

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ННІ «Інститут геології»
Кафедра геоінформатики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА
спеціальність 193 – Геодезія та землеустрій
освітня програма «Геоінформаційні системи та технології»

ТЕМА: «Використання ГІС для оцінки потенціалу нікелевих родовищ в Канаді»

Виконала

студентка 2-го курсу
магістратури кафедри
геоінформатика гр. ГІС
Дегтяр Надія Віталіївна

Науковий керівник

доктор геологічних наук
доцент Меньшов Олександр Ігоревич

Робота рекомендується до захисту (протокол № 8 засідання кафедри
Геоінформатика від 15.05.23р.)

Завідувач кафедри

доктор технічних наук
професор Зацерковний Віталій Іванович

Київ – 2023

Реферат
магістерської кваліфікаційної роботи

Дегтяр Надія Віталіївна

на тему: «Використання ГІС для оцінки потенціалу нікелевих родовищ в Канаді»

Спеціальність **193 Геодезія та землеустрій**

Робота на 66 аркушів складається з 4 розділів і містить 2 таблиць, 10 рисунків, 1 додаток. При підготовці роботи використовувалися матеріали з 32 джерела.

Актуальність

Згідно до Національної економічної стратегії на період до 2030 року і програмних документів Євросоюзу нікелеві родовища відносяться до категорії стратегічних корисних копалин в Україні та світі. *Геоінформаційні системи* використовуються для аналізу та візуалізації геолого-геофізичних та геохімічних даних. На прикладі Канади проведено оцінку потенціалу її території щодо розташування нікелевих родовищ та визначено можливості впровадження отриманих результатів в Україні.

Мета роботи

Аналіз геолого-геофізичних та геохімічних даних, візуалізація за допомогою геоінформаційних систем для виявлення потенційних зон розташування нікелевих руд на території Канади.

Розв'язувані в роботі задачі

Збір даних, визначення методів моделювання та використання ГІС для виявлення потенційних зон розташування нікелевих руд на території Канади.

Основний зміст

ГІС та аналіз геофізичних, геологічних та структурних даних для оцінки потенціалу нікелевих родовищ в Канаді.

Наукові результати

Визначення областей з підвищеним вмістом мінералізації нікелю для подальшого дослідження.

Наукова новизна

Розробка нових методів та підходів для виявлення потенційних покладів корисних копалин, зокрема нікелю, використовуючи інтеграцію ГІС, машинного навчання та аналізу багат шарових геолого-геофізичних та геохімічних даних.

Практичне значення

Виявлення та розвиток нових нікелевих родовищ для задоволення попиту на нікель в галузях, таких як виробництво нержавіючої сталі та електрохімічних батарей.

Анотація

У даному дослідженні застосовані геоінформаційні системи для оцінки потенціалу нікелевих родовищ в Канаді за допомогою аналізу геофізичних, геологічних та структурних даних. Особливий акцент зроблено на використання сейсмічних даних для відображення глибини, структури та характеристик літосферно-астеносферного кордону (LAB) та товщини земної кори. Результати дослідження включають розробку інтегрованих моделей, які враховують усі зібрані дані для ідентифікації потенційних місць нікелевих родовищ. Виявлені області з підвищеним вмістом мінералізації нікелю можуть стати пріоритетними для більш детального дослідження та розвідувальних робіт. Успішне проведення цих кроків може сприяти виявленню нових нікелевих родовищ в Канаді та оцінці їх потенціалу. Враховуючи економічне значення нікелю для таких галузей, як виробництво нержавіючої сталі та електрохімічних батарей, виявлення та розвиток нових нікелевих родовищ можуть мати велике значення для економіки Канади та світового ринку в цілому.

Ключові слова

ГІС, нікелеві родовища, Канада, геофізичні дані, геологічні дані, структурні дані, сейсмічні дані, інтегровані моделі.

Nadiia Dehtiar

Using GIS to assess the potential of nickel deposits in Canada.

Abstract

This research attracts GIS analyzes and evaluates the potential of nickel deposits in Canada using an integrated analysis of geophysical, geological, and structural data. A particular focus is placed on the use of seismic data to depict the depth, structure, and characteristics of the lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) and the thickness of the Earth's crust. The study results include the development of integrated models that incorporate all collected data to identify potential locations of nickel deposits. Areas with elevated nickel mineralization may become a priority for more detailed investigation and exploration work. Successful completion of these steps can help in the discovery of new nickel deposits in Canada and the assessment of their potential. Considering the economic importance of nickel for industries such as stainless steel production and electrochemical batteries, the discovery and development of new nickel deposits can have significant implications for the Canadian economy and the global market as a whole.

Key words

GIS, nickel deposits, Canada, geophysical data, geological data, structural data, seismic data, integrated models.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
1. СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ ГІС ДЛЯ ОЦІНКИ ПОТЕНЦІАЛУ РОДОВИЩ.....	12
1.1. Історія освоєння родовищ нікелевих руд в Канаді	12
1.2. Мінеральні системи, що містять важливі корисні копалини.....	13
1.3. Огляд мінеральних систем, пов'язаних з важливими мінералами.....	13
1.4. Мінерально-сировинна база нікелевої промисловості Канади	16
1.5. Використання ГІС для оцінки та аналізу родовищ нікелевих руд	17
2. МЕТОДИ ОЦІНКИ ПЕРСПЕКТИВНОСТІ РОДОВИЩ НІКЕЛЕВИХ РУД В КАНАДІ	19
2.1. Використання різноманітних джерел даних для моделювання перспективності родовищ нікелю	19
2.2. Методи моделювання, їх застосування для визначення потенційних місць залягання родовищ нікелю	20
2.3. Проблематика та обмеження у виборі методу моделюванні для різних типів мінеральних систем.....	21
2.4. Висновки та перспективи подальших досліджень у сфері розробки родовищ нікелевих руд в Канаді	22
2.5. Зв'язок геодинамічних процесів формування родовищ нікелевих руд з методом машинного навчання.....	23
2.6. Метод машинного навчання для моделювання потенціалу Канади щодо розташування нікелевих руд.....	29
2.7. Значення публічних даних та подальші дослідження для підвищення ефективності розвідки нікелевих родовищ.....	32
2.8. Вибір геоінформаційних програм для пошуку родовищ нікелевих руд	34
3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ ГІС ДЛЯ ОЦІНКИ ПОТЕНЦІАЛУ НІКЕЛЕВИХ РОДОВИЩ В КАНАДІ	40
3.1. Обґрунтування вибору геоінформаційної програми Geosoft Viewer.....	40
3.2. Використання геоінформаційної програми Geosoft Viewer для отримання та проведення аналізу вихідних геоданих.	41
3.3. Використання отриманих геоданих для подальшого дослідження потенційних місць залягання руд нікелю в Канаді.	42

3.3.1. Використання набору даних MF6_dT_50.....	43
3.3.2. Використання набору даних Depth to Moho.....	44
3.3.3. Використання набору даних GLOBE DEM (Global Land One-kilometer Base Elevation)	45
3.4. Результати визначення потенційних зон розташування нікелевих руд Канади	46
4. КОМПЛЕКСНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ГЕОФІЗИЧНИХ, ГЕОЛОГІЧНИХ ТА СТРУКТУРНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ ГІС	49
4.1. Оцінка потенціалу нікелевих родовищ в Канаді через інтегрований аналіз геофізичних, геологічних та структурних даних.....	49
4.2. Родовища нікелевих руд в Україні, перспективи та аналогія з родовищами нікелевих руд Канади	50
ВИСНОВОК	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	58
ДОДАТКИ	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГІС	Геоінформаційна система
MDS	багатовимірне масштабування
СММІ	Інтегрована модель зрілості процесів
МПГ	метали платинової групи
.flt	Floating Point Raster (Растровий формат)
LAB	літосферно астеносферний кордон
Мохо	Мохоровичича межа
PGE, МПГ	метали платинової групи

ВСТУП

Нікелеві руди - природні мінеральні утворення, з яких економічно доцільно і технічно можливо видобувати нікель. У провідних країнах світу, корисна копалина - нікель, розміщена в переліку критично важливих корисних копалин.

Критично важливі корисні копалини - це різноманітна група елементів, які мають важливе значення в різних галузях промисловості та стратегічних секторах. Хоча глобального визначення критично важливих корисних копалин не існує, країни зазвичай визначають їх, виходячи зі своїх конкретних потреб і пріоритетів. Критичність може змінюватися з часом залежно від таких факторів, як попит і пропозиція, технологічний прогрес і мінливі суспільні вимоги. Багато країн розробили перелік критично важливих різновидів мінеральної сировини, у тому числі Канада та Україна. Країни керуються цим переліком при інвестуванні та прийнятті рішень щодо підтримки проектів і шляхів поставок, пов'язаних з цими критично важливими ресурсами. Хоча переліки критично важливих корисних копалин у різних країнах можуть відрізнятися за складом, існує спільне розуміння того, що критичні корисні копалини:

- мають мало заміників або взагалі не мають заміників;
- є стратегічними та дещо обмеженими через їхню природу, походження або процеси видобутку;
- в процесі видобутку або переробки все більше зосереджуються в певних регіонах, країнах або компаніях.

Варто зазначити, що списки критично важливих корисних копалин у різних юрисдикціях, таких як Канада, США, Європейський Союз, Україна та Японія, значною мірою збігаються між собою. Цей збіг відображає спільну важливість цих корисних копалин для стимулювання економічного зростання, підтримання конкурентних переваг і забезпечення безперебійного функціонування різних галузей

промисловості, включаючи екологічно чисту енергетику, аерокосмічну, оборонну та комунікаційні технології (Canada's Critical Minerals Strategy: Discussion Paper, 2022).

Важливість критично важливих корисних копалин полягає не лише в широкому спектрі їхнього застосування, але й у потенційних ризиках, пов'язаних з їхнім постачанням. Багато критично важливих корисних копалин знаходяться в геополітично нестабільних регіонах, що робить їхні шляхи постачання схильними до непередбачуваних перерв у роботі. Як наслідок, забезпечення стабільного постачання критично важливих корисних копалин є надзвичайно важливим для забезпечення безперебійного функціонування стратегічних галузей промисловості та переходу до більш стійкої, низьковуглецевої економіки (Інвестиційний атлас надрокористувача: Стратегічні та критично важливі корисні копалини, 2023).

Канада визначила 31 найважливішу корисну копалину (встановлено в спільних консультаціях з провінційними, територіальними та галузевими експертами країни), ці мінерали мають важливе значення для сучасних технологій а також дають можливість країні стати провідним постачальником на світовому ринку. Перелік найважливіших корисних копалин забезпечує визначеність і передбачуваність національних пріоритетів для інвесторів, розробників, громад та торговельних партнерів. До 31 критично важливої корисної копалини належать: Алюміній, Сурма, Вісмут, Цезій, Хроміт, Кобальт, Мідь, Плавиковий шпат, Галій, Германій, Графіт, Гелій, Індій, Літій, Магній, Марганець, Молібден, Нікель, Ніобій, Метали платинової групи, Калій, Рідкоземельні елементи, Скандій, Тантал, Телур, Олово, Титан, Вольфрам, Уран, Ванадій і Цинк.

З переліку мінералів, наведеного вище, 14 з них було визначено як пріоритетні критичні мінерали. Це Кобальт, Мідь, Германій, Графіт, Індій, Літій, Нікель, Ніобій, Рідкоземельні елементи, Скандій, Телур, Вольфрам, Ванадій та Цинк. Ці мінерали слугують унікальним цілям у різних сферах застосування, таких як акумулятори,

електроніка, аерокосмічні компоненти та системи відновлюваної енергетики. Вони є незамінними для подальшого технологічного прогресу (Canada's Critical Minerals Strategy: Discussion Paper, 2022).

Тим часом, Україна також готова надати в користування вільні ділянки родовищ, що містять стратегічні та критично важливі корисні копалини, згідно з Інвестиційним атласом надрокористувача Державної служби геології та надр України (Держгеонадра, 2023). Слід зазначити, що нікель увійшов в Перелік металічних руд та неметалічних корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави (схвалений рішенням Ради національної безпеки і оборони України від 16 липня 2021 року, Указ президента України №306/2021). Постановою КМ України від 14 лютого 2023 р. № 132 затверджено перелік ділянок надр (родовищ корисних копалин), які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави, що надаватимуться у користування шляхом проведення конкурсів на укладення угод про розподіл продукції (далі - Перелік), в якому відсутні родовища, корисною копалиною якою є руди нікелю. Скоріш за все, Перелік формувався враховуючи реалії воєнного стану країни.

Визначаючи пріоритетність цих критично важливих корисних копалин, і Канада, і Україна прагнуть зміцнити свої позиції на світовому ринку, підтримати технологічні інновації та зробити внесок у більш стале майбутнє. Оскільки країни продовжуватимуть зосереджуватися на цих важливих ресурсах, вони відіграватимуть значну роль у формуванні напряму технологічного прогресу та глобальної економіки (Canada's Critical Minerals Strategy: Discussion Paper, 2022).

Зважаючи на високу вартість розвідки родовищ важливих корисних копалин, використання наявних даних і геоінформаційних систем (ГІС) може суттєво допомогти у виявленні потенційних покладів корисних копалин. Аналізуючи геологічні, геофізичні та геохімічні дані, дослідники можуть створювати прогнозні моделі для

спрямування розвідувальних робіт і визначення ділянок з найбільшою ймовірністю вмісту важливих корисних копалин. Крім того, інтеграція ГІС з передовими аналітичними інструментами, такими як алгоритми машинного навчання, може допомогти виявити приховані закономірності та взаємозв'язки між геологічними особливостями і важливими корисними копалинами, що в кінцевому підсумку підвищує ефективність і рентабельність геологорозвідувальних ініціатив.

Ця робота має на меті продемонструвати, як збір даних і ГІС можуть бути використані для оптимізації пошуку критично важливих корисних копалин у Канаді, що в кінцевому підсумку сприятиме зусиллям країни щодо забезпечення та диверсифікації глобальних поставок цих стратегічно важливих ресурсів.

У даній магістерській роботі буде використано загальнодоступні набори даних, які використовуються при розвідці корисних копалин в Канаді - це геохімічні, геофізичні та геологічні дані. Висвітлені методи моделювання для визначення потенціальних місць розташування руд нікелю. Геоінформаційні системи використовуються нами для аналізу та візуалізації геолого-геофізичних та геохімічних даних, що дозволить оцінити потенціал території Канади щодо розташування нікелевих родовищ.

Мета роботи: Аналіз геолого-геофізичних та геохімічних даних, візуалізація за допомогою геоінформаційних систем для виявлення потенційних зон розташування нікелевих руд на території Канади.

Об'єкт досліджень: Геологічні дані та ГІС.

Предмет досліджень: використання геоінформаційних систем та аналізу геолого-геофізичних та геохімічних даних для визначення потенціалу території Канади щодо розташування нікелевих родовищ.

