

© Т.В. Косенко¹, Е. Шукюрлю¹

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗРОБКИ ЗОЛОТОРУДНИХ РОДОВИЩ НА ОСНОВІ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ГІС ТЕХНОЛОГІЙ

© Т. Kosenko¹, E. Shukurlu¹

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Poly technic Institute", Kyiv, Ukraine

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF GOLD DEPOSITS BASED ON GEODESIC MONITORING AND GIS TECHNOLOGIES

Мета. Розробка методики аналізу золоторудних родовищ на основі використання геодезичного моніторингу та геоінформаційних технологій для підвищення точності аналізу просторового розподілу корисного компоненту і оптимізації гірничих робіт.

Методи. Методика дослідження базується на комплексному підході до аналізу золоторудної ділянки Tulallar, що поєднує сучасні геодезичні та геоінформаційні технології. У роботі використовувалися методи геодезичного моніторингу, експортування просторових даних із програмного забезпечення Google Earth та їх інтеграція в Surfer, створення 3D моделі розподілення корисного компоненту. Це дозволило візуалізувати та визначити перспективні зони для подальшої розробки родовища.

Результати. Результати дослідження підтверджують ефективність використання геодезичного моніторингу та геоінформаційних технологій для визначення перспективних зон видобутку, забезпечуючи високу точність картографування і моделювання геологічних структур. Інтеграція даних у програмному забезпеченні Surfer та Google Earth дозволила створити 3D модель рудних тіл, що стала ключовим інструментом для оцінки запасів і оптимізації гірничих робіт.

Наукова новизна. У статті вперше запропоновано методику дослідження золоторудних родовищ, що ґрунтується на комплексному підході до аналізу, з використанням геодезичних даних та геоінформаційних систем (ГІС). Методика дозволяє створювати 3D моделі, що поєднують дані про концентрацію корисного компонента і геологічну структуру, підвищуючи точність розвідки, оптимізацію видобутку та зменшення екологічних ризиків.

Практична значимість. Практичне значення методики полягає у виявленні перспективних зон видобутку, оптимізації гірничих робіт та зменшенні екологічного впливу. Інтеграція геодезичних даних і ГІС забезпечує точний просторовий аналіз, що сприяє ефективному плануванню видобутку. Методика може бути адаптована для інших родовищ, підвищуючи раціональність використання ресурсів та економічну ефективність.

Ключові слова: геоінформаційні технології, геодезичний моніторинг, золоторудні родовища, геодезичні зйомки, рельєф, тривимірне моделювання, Surfer, Google Earth.

Вступ. Розробка золоторудних родовищ є одним із ключових напрямків сучасної гірничої промисловості, що має стратегічне значення для економічного розвитку. В умовах зростаючих вимог до ефективності та екологічної безпеки гірничих робіт виникає необхідність у застосуванні сучасних технологій для

дослідження і оптимізації процесів видобутку. Одним з інструментів для вирішення цих завдань є геодезичний моніторинг. Геодезичний моніторинг забезпечує високу точність отримання просторових даних, необхідних для контролю стану поверхні, визначення параметрів родовища та аналізу змін у зоні видобутку. Він дозволяє точно картографувати і аналізувати геологічні структури, забезпечуючи достовірні дані для прийняття рішень на всіх етапах розробки родовищ [1].

Використання ГІС технологій дозволяє інтегрувати, обробляти та аналізувати отримані дані, надає можливість будувати тривимірні моделі, оцінювати запаси корисних копалин і прогнозувати наслідки гірничих робіт. Поєднання геодезичного моніторингу і ГІС технологій сприяють формуванню комплексного підходу до планування і розробки родовищ, підвищують ефективність процесів та знижують ризики. Дослідження, засновані на використанні геодезичного моніторингу і ГІС технологій, дозволяють визначати найбільш перспективні напрямки видобутку, враховуючи такі фактори, як геологічні умови, рельєф місцевості, концентрація корисного компонента, умови розробки родовища. Використання ГІС технологій сприяє підвищенню точності та ефективності прийняття рішень у гірничодобувній галузі, забезпечуючи збереження природних ресурсів та мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище [2, 3].

Метою даної роботи є розробка методики аналізу золоторудних родовищ та їх оцінка за перспективністю на основі використання геодезичного моніторингу та ГІС технологій в умовах золоторудного родовища Tulallar (Азербайджан). Для вирішення цієї задачі пропонується використовувати в поєднанні два програмних забезпечення Surfer та Google Earth.

