). P. 50–57. <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/85463>

Рецензія/Peer review : 17.12.2021

Надрукована/Printed :30.12.2022