Завдання:

- Зібрати і проаналізувати геохімічні, геофізичні та геологічні дані для Канади.

- Використання ГІС для аналізу та візуалізації геолого-геофізичних та геохімічних даних.
- Інтегрувати ГІС з алгоритмами машинного навчання для виявлення прихованих закономірностей та взаємозв'язків.
- Застосувати модель нейронної мережі для пошуку потенційних зон нікелевих руд.

Актуальність теми. Згідно до Національної економічної стратегії на період до 2030 року і програмних документів Євросоюзу нікелеві родовища відносяться до категорії стратегічних корисних копалин в Україні та світі. Геоінформаційні системи використовуються для аналізу та візуалізації геолого-геофізичних та геохімічних даних.

Методи досліджень. Використання геоінформаційних систем та аналізу геолого-геофізичних та геохімічних даних, інтеграція з алгоритмами машинного навчання для створення прогнозних моделей.

Наукова новизна. Розробка нових методів та підходів для виявлення потенційних покладів корисних копалин, зокрема нікелю, використовуючи інтеграцію ГІС, машинного навчання та аналізу багат шарових геолого-геофізичних та геохімічних даних.

Апробація. Доповідалась на конференції GISaero'23. Тема доповіді: «Використання ГІС для оцінки потенціалу нікелевих родовищ в Канаді» та опубліковано тези: XX Міжнародній науковій конференції «АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВКІЛЛЯ». Тема тез: «Геопортали і відображення геологічної інформації для пошуку родовищ нікелю»; Тези доповіді в електронному вигляді: Наукових круглий стіл «Розвиток інформаційних технологій авіаційної галузі». Тема тез: «Оцінка потенціалу нікелевих родовищ в Канаді за допомогою ГІС та дистанційного зондування».

1. СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ ГІС ДЛЯ ОЦІНКИ ПОТЕНЦІАЛУ РОДОВИЩ

1.1. Історія освоєння родовищ нікелевих руд в Канаді

У 1842 році створена Геологічна служба Канади, яка забезпечила геологічне вивчення території країни. В результаті її діяльності відкриті великі родовища вугілля, золота, міді, нікелю, перше родовище нафти Ойл-Спрінгс в провінції Онтаріо (1865), родовища солі, азбесту та інші. На території Канади відкриті декілька родовищ світового значення, які зберігають своє значення і до сьогодні, в тому числі і родовище нікелевих руд в Фалконбрідж (провінція Манітоба) (Білецький, В. (без дати). У Канаді всі підтверджені запаси нікелю знаходяться в сульфідних мідно-нікелевих родовищах, велика частина яких розташована в рудних районах Садбері (провінція Онтаріо) і Томпсон (провінція Манітоба). У першому районі відомо понад 60 родовищ, з яких 20 вже відпрацьовано. Найбагатші руди містять до 9 % нікелю, рядові — 0,7-1,5 %. В рудному районі Томпсон відкрито 19 родовищ, розробляються поки що тільки три. Середній вміст нікелю в рудах — 2,77 %. У багатих рудах він досягає 10 %. Ряд сульфідних мідно-нікелевих родовищ розвідано на півночі Канади в провінціях Квебек (5 родовищ рудного району Реглан), і Ньюфаундленд (гігантське родовище Войсі-Бей, виявлені ресурси якого на початок 1998 р. оцінені в 116 млн т, з них 31,7 млн т руди, яка містить 2,83 % Ni, 1,68 % Cu і 0,12 % Co).

У зв'язку з розвитком технологій та підвищенням попиту на нікель, почався його інтенсивний видобуток. Загальні світові запаси нікелевих руд складають близько 210 млн т. Найбільше їх видобувають у Канаді, Новій Каледонії (заморська територія Франції), Австралії (Білецький В. С. 2023).

1.2. Мінеральні системи, що містять важливі корисні копалини

Концепція мінеральних систем - це інтегрований і комплексний підхід до розуміння формування та розподілу рудних родовищ у земній корі. Цей підхід розглядає геологічні, геофізичні, геохімічні та тектонічні процеси, які контролюють генерацію, транспортування і відкладення металів, що в кінцевому підсумку призводить до формування економічно життєздатних родовищ корисних копалин (Wyborn et al., 1994). Вивчаючи мінеральні системи, дослідники можуть виявити специфічні характеристики та ознаки, які можна використати для прогнозування місцезнаходження невідкритих родовищ корисних копалин, таким чином допомагаючи в розвідці корисних копалин.

1.3. Огляд мінеральних систем, пов'язаних з важливими мінералами

Уряд Канади визначив 14 найважливіших корисних копалин, які мають важливе значення для економіки, безпеки та сталого розвитку країни. Ці корисні копалини пов'язані з різними мінеральними системами, кожна з яких має специфічні геологічні характеристики та процеси формування. Нижче наведено короткий огляд кожного типу мінеральної системи, пов'язаної з 14 найважливішими корисними копалинами, а також створена таблиця де відображається з якою критичною системою пов'язаний конкретний мінерал (таб. 1.3):

а. Магматичні системи Ni-Cu-PGE (PGE - елементи платинової групи): Ці мінеральні системи утворюються шляхом кристалізації та сегрегації сульфідних рідин з мафічних та ультрамафічних магм (Naldrett, 2010).

б. Порфірові Cu-Mo-Au (мідно-молібден-золоті) системи: Ці системи пов'язані з розміщенням великих об'ємів фельзових магм у тектонічно активних регіонах і характеризуються розсіяною мінералізацією в інтрузивних породах та пов'язаними з ними гідротермальними змінами (Sillitoe, 2010).

с. Епітермальні Au-Ag (золото-срібні) системи: Ці системи формуються в мілководних середовищах кори, зазвичай пов'язані з субдукційним магматизмом і характеризуються мінеральними скупченнями з низьким або середнім ступенем сульфідуювання (Hedenquist et al., 2000).

d. Осадочно-експіраційні (SEDEX) системи: Ці системи формуються внаслідок розвантаження багатих на метали гідротермальних флюїдів у морський осадовий басейн, що призводить до відкладення масивних сульфідних рудних тіл, які містять цинк, свинець і срібло (Lydon, 1996).

e. Карбонатні Pb-Zn (свинцево-цинкові) системи: Ці системи формуються в осадових породах з переважанням карбонатів шляхом міграції флюїдів, багатих на метали, що призводить до заміщення карбонатних порід і утворення стратиформних або жильних рудних родовищ (Leach et al., 2005).

f. Літій-цезій-танталові (ЛЦТ) пегматити: Ці мінеральні системи характеризуються утворенням великих, грубозернистих магматичних порід, збагачених рідкісними елементами, включаючи літій, цезій і тантал (Černý i Ercit, 2005).

Таблиця 1.3 - Критичні мінерали та пов'язані з ними мінеральні системи

	Критичний мінерал	Супутня мінеральна система
1.	Кобальт	Магматичний Ni-Cu-PGE, SEDEX, карбонатний Pb-Zn
2.	Мідь	Порфір Cu-Mo-Au, магматичний Ni-Cu-PGE, SEDEX
3.	Флюорит	Карбонат-місткий Pb-Zn
4.	Галій	Порфір Cu-Mo-Au, епітермальний Au-Ag
5.	Германій	SEDEX, карбонат-місткий Pb-Zn
6.	Графіт	Метаморфічно-прийняті
7.	Індій	SEDEX, карбонат-місткий Pb-Zn
8.	Магній	Карбонат-місткий Pb
9.	Цинк	Карбонат-місткий Pb-Zn, SEDEX
10.	Нікель	Магматичний Ni-Cu-PGE
11.	Платиноїди	Магматичний Ni-Cu-PGE
12.	Калій	Евапоритові родовища
13.	Рідкісноземельні елементи	Карбонатитовмісні, іон-адсорбційні глини, монацит- та ксенотимовмісні розсипи
14.	Скандій	Латеритні родовища, магматичні Ni-Cu-PGE
15.	Тантал	Пегматити LCT
16.	Телур	Епітермальний Au-Ag, порфір Cu-Mo-Au
17.	Олово	SEDEX, карбонат-місткий Pb-Zn
18.	Вольфрам	Скарнові відклади, грейзенові відклади, жильні відклади
19.	Ванадій	Ванадієві титаномагнетитові, латеритні родовища

1.4. Мінерально-сировинна база нікелевої промисловості Канади

Нікелеві руди поділяють на два основні геолого-промислові типи: сульфідно мідно-нікелеві та оксидно-силікатно кобальт-нікелеві (силікатні нікелеві). В Канаді всі підтверджені запаси нікелю знаходяться в сульфідно мідно-нікелевих родовищах, велика частина яких розташована в рудних районах провінції Онтаріо.

Нікель (Ni) є важливим мінералом, пов'язаним з магматичними системами Ni-Cu-PGE, які утворюються в результаті кристалізації та сегрегації сульфідних рідин з мафічних та ультрамафічних магм (Naldrett, 2010). Ці мінеральні системи зазвичай зустрічаються в тектонічно активних умовах, таких як рифтові середовища, або в асоціації з великими магматичними провінціями (LIP). Наприклад, коматіт-асоційовані Ni-Cu-PGE родовища формуються в ультраосновних вулканічних породах і є важливим джерелом нікелю (Barnes, 2006). У канадському контексті, у Верхній провінції знаходиться значна кількість родовищ Ni-Cu-PGE, включаючи коматітові, такі як родовища Алексо, Дандональд і Сотман.

1.5. Використання ГІС для оцінки та аналізу родовищ нікелевих руд

Застосування ГІС дозволяє ефективно оцінювати потенціал родовищ нікелю, використовуючи просторові дані та інтеграцію з іншими системами, такими як дистанційне зондування Землі, геофізичні та геохімічні дані. Такий підхід допомагає оптимізувати процес видобутку, планувати розвідувальні роботи та забезпечити екологічну безпеку (Grunsky, E. C., та ін. 2018).

В останні роки проводилось багато досліджень, спрямованих на використання ГІС та інших сучасних технологій для аналізу та оцінки потенціалу родовищ нікелевих руд в Канаді.

Серед них можна виділити такі:

- Геоінформаційне моделювання родовищ нікелевих руд на основі інтеграції геофізичних, геохімічних та геологічних даних (Yao, L., 2017). Дослідження зосереджується на використанні різних джерел даних для створення інтегрованих моделей, що дозволяють краще розуміти геологічну будову та потенціал родовищ.
- Застосування дистанційного зондування землі для виявлення та моніторингу родовищ нікелевих руд в Канаді (van der Meer, F., та ін. 2012). У цьому дослідженні аналізуються можливості використання сучасних технік дистанційного зондування для збору даних про родовища та контролю їх стану.
- Вплив видобутку нікелю на навколишнє середовище та можливості його мінімізації з використанням ГІС (Martin et al., 2018). Дослідження оцінює екологічні наслідки видобутку нікелю та розглядає можливості використання геоінформаційних систем для планування та контролю екологічної безпеки.

Сучасні дослідження показують значний потенціал ГІС у дослідженні та розвитку родовищ нікелевих руд в Канаді. Однак для повної реалізації цього потенціалу необхідне подальше вивчення технологій та їхнього застосування, а також розвиток міждисциплінарних підходів, що поєднують геологію, геоінформатику, екологію та економіку.

У майбутньому можливе застосування штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизації процесів аналізу просторових даних та підвищення точності прогнозування потенціалу родовищ (Gupta, S., та Roy, N. 2019). Також актуальним є розробка нових методів оцінки екологічних ризиків, пов'язаних з видобутком нікелю, та розробки стратегій для мінімізації їх впливу на навколишнє середовище.

В цілому, використання ГІС та сучасних технологій у сфері освоєння родовищ нікелевих руд в Канаді відкриває нові перспективи та можливості для забезпечення сталого розвитку галузі та зменшення негативного впливу на довкілля.

2. МЕТОДИ ОЦІНКИ ПЕРСПЕКТИВНОСТІ РОДОВИЩ НІКЕЛЕВИХ РУД В КАНАДІ

2.1. Використання різноманітних джерел даних для моделювання перспективності родовищ нікелю

В даній роботі для оцінки перспективності родовищ нікелевих руд в Канаді було використано комплексний підхід, який базується на аналізі різноманітних даних. Такий підхід дозволяє отримати більш точні та обґрунтовані результати, адже враховуються різні аспекти геологічної будови та економічної ефективності родовищ.

Для моделювання перспективності родовищ нікелю використовуються наступні джерела даних:

- Геофізичні дані: сейсмічні, гравітаційні та магнітні дослідження дозволяють виявляти геологічні структури та зони, які можуть бути потенційно сприятливими для розміщення родовищ нікелю. Особливо важливими є магнітні дані, які дозволяють виявляти мафічні та ультрамафічні породи, що часто асоціюються з нікелевими мінералізаціями.
- Геохронологічні дані: вік порід, які можуть містити нікелеві мінералізації, є важливим фактором для визначення перспективності родовищ. Зокрема, для архейських комплексів характерна гірська порода – коматіїт.
- Геохімічні дані: аналіз геохімічних показників допомагає визначити рівень концентрації нікелю та інших елементів у породах, що можуть свідчити про наявність мінералізацій.
- Геологічні дані: розгляд геологічних структур, типів порід та їхніх співвідношень дозволяє встановити закономірності розміщення родовищ нікелю та визначити потенційні цільові зони для подальших досліджень.
- Металогенічні дані: аналіз відомих металогенічних провінцій, родовищ та їх вікових характеристик допомагає виявити закономірності у розміщенні

нікелевих мінералізацій та встановити їх зв'язок з геотектонічними структурами та еволюцією земної кори.

2.2. Методи моделювання, їх застосування для визначення потенційних місць залягання родовищ нікелю

Для рішення різноманітних завдань у геології, геофізиці та розвідці корисних копалин застосовуються різні методи моделювання.

Деякі з основних методів моделювання та їх застосування:

- Регресійний аналіз: Регресійний аналіз використовується для виявлення залежності однієї величини від іншої, тобто займається пошуком моделі цього зв'язку. У геології та розвідці корисних копалин регресійний аналіз може бути використаний для зв'язку між визначення кореляцій між геологічними, геофізичними та геохімічними характеристиками та потенційною мінералізацією.
- Класифікація: Класифікаційні методи використовуються для розподілу об'єктів на класи або групи на основі їх схожості. У геології та розвідці корисних копалин класифікація може бути використана для розподілу родовищ або мінералізації на групи за геологічними, геофізичними або геохімічними характеристиками, що допомагає розуміти закономірності та процеси мінералізації.
- Кластерний аналіз: Кластерний аналіз є методом неконтрольованого машинного навчання, який використовується для групування об'єктів за їх схожістю без попередньої інформації про їх належність до класів. В геології та розвідці корисних копалин кластерний аналіз може допомогти у групуванні родовищ або мінералізації на основі геологічних, геофізичних або геохімічних характеристик, що дозволяє виявляти закономірності та розуміти процеси мінералізації. Це також може

допомогти виявити нові потенційні області мінералізації, які можуть мати схожі характеристики з відомими родовищами.

- **Машинне навчання:** Машинне навчання включає широкий спектр алгоритмів та методів, які дозволяють комп'ютерам обробляти/обчислювати дані та вдосконалювати свої моделі. В геології та розвідці корисних копалин машинне навчання може бути використано для автоматичного виявлення закономірностей та залежностей у великих наборах даних, що може допомогти в розумінні процесів мінералізації, прогнозуванні потенційних родовищ та підтримці прийняття рішень у розвідці корисних копалин.

Усі ці методи можуть бути застосовані в різних комбінаціях та конфігураціях.

Застосування методів машинного навчання відіграє важливу роль у покращенні ефективності розвідки нікелевих родовищ на території Канади. Використовуючи сучасні техніки класифікації та кластерного аналізу, можна виявити закономірності та зв'язки між різними типами даних, отриманих від геофізичних, геохімічних та геологічних досліджень (Hronsky et al., 2012).

Застосування методів машинного навчання, класифікації та кластерного аналізу, дозволяють об'єднати різні типи даних та виділити зони з підвищеною перспективністю родовищ нікелю. Дані про відомі родовища та перспективні родовища використовуються для **навчальної моделі**, яка потім може бути застосована для прогнозування потенційних місць розташування нікелевих мінералізацій на території Канади.

2.3. Проблематика та обмеження у виборі методу моделюванні для різних типів мінеральних систем.

Аналіз даних, зібраний у рамках даного дослідження, також показує, що великі території Канади ще не були систематично обстежені. Геохімічні та ізотопні дані

мають найбільшу кількість пропущених значень у базах даних GSC, і якщо вони присутні, вони представляють важливі критерії для картографування багатьох процесів формування руд (наприклад, як процес насичення сіркою (S), механічні концентраційні механізми).

Результати моделювання показують, що існують деякі відмінності у перспективності різних типів мінеральних систем, залежно від їх геологічних та геофізичних характеристик. Так, для гірської породи – коматіїт, яка характерна для архейських (вік порід) комплексів, результати прогнозування є відносно точними, тоді як для інших типів мінеральних систем, які пов'язані зі структурними розломами та мінливою мінералізацією, точність прогнозування може бути нижчою.

Комплексний підхід дозволяє значно зменшити простір для пошуку при розвідці корисних копалин, оскільки результати моделювання оцінки перспективності показують, що понад 80% відомих родовищ нікелю розташовані всього на 8% від загальної площі території, що досліджувалась. Таким чином, забезпечується ефективність процесу розвідки та зменшуються витрати на дослідження та буріння.

Важливо враховувати специфіку досліджуваних об'єктів та доступність даних для обрання найбільш ефективного методу моделювання в кожному конкретному випадку.

2.4. Висновки та перспективи подальших досліджень у сфері розробки родовищ нікелевих руд в Канаді

Застосування комплексного підходу, що базується на аналізі різноманітних даних та застосуванні декількох методів моделювання, дозволяє отримати достовірні та обґрунтовані результати перспективності нікелевих родовищ в Канаді. Цей підхід може бути адаптований для дослідження перспективності інших видів корисних копалин та мінеральних систем, що сприятиме розвитку галузі розвідки та видобутку корисних копалин.

Дослідження може бути розширено шляхом інтеграції додаткових джерел даних, таких як тектонічні, літосферні, геотермічні та інші параметри, які також можуть мати вплив на розміщення нікелевих родовищ. Більш того, впровадження нових алгоритмів машинного навчання та оптимізації параметрів моделей можуть підвищити точність прогнозування перспективних ділянок та сприяти пошуку нових нікелевих родовищ.

Отже, комплексний підхід до моделювання перспективності родовищ нікелю, заснований на аналізі різноманітних даних та застосуванні декількох методів моделювання, дозволяє отримати цінні результати, які можуть сприяти розвитку геологічної розвідки та видобутку корисних копалин, а також забезпечити прийняття обґрунтованих рішень у галузі управління природними ресурсами.

2.5. Зв'язок геодинамічних процесів формування родовищ нікелевих руд з методом машинного навчання

Розуміння формування і розподілу сульфідних мінеральних систем Ni-Cu-PGE може допомогти в цілеспрямованій розвідці корисних копалин, оскільки ці системи мають специфічні геологічні, геофізичні та геохімічні ознаки, які можна використати для прогнозування їхнього місцезнаходження.

Зокрема, неконтрольований метод машинного навчання, такий як багатовимірне масштабування (MDS), може бути використаний для виявлення зв'язків між наборами геологічних і геофізичних даних і розподілом відомих мінеральних проявів.

У п. 1.4 даної дипломної роботи викладені різні аспекти магматичних сульфідних мінеральних систем Ni (\pm Cu \pm Co \pm PGE). Ці системи мають важливе економічне і стратегічне значення, а нещодавні досягнення в методах розвідки корисних копалин призвели до вдосконалення методів ідентифікації та пошуку цих ресурсів (Ali et al., 2017).

Ініціатива з картування важливих корисних копалин (СММІ) - це міжнародна співпраця між науковими організаціями Geoscience Australia, Геологічною службою Канади та Геологічною службою США, метою якої є картування важливих корисних копалин та визначення потенційних джерел цих корисних копалин (Critical Minerals Mapping Initiative, 2021).

Дослідження, що використовують сейсмічні відбиття, переломлення та томографічні набори даних для відображення глибини, структури та характеристик літосферно-астеносферного кордону (LAB) та товщини кори (тобто глибини до Мохоровичича або Мохо), є одними з небагатьох доступних методів для картографування глибоких структурних шляхів магматичних мінеральних систем (Begg et al., 2018; Champion and Huston, 2016; Griffin et al., 2013).

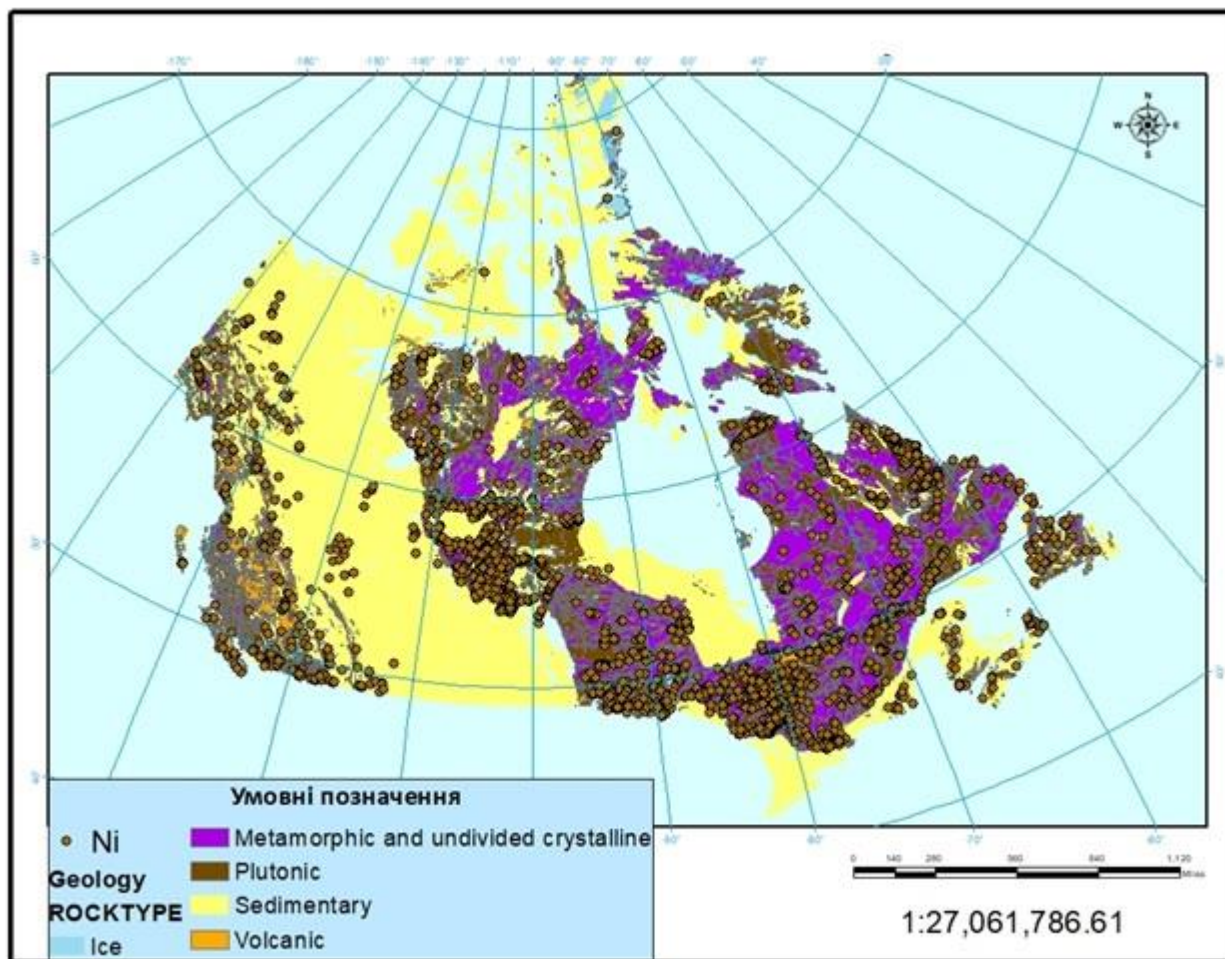


Рис. 2.5.1 – Літолого-фаціальна карта території Канади з винесенням родовищ нікелю. Ice (крига/вода) – блакитний колір; Metamorphic (метаморфічні породи) – фіолетовий колір; Plutonic (плутонічні) – коричневий колір; Sedimentary (осадові) – Жовтий; Volcanic (вулканічні) - Помаранчевий колір.

Однією з ключових проблем у вивченні магматичних сульфідних мінеральних систем Ni (\pm Cu \pm Co \pm PGE) є якість і доступність даних (Lawley and Tschirhart. 2021). Відсутні дані, змінна якість даних і неоднорідне просторове покриття ускладнюють вивчення цих мінеральних систем (Lawley and Tschirhart. 2021). Для вирішення цієї проблеми уряди інвестують у загальнодоступні набори геонаукових даних і дослідження мінеральних систем (Lawley and Tschirhart. 2021). Магматичні родовища Ni-Cu і PGE (МПГ - метали платинової групи) поділяються на дві основні групи залежно

від цінності металів, що містяться в них (Chusi Li; Edward M. Ripley, 2011). До першої групи належать родовища, що містять коматіїт (гірська порода), який є найціннішою продукцією Ni та Cu (Chusi Li; Edward M. Ripley, 2011). До другої групи належать родовища, де найбільш важливими є PGE (Chusi Li; Edward M. Ripley, 2011). Фракційна кристалізація в ультра-мафітових магматичних каналах до насичення сульфідів може призвести до підвищення об'ємної концентрації сплаву і збільшення Cu/Ni (G. Begg, J. Hronsky, W. L. Griffin, 2018).

Неконтрольовані методи машинного навчання, такі як багатовимірне масштабування (MDS), були застосовані для виявлення потенційних зв'язків між маркованими навчальними даними та іншими наборами даних родовища корисних копалин, яким бракує детальної інформації (Aiello et al., 2016). MDS базується на найбільш повних і числових геологічних даних (наприклад – вік гірської породи) і геофізичних даних (наприклад - сейсмічних, магнітних і гравітаційних) (Arguin et al., 2016). Точки даних зі схожими геологічними умовами та підтипами мінеральних систем, як правило, групуються на ділянках MDS через спільні геологічні та геофізичні характеристики (Audet et al., 2019).

Згідно з наданими результатами пошуку, продуктивність моделі перспективності магматичних Ni (\pm Cu \pm Co \pm PGE) сульфідних мінеральних систем змінюється в залежності від підтипу. Підтипи включають системи аляскинського типу, пов'язані з рифтами або коматіїт-асоційовані системи (Arndt et al., 2005). Магматичні сульфідні родовища можна розділити на три групи: Ni-Cu-PGE родовища, Ni-Co-(PGE) родовища та PGE-(Cu)-(Ni) родовища. Для утворення пасток магматичних Ni (\pm Cu \pm Co \pm PGE) сульфідних мінеральних систем необхідно, щоб рудоутворюючі магми були насичені сіркою (S), що найчастіше пояснюється асиміляцією сіровмісних порід під час підйому магми або остаточного розміщення (Barnes, 1990; Barnes et al., 2016).

Концептуальна модель від джерела до руди

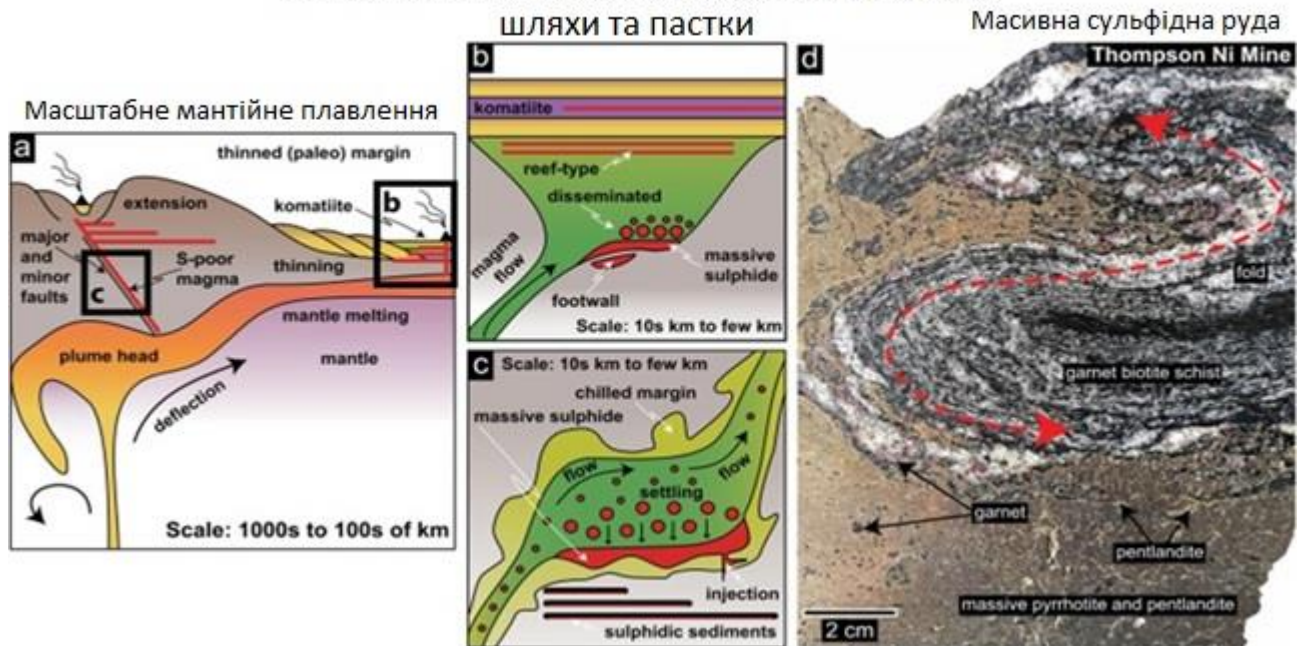


Рис. 2.5.2 – Концептуальні моделі магматичних Ni (\pm Cu \pm Co \pm PGE) сульфідних мінеральних систем: (a) Масштабне мантійне плавлення є основною рушійною силою і джерелом мафічних і ультрамафічних мінеральних систем, пов'язаних з гірськими породами; (b-c) Рудоутворюючі магми фокусуються у верхній мантії і корі довгоживучими шляхами на різних просторових масштабах. Додавання S через асиміляцію і плавлення S-вмісних пристінних порід і ксенолітів має вирішальне значення для утворення сульфідної рідини; (d) Приклад переміщеної масивної сульфідної руди з нікелевого рудника Томпсон (Lawley. J.M., 2021).

Результати пошуків свідчать про те, що на продуктивність моделі перспективності магматичних Ni (\pm Cu \pm Co \pm PGE) сульфідних мінеральних систем впливає тип родовища. Наприклад, коматит-асоційовані системи входять до першої групи магматичних сульфідних родовищ, які характеризуються тим, що Ni і Cu є найціннішими продуктами (Chusi Li; Edward M. Ripley, 2011). З іншого боку, PGE-(Cu)-(Ni) родовища збагачені PGE відносно Ni-Cu-Co (Lawley, C.J.M., Tschirhart, V., 2011).

Отже, продуктивність моделі перспективності для магматичних Ni (\pm Cu \pm Co \pm PGE) сульфідних мінеральних систем, ймовірно, змінюватиметься залежно від типу родовища, що розглядається.

Поклади з найнижчими показниками перспективності часто залягають не в мафічних (магматичні гірські породи, багаті на магній і залізо) або ультрамафічних породах, а в гнейсах, гранітах або осадових породах (Good et al., 2015). Ці родовища можуть являти собою магматичні Ni-Cu-PGE родовища, які зазнали значної постмагматичної модифікації. Магматичні Ni-Cu сульфідні родовища утворюються в результаті сегрегації та концентрації крапель рідкого сульфїду з мафічної або ультрамафічної магми, а також розділення халькофільних елементів із силікатного розплаву, що становить значний виклик для моделей перспективності (Naldrett A. J., 1999). Насичення магми сульфїдами саме по собі недостатньо для утворення рудного родовища. Потрібне відповідне фізичне середовище, щоб сульфїдна рідина змішалася з достатньою кількістю магми для адекватного збагачення халькофільними металами, а потім сконцентрувалася в обмеженому місці так, щоб отримана концентрація відповідала рудному вмісту (Naldrett A. J., 1999). Однак, покращення продуктивності моделі для таких крайніх випадків може бути досягнуте шляхом коригування прикладів конкретних підтипів мінеральних систем, додаткового опрацювання з використанням прикладів родовищ, які не знаходяться у мафічних та ультрамафічних породах, або використання проксі для геологічних умов, які, імовірно, містять переміщені родовища (Wheeler та ін., 1996).

Використовуючи передові методи моделювання, дослідники продемонстрували потенціал для узагальнення на ділянки невідомої мінералізації з хорошими і відмінними показниками класифікації (Aiello et al., 2016). Однак значні прогалини в охопленні даних по всій Канаді підкреслюють необхідність подальших систематичних досліджень і визначення пріоритетів для майбутніх досліджень мінеральних систем і

збору даних (Adcock et al., 2013). Подальший процес досліджень магматичних сульфідних мінеральних систем Ni (\pm Cu \pm Co \pm PGE) відіграватиме вирішальну роль у підтримці розвідки та розробки цих цінних ресурсів.

2.6. Метод машинного навчання для моделювання потенціалу Канади щодо розташування нікелевих руд

Для використання методів машинного навчання в геологічній розвідці потрібно забезпечити попередню обробку та інтерпретацію різних типів даних. У цьому контексті, метод машинного навчання дозволяє аналізувати складні шаблони даних та виділяти перспективні зони родовищ нікелю.

Після аналізу та інтеграції різних типів даних за допомогою методів машинного навчання, підходимо до створення моделі, яка навчається на відомих родовищах та проявах руд нікелю. У цьому процесі, модель аналізує різні характеристики, такі як геологічні структури, геофізичні аномалії, геохімічні складові та інші параметри, щоб виявити закономірності, які відповідають відомих родовищам нікелевих руд. Ці закономірності використовуються моделлю для прогнозування потенційних місць розташування нікелевих мінералізацій на території Канади.

Після побудови моделі машинного навчання, вона може бути застосована для картографування перспективності нікелевих родовищ на масштабі країни або регіону. Результати цього моделювання дозволяють виділити зони з підвищеною перспективністю, які мають найбільшу ймовірність містити нові нікелеві родовища.

Один із важливих методів машинного навчання, який може бути застосований для аналізу геоданих, - це метод рандомного лісу (Random Forest). Цей алгоритм базується на використанні великої кількості дерев рішень для аналізу даних та визначення перспективності родовищ нікелю (Breiman, 2001). Використовуючи навчальний набір даних, що містить інформацію про відомі нікелеві родовища та прояви руд, алгоритм рандомного лісу може бути навчений виявляти характерні

ознаки та закономірності, що вказують на підвищену перспективність родовищ (Crósta et al., 2018).

Після навчання моделі, її можна застосувати для прогнозування потенційних місць розташування нікелевих мінералізацій на основі доступних геоданих. Зокрема, можна провести аналіз даних з сейсмічних, гравітаційних та магнітних досліджень, а також даних про вік гірських порід, що дозволяє виявити закономірності та зв'язки між різними типами даних і відомими нікелевими родовищами (St-Onge et al., 2006). Застосування методів машинного навчання, таких як рандомний ліс, допомагає ідентифікувати зони з підвищеною перспективністю, що можуть бути пріоритетними для проведення подальших геологічних та геофізичних досліджень.

Крім методу рандомного лісу, існують інші методи машинного навчання, які можуть бути корисними для аналізу геоданих та виявлення потенційних родовищ нікелю. Наприклад, метод опорних векторів (Support Vector Machines, SVM) може використовуватися для класифікації перспективних зон на основі геофізичних та геологічних даних (Carranza, 2009). Також можна застосувати нейронні мережі, які відрізняються високою здатністю до аналізу складних даних та виявлення неочевидних закономірностей між ними (Zuo et al., 2017).

Попри вищезгадані, застосовуються й інші алгоритми машинного навчання, такі як градієнтний бустінг, опорні векторні машини (SVM), метод k-найближчих сусідів (kNN), k-середніх (k-means), дерева рішень та випадковий ліс, DBSCAN та ієрархічний кластерний аналіз.

Застосування методу машинного навчання, в моделюванні перспективності нікелевих родовищ, може забезпечити значні переваги порівняно з традиційними підходами. Наприклад, цей метод дозволяє аналізувати великі набори даних та враховувати різні типи параметрів, що забезпечує більш точні та обґрунтовані прогнози. Крім того, машинне навчання може допомогти виявити складні шаблони

та взаємозв'язки між даними, які можуть бути непомітними для традиційних методів аналізу. Це може привести до відкриття нових перспективних зон і родовищ, які раніше були знехтувані.

Використання машинного навчання також сприяє ефективності геологічної розвідки та видобутку корисних копалин. Застосування моделей машинного навчання може зменшити час та витрати, пов'язані з розвідкою та оцінкою ресурсів, оскільки вони дозволяють зосередитись на найбільш перспективних зонах. Таким чином, геологічні компанії можуть оптимізувати свої розвідувальні стратегії, що в свою чергу сприяє сталому розвитку гірничої галузі та раціональному використанню природних ресурсів.

У майбутньому, моделі машинного навчання для прогнозування перспективності нікелевих родовищ можуть бути постійно оновлюватися та вдосконалюватися, що включає інтеграцію нових даних та методів аналізу. Це може забезпечити більш точні та актуальні прогнози, що допоможуть геологам знайти нові родовища та оцінити їх потенціал.

Отже, застосування методу машинного навчання дозволяє об'єднати різні типи даних та виділити зони з підвищеною перспективністю родовищ нікелю. Використання цих методів в моделюванні перспективності нікелевих родовищ на території Канади може сприяти ефективності геологічної розвідки та видобутку корисних копалин, а також забезпечити прийняття обґрунтованих рішень у гірничій галузі та раціональному використанні природних ресурсів. Такі підходи можуть мати позитивний вплив на сталий розвиток гірничої промисловості, створення нових робочих місць та забезпечення економічного зростання.

Водночас, важливо враховувати можливі екологічні наслідки видобутку нікелю та його вплив на навколишнє середовище. Застосування методу машинного навчання може допомогти не лише виявити нові родовища нікелю, але й оцінити потенційні

екологічні ризики, пов'язані з їх видобутком. Це дозволить урядовим організаціям та геологічним компаніям розробляти стратегії з мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище та забезпечити сталий розвиток гірничої галузі.

Враховуючи швидкий розвиток технологій машинного навчання та їхнє все більше впровадження у різних галузях, можна передбачити, що даний метод стане ще більш ефективним та точним у майбутньому.

Важливо підкреслити, що машинне навчання та інші передові технології повинні використовуватися відповідально та з урахуванням етичних та екологічних аспектів. Це стосується не лише геологічної розвідки та видобутку корисних копалин, але й багатьох інших галузей, де застосування машинного навчання може мати значний вплив на людей та навколишнє середовище.

Освітні програми та курси з машинного навчання та їх застосування у геології можуть сприяти підготовці нового покоління фахівців, здатних успішно використовувати дані технології для розвідки та видобутку корисних копалин та забезпечення сталого розвитку гірничої галузі.

2.7. Значення публічних даних та подальші дослідження для підвищення ефективності розвідки нікелевих родовищ

У даному розділі розглядається значення публічних даних та подальші дослідження, спрямовані на підвищення ефективності розвідки нікелевих родовищ.

Значення публічних даних, зокрема даних, наданих урядом Канади та академічними установами, є непереоціненим для розвідки родовищ. Ці дата-сети дозволяють створювати надійні моделі перспективних зон та скорочувати пошукові області для мінеральної розвідки (Groves et al., 2021).

Дані з урядових та академічних джерел дозволяють визначити ключові драйвери та шляхи мінералізації нікелю на найбільших просторових масштабах. Застосування сучасних методів моделювання, таких як машинне навчання, може

забезпечити високу точність класифікації та надійність прогнозування потенційних зон нікелевої мінералізації (Nabighian et al., 2005).

Однак, актуальними залишаються проблеми з недостатнім систематичним вивченням великих територій Канади та відсутністю деяких даних у геохімічних та ізотопних базах даних. Ці проблеми можуть вплинути на ефективність моделей перспективності та обмежувати точність прогнозів. Враховуючи це, розвиток нових методів дослідження мінеральних систем та покращення якості існуючих даних є важливим напрямком подальшого дослідження (Hronsky et al., 2012).

Моделі перспективності можуть також бути використані урядовими та академічними установами для визначення пріоритетних областей та дата-сетів для майбутніх досліджень мінеральних систем та збору даних. Покращення якості та доступності геохімічних та ізотопних даних може сприяти розвитку більш точних та надійних моделей перспективності. Такі моделі можуть сприяти виявленню нових родовищ нікелю, що, в свою чергу, може стимулювати розвиток гірничої промисловості Канади (McCuaig et al., 2010).

Крім того, активне співробітництво між урядовими, академічними та промисловими партнерами є ключовим для успішного проведення досліджень мінеральних систем та розвідки родовищ. Таке співробітництво може забезпечити обмін знаннями, ресурсами та експертизою, що сприятиме підвищенню ефективності розвідки та виявленню нових родовищ нікелю (Dilles et al., 2015).

У підсумку, публічні дата-сети та подальші дослідження у галузі мінеральних систем мають велике значення для підвищення ефективності розвідки нікелевих родовищ. Застосування сучасних методів моделювання, розвиток нових дослідницьких методів та покращення якості даних можуть сприяти створенню надійних моделей перспективних зон і, в кінцевому підсумку, виявленню нових родовищ нікелю на території Канади. Активне співробітництво між різними

зацікавленими сторонами, включаючи уряд, академічні установи та промислові партнери, є важливим фактором успіху цих зусиль.

2.8. Вибір геоінформаційних програм для пошуку родовищ нікелевих руд

Джерело даних (або джерело інформації) - це ресурси, які надають інформацію про різні аспекти дослідження, такі як місцезнаходження, геологічні характеристики, структури та інші важливі відомості про корисні копалини. У контексті пошуку корисних копалин, джерела даних можуть включати геологічні карти, супутникові зображення, аерофотознімки, геофізичні дані, дистанційні спостереження та інші цифрові ресурси (Азімов, О. Т., та ін. 2017).

Розглянемо стислий опис деяких геоінформаційних програм, які можуть бути використані для пошуку корисних копалин:

Google Earth - є геоінформаційною програмою, розробленою компанією Google, яка надає користувачам можливість візуалізувати та навігувати по земній поверхні в 3D (Грищенко, С. М. 2019). Ця програма базується на сполученні супутникових знімків, аерофотознімків та геодезичних даних, створюючи віртуальний глобус, який може бути використаний для різних цілей, включаючи оцінку потенціалу родовищ нікелю в Канаді.

Переваги Google Earth:

- **Доступність:** Google Earth безкоштовний для основного використання, що дозволяє широкому колу дослідників та інвесторів легко проводити дослідження та оцінювати потенціал родовищ.
- **Легкість використання:** Інтерфейс програми дружній до користувача, що робить її легкою у використанні навіть для новачків.
- **Візуалізація:** Високоякісні зображення земної поверхні дозволяють отримати зорове уявлення про територію, де розташовані потенційні родовища нікелю.

- Підтримка шарів: Google Earth дозволяє додавати шари з додатковою інформацією, такою як геологічні карти, дані про віддаленість від інфраструктури, та інше, що полегшує аналіз та планування.
- Інтеграція з іншими програмами: Google Earth може інтегруватися з іншими ГІС-програмами, такими як ArcGIS, для проведення більш детального аналізу даних.

Недоліки Google Earth:

- Обмеженість даних: Google Earth не містить деяких спеціалізованих геологічних та геофізичних даних, які можуть бути необхідними для оцінки потенціалу нікелевих руд. Користувачам може знадобитися звертатися до інших джерел або інтегрувати додаткові дані з інших ГІС-програм.
- Оновлення зображень: Зображення земної поверхні в Google Earth оновлюються не регулярно, що може призвести до застарілих або неточних даних, особливо у віддалених регіонах Канади.
- Точність зображень: Хоча зображення в Google Earth мають високу якість, вони можуть містити помилки або викривлення, особливо у гірських та лісистих районах. Висока роздільна здатність супутникових зображень також залежить від доступності даних для певної території.
- Відсутність спеціалізованих інструментів: Google Earth не містить вбудованих інструментів для геологічного моделювання чи кількісної оцінки ресурсів, тому користувачам може знадобитися використовувати додаткове програмне забезпечення для проведення таких аналізів.
- Проблеми з приватністю: Хоча Google Earth може допомогти у виявленні потенційних родовищ нікелю, компанія Google може використовувати зібрані дані для власних комерційних цілей, що може стати проблемою для конфіденційності досліджень.

Можна зробити висновок, що Google Earth є корисним інструментом для оцінки потенціалу родовищ нікелевих руд в Канаді, але має деякі обмеження, які можуть вплинути на точність та глибину аналізу.

EarthExplorer - є програмним продуктом, розробленим для аналізу та візуалізації геопросторових даних, які можуть допомогти у виявленні та оцінці потенціалу різних родовищ, зокрема родовищ нікелевих руд. Він широко використовується у геологічній та мінералогічній промисловості, зокрема в Канаді, де знаходиться велика кількість родовищ нікелю (Chang, K.-T. 2018).

Переваги EarthExplorer:

- Інтуїтивний інтерфейс: EarthExplorer пропонує користувачам простий та інтуїтивний інтерфейс, який полегшує навігацію та використання програми.
- Широкий спектр даних: EarthExplorer забезпечує доступ до великої кількості геопросторових даних, включаючи супутникові зображення, геологічні карти, демографічні дані та інше.
- Багаторівневий аналіз: Завдяки EarthExplorer можна проводити багаторівневий аналіз даних, що дозволяє користувачам краще розуміти потенціал родовищ нікелевих руд.
- Гнучкість інтеграції: EarthExplorer може інтегруватися з різними іншими програмними продуктами та базами даних, що дозволяє створювати комплексні проекти та аналізувати великі обсяги даних.
- Висока швидкість обробки даних: Завдяки оптимізації та використанню сучасних технологій обробки даних, EarthExplorer пропонує швидкі та ефективні аналітичні інструменти.

Недоліки EarthExplorer:

- Вартість: EarthExplorer може бути досить коштовним рішенням, особливо для невеликих компаній та дослідників з обмеженим бюджетом.
- Комплексність: Хоча EarthExplorer має інтуїтивний інтерфейс, деякі функції та аналітичні інструменти можуть бути складними для користувачів, які не мають достатнього досвіду в геології та геопросторовому аналізі.
- Вимоги до апаратного забезпечення: EarthExplorer може вимагати високих апаратних ресурсів для обробки великих обсягів даних та проведення складних аналізів. Це може бути проблемою для користувачів зі старішим або менш потужним апаратним забезпеченням.
- Ліцензійні обмеження: Деякі геопросторові дані та супутникові зображення можуть мати ліцензійні обмеження або вимоги щодо їх використання, що може ускладнити доступ до деяких даних.
- Навчання та підтримка: Необхідність освоєння програми та її функцій може вимагати часу та навчання. Деякі користувачі можуть зіткнутися з проблемами під час використання програми через відсутність потрібної підтримки або недостатні ресурси для навчання.

Загалом, EarthExplorer є потужним інструментом для оцінки потенціалу родовищ нікелевих руд та інших геологічних ресурсів. Його переваги включають інтуїтивний інтерфейс, доступ до великої кількості геопросторових даних та гнучкість інтеграції. Однак, EarthExplorer має деякі недоліки, такі як вартість, комплексність та вимоги до апаратного забезпечення. Користувачам слід враховувати ці чинники при виборі програмного продукту для оцінки родовищ нікелю, зокрема в Канаді.

Geosoft Viewer - це безкоштовний програмний продукт, який дозволяє переглядати, аналізувати та обробляти геологічні та геофізичні дані. Він широко

використовується в галузі розвідки мінеральних ресурсів, включаючи оцінку потенціалу родовищ нікелевих руд (Seequent, 2022).

Переваги Geosoft Viewer:

- **Безкоштовність:** Geosoft Viewer є безкоштовним, що робить його доступним для користувачів з обмеженим бюджетом.
- **Легкість у використанні:** програма має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що спрощує її використання для нових користувачів.
- **Широкий функціонал:** Geosoft Viewer дозволяє обробляти та аналізувати геофізичні, геологічні та геохімічні дані, такі як магнітні, гравітаційні, радіометричні та інші види даних.
- **Сумісність з різними форматами:** програма підтримує велику кількість форматів даних, таких як Geosoft Oasis Montaj, Geosoft Grid, CSV, Geosoft Database (GDB) та інші.
- **Візуалізація даних:** Geosoft Viewer дозволяє створювати картографічні зображення, профілі та тривимірні моделі даних, що сприяє кращому розумінню геологічної структури території.

Недоліки Geosoft Viewer:

- **Обмеження функціоналу:** хоча Geosoft Viewer має широкий функціонал, є деякі обмеження в порівнянні з більш потужними інструментами, такими як Geosoft Oasis Montaj.
- **Відсутність технічної підтримки:** через безкоштовний характер програми, користувачі можуть не отримати такий же рівень технічної підтримки, як у випадку з комерційними програмами. Однак, спільнота користувачів та наявність онлайн-ресурсів можуть допомогти у вирішенні проблем та отриманні додаткової інформації.

- Потреба в оновленні: через те, що Geosoft Viewer є безкоштовним програмним забезпеченням, його розробники можуть не так часто випускати оновлення, що може призвести до застарілості функціоналу або сумісності з новішими форматами даних.
- Відсутність спеціалізованих інструментів: Geosoft Viewer може не мати спеціалізованих інструментів для деяких задач, таких як інверсія геофізичних даних або детальний аналіз геохімічних даних, які можуть бути доступні в інших, більш потужних програмах.

Оцінюючи потенціал родовищ нікелевих руд в Канаді, Geosoft Viewer може бути корисним інструментом для початкової оцінки та візуалізації геофізичних та геологічних даних. Оскільки я обираю цю програму для користування, акцент зроблений на безкоштовність, легкість використання та широкий функціонал. З урахуванням цих переваг, Geosoft Viewer може стати хорошим вибором для моєї роботи, особливо якщо є обмежений бюджет та обмежений досвід роботи з геоінформаційними системами.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ ГІС ДЛЯ ОЦІНКИ ПОТЕНЦІАЛУ НІКЕЛЕВИХ РОДОВИЩ В КАНАДІ

3.1. Обґрунтування вибору геоінформаційної програми Geosoft Viewer

Під час вибору програмного продукту стояли такі цілі:

- Аналіз та візуалізація геоданих
- Сумісність з іншими програмами та форматами файлів
- Підтримка різних типів даних
- Співпраця та обмін інформацією

Враховуючи задані цілі, Geosoft Viewer було обрано через свою здатність ефективно обробляти та представляти геодані, забезпечувати сумісність з різноманітними форматами файлів та програмним забезпеченням, а також можливості для колаборації та обміну даними, включаючи якість параметри даних (Рис.3.1.1). Ці функції допомагають користувачам легше проводити дослідження, працювати над спільними проектами та координувати свої зусилля.

Використання Geosoft Viewer в комбінації з іншими програмами, такими як ArcMap, дозволяє користувачам максимально використовувати доступні дані та ресурси для аналізу та розвідки потенційних родовищ нікелю. Успішне проведення досліджень та аналізу даних може сприяти виявленню нових потенційних місць зосередження родовищ нікелю.



Рис. 3.1.1 - Характеристики якості просторових даних і карт (Ляшенко та ін., 2022)

3.2. Використання геоінформаційної програми Geosoft Viewer для отримання та проведення аналізу вихідних геоданих.

Geosoft Viewer містить інструменти, які мають доступ до різноманітних геоданих, які розміщені на публічних серверах Geosoft DAP (Distributed Access Protocol).

Кроки для отримання геоданих з Geosoft Viewer:

1. Запустити Geosoft Viewer та імпортувати дані, натиснувши "Import" далі "Seeker".
2. Вибрати сервер "Geosoft Public DAP Server" та заданий регіон - Канада.
3. Натиснути "Results" для відображення доступних наборів даних.

4. Вибрати потрібні дані, враховуючи їх координатну систему та формат (набір даних, включає в себе геофізичні, геологічні, геохімічні та структурні параметри).
5. Завантажити дані, перетворити сітку на формат *.flt
6. Зберегти координатні системи для подальшого використання.

	A	B	C	D
2	SRTM World Elevation 3 Arc-Second	WGS 84	ЦМР / Рельєф / Топографія	0.000833333333, 0.000833333333
3	SRTM1 Pacific US and Alaska	WGS 84	Висота	0.00027777778, 0.00027777778
4	Depth to Moho	WGS 84	Глибина Мохо / топографія	1, 1
5	Crustal Thickness	WGS 84	Товщина земної кори / топографія	1, 1
6	B2 - Bottom of Water	WGS 84	Водне дно / топографія	1, 1
7	B3 - Bottom of Ice	WGS 84	Крижане дно / топографія	1, 1

Рис. 3.2.1 – завантаженні дані занотовані в Excel таблицю

В результаті отримуємо таблицю з цифровими та геологічними даними (додаток А).

Загалом, Geosoft Viewer є досить робочим інструментом для візуалізації, аналізу та обміну геонауковими даними, який підтримує широкий спектр форматів файлів і дозволяє легко користуватися обмінюватися інформацією.

3.3. Використання отриманих геоданих для подальшого дослідження потенційних місць залягання руд нікелю в Канаді.

Отримані дані таблиці візуально оцінюємо, аналізуємо та використовуємо їх для подальшого дослідження за допомогою програми Arcmap.

3.3.1. Використання набору даних MF6_dT_50

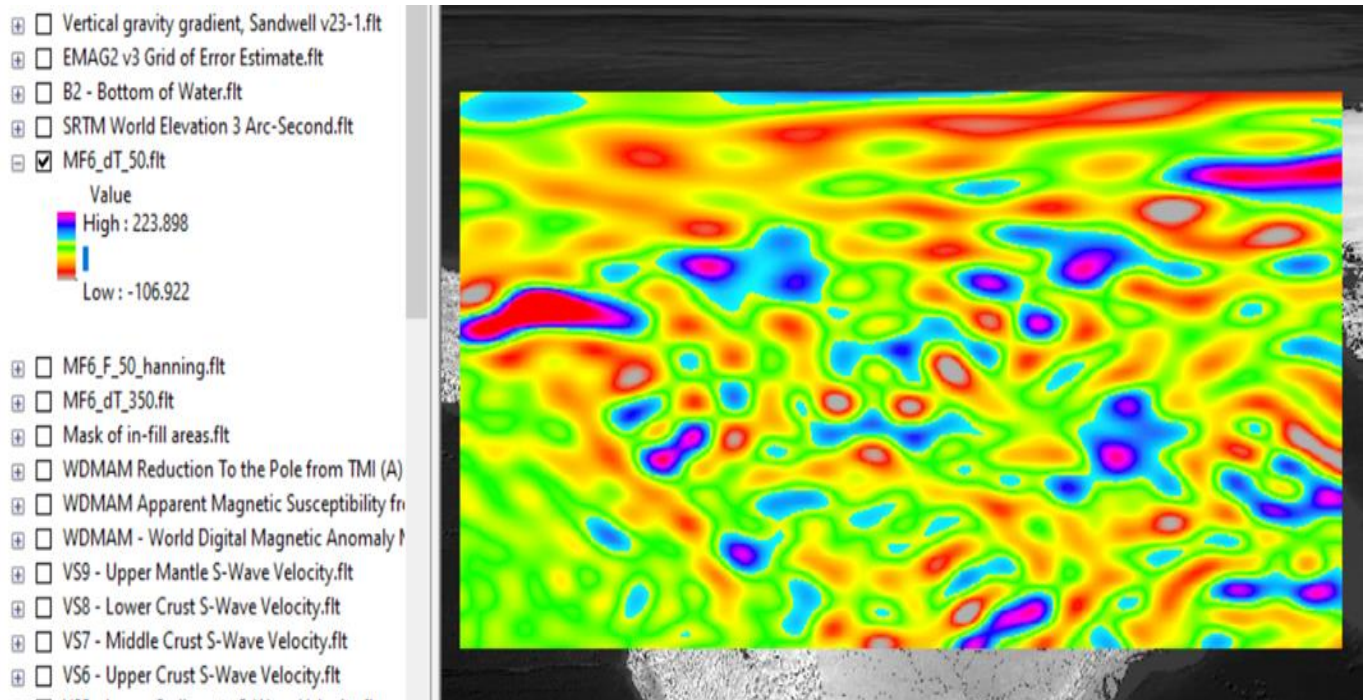


Рис. 3.3.1.1 – візуалізація аеромагнітного набору даних MF6_dT_50

Візуалізація аеромагнітного набору даних MF6_dT_50 демонструє магнітні аномалії, спричинені змінами відносної напруженості магнітного поля, які викликані наявністю порід з різними магнітними властивостями у різних по локальності місцях. Завдяки цьому, ми бачимо аномальні магнітні поля, що відповідають рудним покладам, які в подальшому можуть бути оконтурені для деталізації та їх оцінки.

Набір даних MF6_dT_50 є частиною проекту "Magnetic Field Model MF6". Цей проект використовує дані з флюксогратного магнітометра супутника CHAMP протягом останніх трьох років. Модель MF6 відображає магнітне поле земної кори до ступеня сферичних гармонік 120, що відповідає довжинам хвилі в 333 км.

MF6_dT_50 є сіткою аномалій загальної інтенсивності на висоті 50 км над еліпсоїдом WGS84. Ця модель є першою супутниковою магнітною моделлю, яка визначає напрям магнітних ліній океанічної кори, відкриваючи структуру віку океанічної кори.

3.3.2. Використання набору даних Depth to Moho

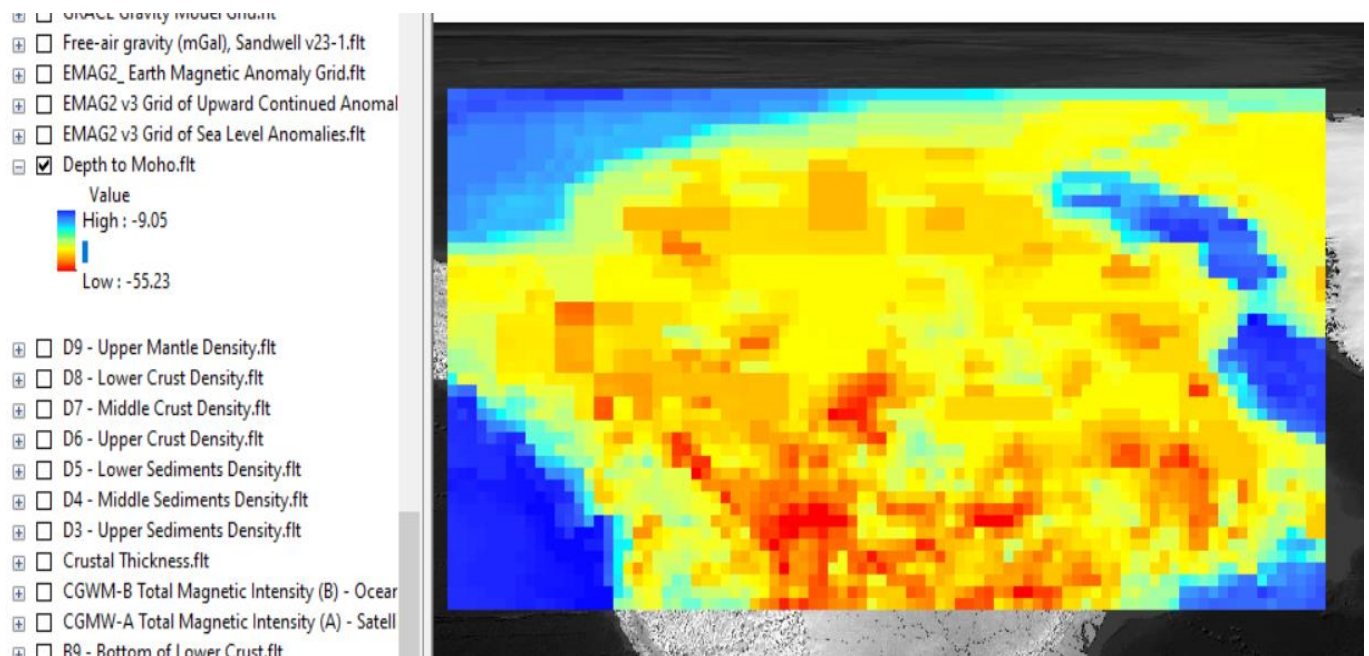


Рис. 3.3.2.1 – візуалізація даних по границі Мохо.

Візуалізація даних показує глибину поверхні Мохоровичича (Мохо), яка характеризує границю між земною корою та верхньою мантією Землі. Глибина пов'язана зі зміною швидкості сейсмічних хвиль, які збільшуються у напрямку більш щільних гірських порід. Ці дані показують глибину поверхні Мохо, товщину земної кори, глибину води, товщину сегментів.

Використаний проект називається CRUST 1.0 і базується на глобальній моделі земної кори з роздільною здатністю 1x1 градус. Він використовує оновлену версію глобальної товщі осадових порід, а також батиметрію (вивчення рельєфу морського дна) та рельєф з моделі ETOPO1. В проекті розглядаються різні типи земної кори, такі як архейські, протерозойські, рифтові зони тощо, а також особливості тектонічних умов, такі як орогени, континентальні рифти, континентальні шельфи та океанічні плато. Всі ці типи допомагають розробити унікальні профілі земної кори для кожної 1x1-градусної клітинки.

3.3.3. Використання набору даних GLOBE DEM (Global Land One-kilometer Base Elevation)

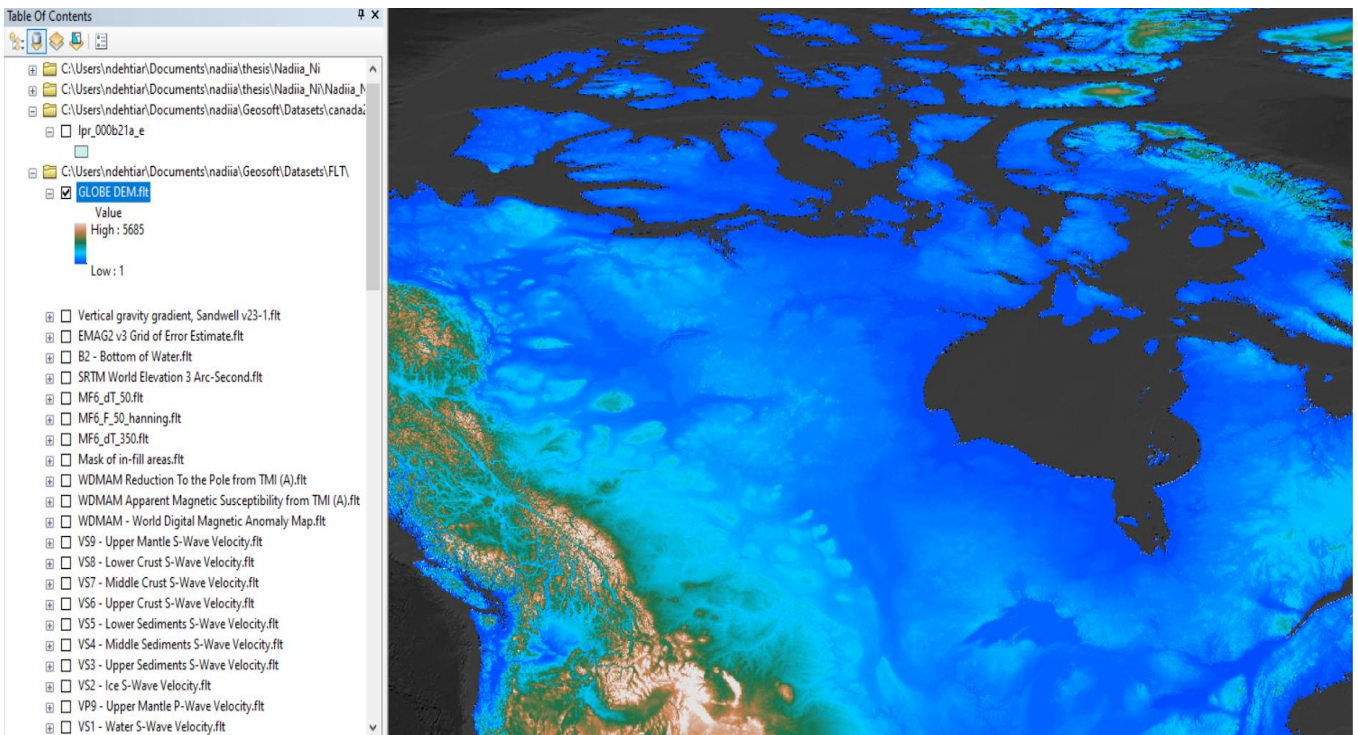


Рис. 3.3.3.1 – візуалізація топографічного набору даних GLOBE DEM

Візуалізація даних GLOBE DEM показує глобальний рельєф земної поверхні, який вимірюється в метрах над рівнем моря та пробується приблизно на одному кілометрі. Топографічна основа використовується при геологічній зйомці для орієнтування на місцевості, точної прив'язки різних геологічних об'єктів, нанесення точок спостережень і т.д.

GLOBE DEM створений командою GLOBE Task Team, яка була заснована Комітетом зі спостереження Землі з космосу і є частиною Фокусу I Міжнародної програми геосфери-біосфери - Системи даних та інформації. Більше інформації про дані GLOBE можна отримати на сайті або звернувшись до відповідальних осіб.

3.4. Результати визначення потенційних зон розташування нікелевих руд Канади

Підібраний мною набір геоданих був завантажений з Geosoft Viewer у форматі .gdb (Geosoft Database) та переформатований у формат .flt для подальшої роботи з ними в ArcMap.

Файли .flt (Floating Point Raster) - це растровий формат, який зберігає дійсні числа з плаваючою комою для кожної клітинки растра. Знання розміру клітинки є важливим для роботи з растровими даними, такими як карти висот, карти зонування гірських порід. Чим менший розмір клітинки, тим більша деталізація зображення, тому розмір клітинки важливий для аналізу різних процесів, що відбуваються на земній поверхні. Розмір клітинки також впливає на розмір файлу, у якому зберігається растр, тому знання розміру клітинки може допомогти зберегти час і пам'ять при роботі з даними. Цей формат підходить для роботи з геофізичними даними, такими як сейсмічними, гравітаційними та магнітними, оскільки він дозволяє зберігати точні значення параметрів.

Використання набору даних MF6_dT_50, Depth to Moho, GLOBE DEM дав можливість візуалізувати потенційні зони розташування нікелевих руд на території Канади, що і визначалося в меті дипломної роботи.

Також мною, використано спеціальну натреновану нейронну мережу для аналізу геоданих з метою виявлення потенційних зон розташування нікелевих руд на території Канади (Рис. 3.4.2). Завдяки комбінації методів прогнозування, включаючи опорні вектори для класифікації, дерева рішень та логістичну регресію, мережа успішно виявила 83% вже розвіданих нікелевих родовищ.

У дослідженні були використані геофізичні дані, такі як сейсмічні, гравітаційні та магнітні дата-сети, а також інші дата-сети віку гірських порід. Вихідні дані були зіставлені з розвіданими родовищами для перевірки точності та надійності моделі.

Дана модель продемонструвала високу точність, з показником AUC 0,837 на тестовому наборі даних.

Крім виявлення відомих родовищ, нейронна мережа також спрогнозувала нові потенційні зони розташування нікелевих руд на території Канади. Результати дослідження можуть мати практичне застосування для гірничодобувної промисловості.

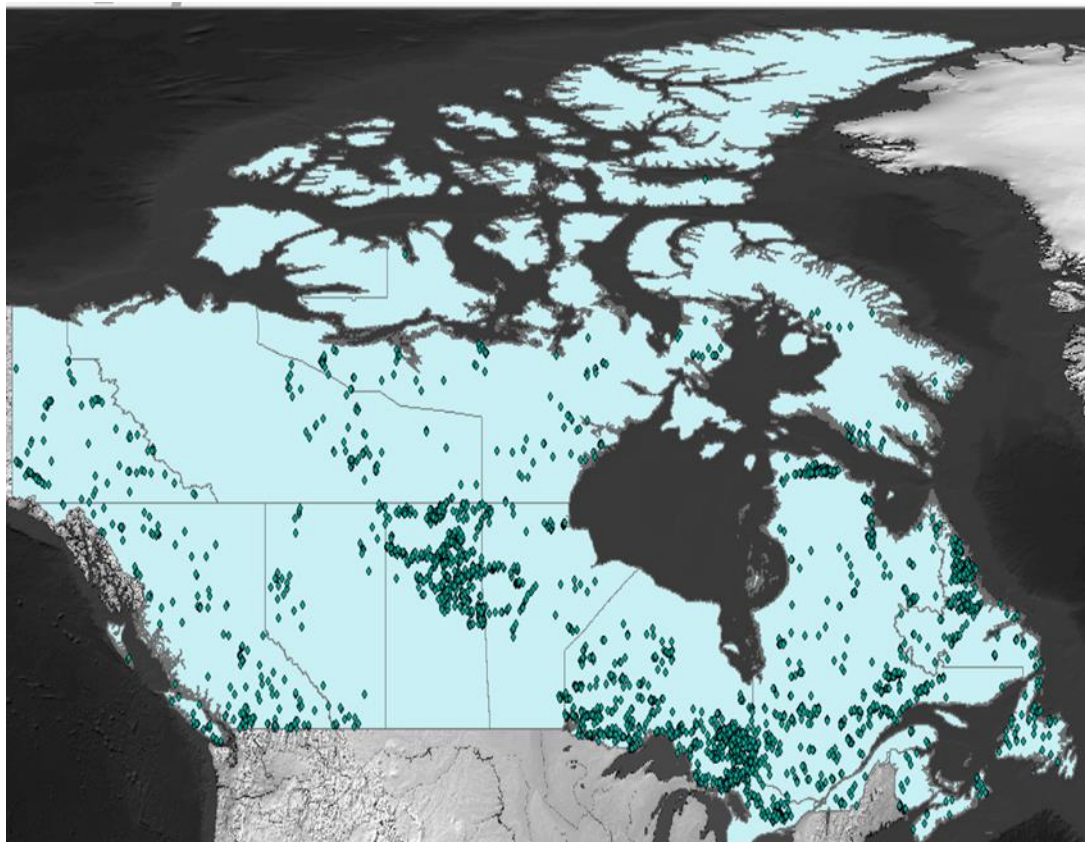


Рис. 3.4.1 – Потенційні зони розташування нікелевих руд на території Канади

Отримані результати можуть виглядати спочатку заохочуючими, адже мережа виявила 83% вже розвіданих нікелевих родовищ, але необхідно звернути увагу на деякі обмеження та критичні моменти.

Один з основних аргументів проти даного підходу полягає в тому, що точність прогнозування не є достатньо високою. З показником AUC 0,837 на тестовому наборі

даних, можна стверджувати, що модель має певний ризик помилкового виявлення потенційних зон розташування нікелевих руд. Через особливості нейронних мереж важко оцінити наскільки нові спрогнозовані зони розташування нікелевих руд будуть відповідати дійсності. Точність можна підвищити додатковим тренуванням та валідацією нейронної мережі але це дороговартісний та часомісткий процес.

Отже, на практиці слід обережно ставитися до застосування методів машинного навчання для прогнозування родовищ, та використовувати такий підхід для прогнозування лише як допоміжний інструмент.

4. КОМПЛЕКСНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ГЕОФІЗИЧНИХ, ГЕОЛОГІЧНИХ ТА СТРУКТУРНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ ГІС

4.1. Оцінка потенціалу нікелевих родовищ в Канаді через інтегрований аналіз геофізичних, геологічних та структурних даних

Оцінка потенціалу нікелевих родовищ в Канаді вимагає інтегрованого підходу до аналізу даних. Слід збирати та проаналізувати різноманітні дані, а потім використовувати їх для створення моделей, які дозволяють визначити ключові структурні шляхи та їх зв'язок з потенційними родовищами нікелю.

Потрібно:

1. Проводити детальний аналіз геофізичних даних, що включає аномалії гравітації та магнітного поля, а також вертикальні гравітаційні градієнти.
2. Розглядати геологічні та структурні характеристики, такі як глибина Мохо, товщина земної кори та швидкість p- та s-хвиль.
3. Використовувати сейсмічні дані для відображення глибини, структури та характеристик літосферно-астеносферного кордону (LAB) та товщини земної кори.
4. Розробляти інтегровані моделі, які враховують усі вищезазначені дані, для ідентифікації потенційних місць нікелевих родовищ.

Проаналізувавши дані та створивши інтегровані моделі, є можливість оцінити потенціал нікелевих родовищ в Канаді та визначити області з підвищеним вмістом мінералізації нікелю. Ці області можуть стати пріоритетними для більш детального дослідження та розвідувальних робіт.

Після визначення цих областей, можна запланувати наступні кроки:

1. Збір додаткових геохімічних даних у визначених областях з підвищеним вмістом мінералізації нікелю, щоб зрозуміти хімічні характеристики та рівень мінералізації.

2. Проведення більш детальних геофізичних досліджень, таких як сейсмічне профілювання або магніто-зйомку, які дозволять отримати глибше розуміння структурних особливостей родовища.

3. Збір даних зі свердловин, включаючи геологічні та геохімічні характеристики та зразки порід, для більш точного вивчення геологічної будови та мінералізації.

4. Застосування 3D-моделювання для об'єднання всіх доступних даних і створення детальних геологічних моделей, які можуть допомогти у плануванні розвідувальних робіт та оцінці ресурсів.

Успішне проведення цих кроків може допомогти у виявленні нових нікелевих родовищ в Канаді та оцінити їх потенціал. Враховуючи економічне значення нікелю для багатьох галузей, таких як виробництво нержавіючої сталі та електрохімічних батарей, виявлення та розвиток нових нікелевих родовищ може мати велике значення для економіки Канади та світового ринку в цілому.

4.2. Родовища нікелевих руд в Україні, перспективи та аналогія з родовищами нікелевих руд Канади

В 50-ті роки ХХ ст. на території України виявлені і розвідані родовища нікелю в Кіровоградській, Дніпропетровській та Миколаївській областях. Виділяють дві групи родовищ - Побужжя (7 родовищ і 1 ділянка) та Середнє Придніпров'я (4 родовища). З них 2 родовища знаходяться в розробці, 1 родовище розвідується та 9 родовищ не розробляються з геологічних та технічних причин. На родовищах, які не розробляються, запаси нікелевої руди вичерпані або ж в незначній кількості. Проводячи аналогію з розвіданими родовищами нікелевих руд в Канаді, їх налічується - 4368.

Родовища нікелю на території України поділяються на декілька генетичних типів: силікатні кобальт-нікелеві руди кір вивітрювання (залишкові), магматичні сульфідні мідно-нікелеві та кобальт-нікелеві сульфідно-арсенідні жильні. Останні два типи

представлені лише поодинокими об'єктами, тоді як силікатні кобальт-нікелеві руди мають провідну роль і важливе економічне значення держави. Як наведено в першому розділі даної дипломної роботи, в Канаді, всі підтверджені запаси нікелю знаходяться в сульфідно мідно-нікелевих родовищах.

По виробництву сталі Україна залишається однією із провідних держав світу, потреби ж нікелю задовольняються, в основному, за рахунок імпорту. В той же час Канада навпаки, є потужним еспортером нікелю в світі.

Одним із шляхів вирішення нікелевої проблеми в перспективі є пошуки сульфідних мідно-нікелевих родовищ на площі Українського щита (Україна). Найбільш перспективною вважається Прутівська інтрузія габроїдів Букинського масиву, де пошуковими роботами (1995-2011рр.) виявлене Прутівське сульфідне мідно-нікелеве зруденіння (Прутівське родовище, яке знаходиться в стадії розвідки). Підвищена благороднометальність сульфідних руд підтверджується в пробах за результатами аналізів методом ICP-MS в лабораторії фірми «АСМЕ» (Канада).

На базі родовищ Побузької групи в кінці 1972 року вступив в дію Побузький нікелевий завод по виробництву феронікелю (з 2000 року – ТОВ «Побужський феронікелевий комбінат»), де побудована лише перша черга заводу з плановою потужністю 850 тис.т сирої руди в рік. В період 1991-1996 рр. різко знизився видобуток руди, з 1997 року по 2000 рік завод не працював, а з 2001 року розпочаті роботи по відновленню діяльності підприємства після ремонту руднотермічної печі.

Геологорозвідувальні роботи з пошуків нікелевої руди на території України проводять підприємства - ДП «Українська геологічна компанія», КП «Південукргеологія», Український державний геологорозвідувальний інститут, ПричорноморДРГП, ТОВ «Геологічна сервісна компанія ГСК».

Канада – країна з величезними мінеральними ресурсами. Канадські гірничодобувні компанії є лідерами у виробництві урану, цинку, нікелю, калію,

азбесту, сірки, кадмію та титану. Однією з компаній, яка займається розвідкою, розробкою та видобутком нікелю є First Quantum Minerals (Фінансова енциклопедія, 2023).

Цільовим призначенням пошуково-оцінювальних робіт на нікель - є встановлення закономірностей локалізації мідно-нікелевого зруденіння, вивчення рудоносних зон та рудних тіл, встановлення масштабів зруденіння по простяганню та на глибину, суцільності зруденіння, речовинного складу руд, їх якості та технологічних властивостей, аналіз та оцінка перспектив виявлених нікеленосних об'єктів. Для оптимізації процесів розвідки та видобутку нікелю в Україні, як альтернативу слід розглянути застосування канадського досвіду у сфері ГІС та інтегрованих моделей.

Враховуючи екологічні аспекти, застосування ГІС та інтегрованих моделей може допомогти у контролі та мінімізації екологічних ризиків, пов'язаних з видобутком мінеральних ресурсів, та сприяти сталому розвитку гірничої промисловості в Україні. В майбутньому, після адаптації та впровадження методів та алгоритмів, опрацьованих на прикладі Канади, робота над пошуками нікелевих родовищ в Україні може бути розширена. Дослідження та аналіз інших мінеральних ресурсів, а також застосування нових методів та інструментів ГІС можуть підвищити ефективність роботи в гірничій промисловості країни.

Для успішної імплементації (здійснення/виконання) просторового моделювання на основі ГІС в Україні, слід врахувати наступні аспекти:

- Забезпечити належну підготовку спеціалістів з геоінформатики, що зможуть працювати з ГІС та виконувати просторове моделювання.
- Оновити та розширити існуючу інформацію про родовища/прояви корисних копалин, забезпечити доступність даних для науковців та інших зацікавлених сторін.

- Встановити співпрацю з країнами, які мають успішний досвід використання просторового моделювання на основі ГІС, такими як Канада, для обміну знаннями та технологіями.
- Розвивати технічну інфраструктуру, необхідну для впровадження ГІС, включаючи високоякісне програмне забезпечення, а також забезпечити доступ до відповідних джерел даних (супутникові знімки, геофізичні та геохімічні дані тощо).
- Впроваджувати розроблені моделі в практику гірничодобувних підприємств.
- Використовувати результати просторового моделювання для планування розвитку гірничої інфраструктури, оцінки впливу на довкілля та розробки стратегій забезпечення енергетичної безпеки країни.

Підсумовуючи, для успішної імплементації методів просторового моделювання родовищ корисних копалин на основі ГІС в Україні, необхідно розробити та впровадити навчальні програми, співпрацювати з країнами, які вже мають досвід застосування ГІС, та розвивати технічну інфраструктуру.

Для візуалізованого порівня кількості та просторового розміщення нікелевих родовищ на території держав Україна та Канада викладені Рис. (4.2.1) та Рис. (4.2.2).



Рис. 4.2.1 – Оглядова карта нікелю на території України (Ремезова В.А, 2021)

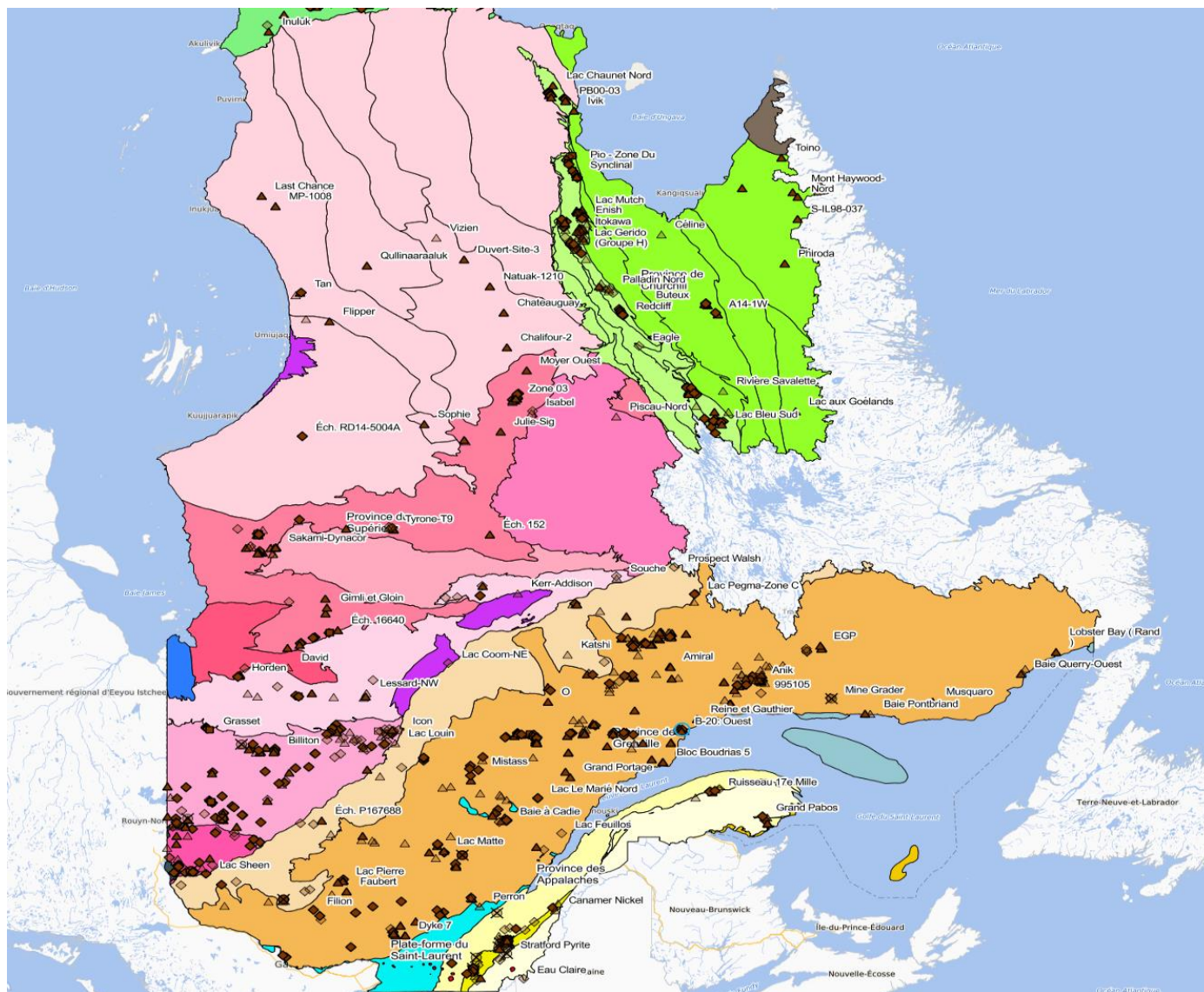


Рис. 4.2.2 – Фрагмент карти геологічних провінцій Канади з розташуванням нікелевих родовищ

Проведення порівняльного аналізу з іншими регіонами світу, де видобуток нікелю є важливим аспектом економіки, може допомогти виявити загальні тенденції та розробити оптимальні стратегії освоєння мінеральних ресурсів на глобальному рівні. Це дозволить українському гірничому сектору адаптуватися до сучасних глобальних викликів та використовувати передовий досвід для покращення власної економіки та забезпечення екологічної безпеки.

ВИСНОВОК

У ході проведених досліджень з використанням публічних наборів даних програмного забезпечення Geosoft Viewer, програми ArcMap, виявлено можливість ефективного використання ГІС для визначення потенційних місць розташування мінеральних систем, зокрема руд нікелю в Канаді. Візуалізація геолого-геофізичних та геохімічних даних сприяє створенню детальних моделей родовищ та оптимізації процесів розвідки та видобутку мінералів.

Застосування ГІС у сфері освоєння мінеральних ресурсів, на прикладі нікелевих родовищ в Канаді, виявилось суттєвим напрямом досліджень та розвитку. Інтеграція ГІС з іншими технологіями, такими як дистанційне зондування Землі, геофізичні та геохімічні дані, дозволяє створювати більш точні моделі родовищ та оптимізувати процес видобутку мінералів. Це забезпечує збільшення ефективності розвідувальних робіт, планування видобутку та охорони навколишнього середовища.

Освоєння мінеральних ресурсів завжди було важливим аспектом розвитку господарства кожної країни. Нікелеві родовища в Канаді мають значне економічне значення, адже цей метал використовується у багатьох галузях промисловості. Застосування інформаційних технологій, зокрема ГІС, дозволяє значно покращити процеси аналізу та оцінки потенціалу родовищ, сприяє раціональному використанню мінеральних ресурсів та забезпечує сталий розвиток економіки країни.

Проведення додаткових геохімічних досліджень, детальних геофізичних досліджень, збору даних зі свердловин та застосування 3D-моделювання для об'єднання всіх доступних даних може сприяти створенню детальних геологічних моделей та оптимізації розвідувальних робіт та оцінці ресурсів.

Крім того, застосування ГІС та інтегрованих моделей дозволяє покращити процеси оцінки впливу на навколишнє середовище, а також контролювати та

мінімізувати екологічні ризики, пов'язані з видобутком мінеральних ресурсів.

Збільшення ефективності розвідувальних робіт та планування видобутку, враховуючи екологічні аспекти, сприяє сталому розвитку галузі та надає можливість забезпечити належний рівень охорони навколишнього середовища та природних ресурсів.

Розвиток та впровадження нових методів, алгоритмів та технологій у галузі ГІС відкриває нові можливості для більш точного та ефективного використання природних ресурсів.

У майбутньому робота може бути розширена за допомогою проведення додаткових досліджень та аналізу інших мінеральних ресурсів, а також застосування нових методів та інструментів ГІС. Також може бути цікавим провести порівняльний аналіз з іншими регіонами світу, де видобуток нікелю є важливим аспектом економіки, для виявлення загальних тенденцій та розробки оптимальних стратегій освоєння мінеральних ресурсів на глобальному рівні.

Висновки, отримані в результаті проведення даної дипломної роботи, підтверджують високу значущість ГІС у дослідженні та видобутку мінеральних ресурсів, зокрема руд нікелю, та відкривають нові горизонти для подальшого розвитку та удосконалення цих технологій з метою забезпечення сталого розвитку гірничої промисловості та екологічної безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

КНИГИ

Chang, K.-T. (2018). Introduction to Geographic Information Systems. McGraw-Hill Education.

ПЕРІОДИЧНІ, ПРОДОВЖУВАНІ ВИДАННЯ, МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЙ

Ali, S. H., & Giurco, D. (2012). Mining industry perspectives on handling community grievances: Summary and analysis of industry interviews. *Resources Policy*, 37(2), 241-250.

Barnes, S. J. (1990). The use of metal ratios in prospecting for platinum-group element deposits in mafic and ultramafic intrusions. *Journal of Geochemical Exploration*, 37(1), 91-99.

Bridge, G. (2004). Mapping the bonanza: Geographies of mining investment in an era of neoliberal reform. *The Professional Geographer*, 56(3), 406-421.

Grunsky, E. C., & Drew, L. J. (2018). Data integration and machine learning for regional prediction of lithology and mineral prospectivity: A case study from the Thompson Nickel Belt, Manitoba, Canada. *Computers & Geosciences*, 119, 1-12.

Gupta, S., & Roy, N. (2019). Application of machine learning techniques in mineral prospectivity mapping: A case study from Singhbhum Shear Zone, India. *Journal of African Earth Sciences*, 151, 309-321.

Lightfoot, P. C., & Evans-Lamswood, D. (2015). Structural controls on the primary distribution of mafic–ultramafic intrusions containing magmatic Ni–Cu–(PGE) sulfide mineralization in the roots of large igneous provinces: a case study from the Paleoproterozoic Circum-Superior Belt, Canada. *Ore Geology Reviews*, 64, 582-597.

Martin, T., & Kempton, H. (2018). Addressing the environmental impacts of mining through the use of GIS: a case study in the Sudbury Basin, Ontario, Canada. *Journal of Environmental Management*, 223, 926-934.

Mudd, G. M., & Jowitt, S. M. (2018). The global nickel industry: trends, greenhouse gas emissions, material flows and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, 202, 1080-1093.

Naldrett, A. J. (1999). World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis. *Mineralium Deposita*, 34, 227-240. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s001260050200>

Naldrett, A.J. (2010). Secular variation of magmatic sulfide deposits and their source magmas. *Economic Geology*, 105(3), 669-688.

Sillitoe, R.H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3-41. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/economicgeology/article/105/1/3/128151/Porphry-Copper-Systems>

Wyborn, L., Heinrich, C., Jaques, A. (1994). Australian Proterozoic mineral systems: Essential ingredients and mappable criteria. The AusIMM Annual Conference Proceedings. AusIMM Darwin, pp. 109–115. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Australian%20Proterozoic%20mineral%20systems%3A%20essential%20ingredients%20and%20mappable%20criteria&publication_year=1994&author=L.A.I.%20Wyborn&author=C.A.%20Heinrich&author=A.L.%20Jaques

Yao, L., Tang, J., & Wang, F. (2017). A GIS-based weights-of-evidence model for mapping the probability of Ni-Cu-PGE mineralization in the Midcontinent Rift System, USA. *Journal of African Earth Sciences*, 134, 153-163.

Стаття в журналі

Азімов, О. Т., Альперт, С. І., Апостолов, О. А., Артюшенко, М. В., Архіпов, О. І., Буніна, А. Я., ... Якимчук, В. Г. (2017). Сучасні методи дистанційного пошуку корисних копалин. В І. Лялько & М. О. Попов (Ред.), Київ: Національна академія наук України, Інститут геологічних наук НАН України, Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі.

Ремезова, В.А. (2021). Державний баланс запасів корисних копалин України на 01.01.2021 р. Руди нікелю, випуск 61. Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство "Державний інформаційний геологічний фонд України" (ДНВП "ГЕОІНФОРМУКРАЇНИ").

van der Meer, F., van der Werff, H., van Ruitenbeek, F., Hecker, C., Bakker, W., Noomen, M., ... & Woldai, T. (2012). Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1), 112-128. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243411001103>

ЕЛЕКТРОННІ РЕСУРСИ

Білецький, В. (без дати). Мінеральні ресурси та добувна промисловість країн світу: Канада. Гірнична енциклопедія. . [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <http://resource.ukrlife.org/canada.htm>

Білецький В. С. (2023) Нікелеві руди // Велика українська енциклопедія. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: [https://vue.gov.ua/Нікелеві руди](https://vue.gov.ua/Нікелеві_руди)

Грищенко, С. М. (2019). Використання проекту Google Earth у краєзнавчому підході при вивченні екології. Криворізький педагогічний інститут ДВНЗ «Криворізький національний університет». [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://lib.iitta.gov.ua/704954/1/%D0%93%D1%80%D0%B8%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%A1.%D0%9C.%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%8F%20%D0%92%D0%90%D0%9A.pdf>

Державна служба геології та надр України. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.geo.gov.ua/ukrayina-zatsikavlena-u-stratehichnomu-partnerstvi-z-polshcheiu-v-haluzi-rozrobky-korysnykh-kopalyn/>).

Інвестиційний атлас надрокористувача: Стратегічні та критичні мінерали. Державна служба геології та надр України, 2023. ст. 34. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/ukr/investicijnij-atlas-nadrokoristuvacha-strategichni-ta-kritichni-minerali.pdf>

Ляшенко Д., Цюпа І., Бабій В., Чехній В., 2022. Забезпечення якості геоекологічних карт на етапах створення і використання. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: [http://geolvisnyk.univ.kiev.ua/archive/2022/N4\(99\)/Liashenko_response_page.php](http://geolvisnyk.univ.kiev.ua/archive/2022/N4(99)/Liashenko_response_page.php)

Barnes, S. J. (2006). Komatiite-hosted nickel sulfide deposits: Geology, geochemistry, and genesis. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00410-017-1380-y>

Begg, G., Hronsky, J., & Griffin, W. L. (2018). Global- to Deposit-Scale Controls on Orthomagmatic Ni-Cu(-PGE) and PGE Reef Ore Formation. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/322173215_Global-_to_Dep

Canada's critical minerals strategy: discussion paper. Government of Canada, 2022. ст. 29. [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.canada.ca/content/dam/nrcan-rncan/documents/critical-minerals-discussion-paper-eng-2.pdf>

Critical Minerals Mapping Initiative (CMMI), By Geology, Geophysics, and Geochemistry Science Center, August 4, 2021. [*Электроний ресурс*]. – Режим доступу: <https://www.usgs.gov/centers/gggsc/science/critical-minerals-mapping-initiative-cmmi>

Černý, P., & Ercit, T.S. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43(6), 2005-2026. [*Электроний ресурс*]. – Режим доступу: <https://pubs.geoscienceworld.org/canmin/article-abstract/43/6/2005/126681>

Hedenquist, J. W., Arribas, A., & Gonzalez-Urien, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. [*Электроний ресурс*]. – Режим доступу: <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/books/book/1223/chapter/107026474/Exploration-for-Epithermal-Gold-Deposits>

Lawley, C. J. M., Tschirhart, V., Smith, J. W., Pehrsson, S. J., Schetselaar, E. M., Schaeffer, A. J., Houlé, M. G., & Eglington, B. M. (2021). Prospectivity modelling of Canadian magmatic Ni (\pm Cu \pm Co \pm PGE) sulphide mineral systems. *Ore Geology Reviews*, 132, 103985. [*Электроний ресурс*]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016913682100010X#b0500>

Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., Large, R.R., Garven, G., Allen, C.R., Gutzmer, J., & Walters, S. (2005). Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective. *Economic Geology*, 100(3), 561-607.

Li, C., & Ripley, E. M. (2011). Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry, and Genesis. [*Электроний ресурс*]. – Режим доступу: <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/books/book/1229/Magmatic-Ni-Cu-and-PGE-DepositsGeology>

Lydon, J.W. (1996). Ore deposit models 5. Sedimentary-exhalative (SEDEX) lead-zinc deposits. *Geoscience Canada*, 23(3), 105-114.

ResearchGate. (n.d.). Prospectivity modelling of Canadian magmatic Ni-Cu-Co-PGE mineral systems. [*Электроний ресурс*]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/348396026_Prospectivity_modelling_of_Canadian_magmatic_Ni_Cu_Co_PGE_mineral_systems

Seequent. (2022). Geosoft Viewer. [*Электроний ресурс*]. – Режим доступу: https://www.seequent.com/products-solutions/geosoft-viewer/?gclid=Cj0KCQjwxYOiBhC9ARIsANiEIfaLmddZFWd7WeQNEN7rrJy-9vSvEf8hmlAsAglw1EpUpmc3RQKpCFkaAo7sEALw_wcB

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Цифрові та геологічні дані, які використовуються для програм розвідки корисних копалин

Набір даних	Система координат	Опис	cell size (x,y)
SRTM World Elevation 3 Arc-Second	WGS 84	Цифрова модель рельєфу, Рельєф, Топографія	0.000833333333, 0.000833333333
SRTM1 Pacific US and Alaska	WGS 84	Висота	0.000277777778, 0.000277777778
Depth to Moho	WGS 84	Глибина Мохо, Батиметрія і топографія	1, 1
Crustal Thickness	WGS 84	Товщина земної кори, Батиметрія і топографія	1, 1
B2 - Bottom of Water	WGS 84	Водне дно, Батиметрія і топографія	1, 1
B3 - Bottom of Ice	WGS 84	Крижане дно, Батиметрія і топографія	1, 1
B1 - Top of Water	WGS 84	Водна поверхня, Батиметрія і топографія	1, 1
B9 - Bottom of Lower Crust	WGS 84	Дно нижньої частини земної кори, Батиметрія і топографія	1, 1
B8 - Bottom of Middle Crust	WGS 84	Дно середньої кори, Батиметрія і топографія	1, 1
B7 - Bottom of Upper Crust	WGS 84	Дно верхньої частини земної кори, Батиметрія і топографія	1, 1
B6 - Bottom of Lower Sediments	WGS 84	Дно нижніх відкладів, Батиметрія і топографія	1, 1

Додаток А. – продовження таблиці

B5 - Bottom of Middle Sediments	WGS 84	Дно середніх відкладів, Батиметрія і топографія	1, 1
B4 - Bottom of Upper Sediments	WGS 84	Дно верхніх відкладів	1, 1
VP8 - Lower Crust P-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість променевих хвиль, Батиметрія і топографія	1, 1
VP9 - Upper Mantle P-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість променевих хвиль, Батиметрія і топографія	1, 1
VP7 - Middle Crust P-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість променевих хвиль, Батиметрія і топографія	1, 1
VP6 - Upper Crust P-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість променевих хвиль, Батиметрія і топографія	1, 1
VP5 - Lower Sediments P-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість Р-хвилі, Батиметрія і топографія	1, 1
VP3 - Upper Sediments P-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість Р-хвилі, Батиметрія і топографія	1, 1
VP4 - Middle Sediments P-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість Р-хвилі, Батиметрія і топографія	1, 1
D9 - Upper Mantle Density	WGS 84	Щільність мантії, Батиметрія і топографія	1, 1
VS9 - Upper Mantle S-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість S-хвилі, Батиметрія і топографія	1, 1
D7 - Middle Crust Density	WGS 84	Щільність земної кори, Батиметрія і топографія	1, 1

Додаток А. – продовження таблиці

D6 - Upper Crust Density	WGS 84	Щільність земної кори, Батиметрія і топографія	1, 1
D5 - Lower Sediments Density	WGS 84	Щільність відкладів, Батиметрія і топографія	1, 1
D4 - Middle Sediments Density	WGS 84	Щільність відкладів, Батиметрія і топографія	1, 1
D3 - Upper Sediments Density	WGS 84	Щільність відкладів, Батиметрія і топографія	1, 1
D8 - Lower Crust Density	WGS 84	Щільність земної кори, Батиметрія і топографія	1, 1
VS8 - Lower Crust S-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість S-хвилі, Батиметрія і топографія	1, 1
VS7 - Middle Crust S-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість S-хвилі, Батиметрія і топографія	1, 1
VS6 - Upper Crust S-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість S-хвилі, Батиметрія і топографія	1, 1
VS5 - Lower Sediments S-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість S-хвилі	1, 1
VS4 - Middle Sediments S-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість S-хвилі	1, 1
VS3 - Upper Sediments S-Wave Velocity	WGS 84	Швидкість S-хвилі	1, 1
Arctic Gravity Project	WGS 84	Арктична гравітація	0.083333333, 0.083333333
GRACE Gravity Model Grid	WGS 84	Гравітаційна модель	0.12473955, 0.12473955

Додаток А. – продовження таблиці

Vertical gravity gradient, Sandwell v23-1	WGS 84	Гравітаційний градієнт, супутникова гравітація	0.016666667, 0.016666667
Free-air gravity (mGal), Sandwell v23-1	WGS 84	Гравітація вільного повітря, гравітація супутника	0.016666667, 0.016666667
Lithospheric magnetic field from CHAMP and Swarm	WGS 84	Літосферне магнітне поле, Магнетики	0.25, 0.25
EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid	WGS 84	Магнітна аномалія, Магнетики	0.033333333, 0.033333333
EMAG2 v3 Grid of Upward Continued Anomalies	WGS 84	Висхідні аномалії продовжуються, Магнетики	0.033333, 0.033333
EMAG2 v3 Grid of Sea Level Anomalies	WGS 84	Аномалії рівня моря, Магнетики	0.033333, 0.033333
EMAG2 v3 Grid of Error Estimate	WGS 84	Оцінка похибки, Магнетики	0.033333, 0.033333
MF6_dT_50	WGS 84	Аеромагнітний	0.125, 0.125
MF7_dF_0	WGS 84	Аеромагнітний	0.1, 0.1
MF6_F_50_hanning	WGS 84	Аеромагнітний	0.125, 0.125
MF6_Z_0	WGS 84	Аеромагнітний	0.1, 0.1
MF6_dT_350	WGS 84	Аеромагнітний	0.25, 0.25
MF6_dT_0	WGS 84	Аеромагнітний	0.25, 0.25
MF6_dT_0_hanning	WGS 84	Аеромагнітний	0.125, 0.125
MF7_dF_2.5	WGS 84	Аеромагнітний	0.025, 0.025

Додаток А. – продовження таблиці

MF7_Z_0	WGS 84	Аеромагнітний	0.1, 0.1
Mask of in-fill areas	WGS 84	Маску з внутрішнім заповненням, Магнітна аномалія	0.05, 0.05
RTP	WGS 84	Магнітна аномалія	0.05, 0.05
TMI (B) Analytic Signal	WGS 84	Аналітичний сигнал, Магнітна аномалія	0.05, 0.05
WDMAM - World Digital Magnetic Anomaly Map	WGS 84	Магнітна аномалія	0.05, 0.05
TMI Laplace Filter	WGS 84	фільтр Лапласа, Магнітна аномалія	0.05, 0.05
Susceptibility	WGS 84	Сприйнятливість, Магнітна аномалія	0.05, 0.05
RTP (B) Laplace Filter	WGS 84	фільтр Лапласа, Магнітна аномалія	0.05, 0.05
CGWM-B Total Magnetic Intensity (B) - Oceanic model in-fill	WGS 84	Магнітна аномалія	0.05, 0.05
CGMW-A Total Magnetic Intensity (A) - Satellite in-fill	WGS 84	Заповнення супутника, Магнітна аномалія	0.05, 0.05
RTP - Analytic Signal	WGS 84	Аналітичний сигнал, Магнітна аномалія	0.05, 0.05
WDMAM Apparent Magnetic Susceptibility from TMI (A)	WGS 84	Магнітна аномалія	0.1, 0.1

Додаток А. – закінчення таблиці

WDMAM Reduction To the Pole from TMI (A)	WGS 84	Магнітна аномалія	0.05, 0.05
Sediment Thickness	WGS 84	Товщина осадових порід, Морська геологія	0.08333333, 0.08333333
SRTM30 Plus v7	WGS 84	Топографія суші та морського дна	0.0083333333, 0.0083333333
GLOBE DEM	WGS 84	Глобальна матриця висот, Рельєф, Топографія	0.0083333333, 0.0083333333