Основна частина. Родовище Tulallar розташоване на північно-східному схилі Малого Кавказу, в регіоні високогірної та середньогірної місцевості з абсолютними висотами, що коливаються від 1200 до 2500 м, іноді досягаючи 3000 м. На північних схилах відзначаються скельні утворення заввишки 400–500 м. На південному заході розташовані гори Karaz і Murovdag, що і обумовлює складний рельєф регіону.

За даними Національної геологорозвідувальної служби Азербайджана Тулалларська рудоносна зона представлена крутопадаючими кварцитами потужністю 20–60 м, що поширені у північно-західному напрямку. В наслідок тектонічної активності породи зазнали інтенсивної фрагментації та інших змін. Центральна частина рудоносної зони складається з туфів середньокислого складу, тоді як зовнішні частини представлені андезито-базальтами. Розподілені в зоні дайкові породи складені переважно андезито-базальтами середнього вмісту, що зазнали різких змін. Поряд із порушеними породами, що містять пірит, відзначаються також кварцові та кварц-кальцитові жили [4].

Мінералізація золоторудного родовища Tulallar належить до золото-кварцової формації і має простий мінералогічний склад. Основні сульфідні мінерали: пірит, халькопірит, борніт, сфалерит, галеніт, тетраедрит та піротин; основні оксидні – гетит, гематит і лімоніт, з наявністю самородного золота в окремих випадках. Нерудні мінерали включають кварц, барит, халцедон, хлорит, серицит та

епідот. Пірит, як головний рудний мінерал, поширений у рудних зонах (до 20%), утворюючи агрегати розміром 0,02–0,5 мм.

Мінералізація золота родовища Tulallar представлена типовою системою високої сульфідізації, що характеризується інтенсивним окремнінням, каолінізацією та брекчуванням. Рудоносна зона включає середньокислі вулканічні породи (андезит-дацит-ріоліт), які зазнають поступового, а місцями часткового метасоматозу на контактах між літологічними одиницями. Оксидна мінералізація переважає у верхніх шарах, з характерним інтенсивним окремнінням. На глибших рівнях розташовані перехідні й сульфідні руди, що містять пірит. Поступовий перехід від оксидної до сульфідної мінералізації формує значну зону змішаної оксидно-сульфідної мінералізації, визначену як перехідна [4].

В результаті проведених досліджень було встановлено наявність в сировині наступних хімічних елементів: Pb, Mn, Ti, Cr, V, Mo, Zr, Cu, Au, Ag и Co. Результати аналізу дозволили оцінити закономірності розташування золоторудних об'єктів [4].

Досліджуваний район охоплює північно-західну частину Гейгельського підняття, яке розташоване між Дашкесанською та Агджакендською западинами. На ділянці дослідження золоторудного родовища Tulallar створена опорна геодезична мережа, координати станцій якої наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Координати точок видобувної ділянки

Hole ID	X	Y	Hole ID	X	Y
W1	605220	4476400	W10	605190	4478680
W2	605760	4476480	W11	605050	4478400
W3	605750	4476910	W12	604990	4478200
W4	605700	4476980	W13	604985	4478000
W5	605750	4477600	W14	605060	4477820
W6	605725	4477800	W15	605010	4477480
W7	605815	4478000	W16	605080	4477000
W8	605800	4478080	W17	604900	4476870
W9	605710	4478680			

Для визначення положення станцій застосовується система координат UTM 38 та Балтійська система висот. Координати станцій визначаються шляхом прив'язки до державної геодезичної мережі четвертого класу. Точки за координатами переносяться в програму Google Earth для подальшого дослідження.

Для підвищення точності та ефективності просторового аналізу родовища здійснюється експортування даних з Google Earth та інтегрування в програму Surfer. Експорт даних з Google Earth та їхнє використання в Surfer допомагають створювати точні карти та 3D моделі місцевості. Для створення контурної карти місцевості із зображенням рельєфу координати множини точок ділянки

дослідження визначаються в програмі Google Earth Pro шляхом зчитування координат точок реальної поверхні в системі координат WGS-84 і встановлюються їх абсолютні висоти за допомогою конвертора GPS Visualizer. Далі ці дані інтегруються в програму Surfer.

Побудова цифрової поверхні рельєфу здійснюється шляхом інтерполяції отриманих даних методом Kriging. Карта рельєфу з контуром видобувної ділянки представлена на рис.1.

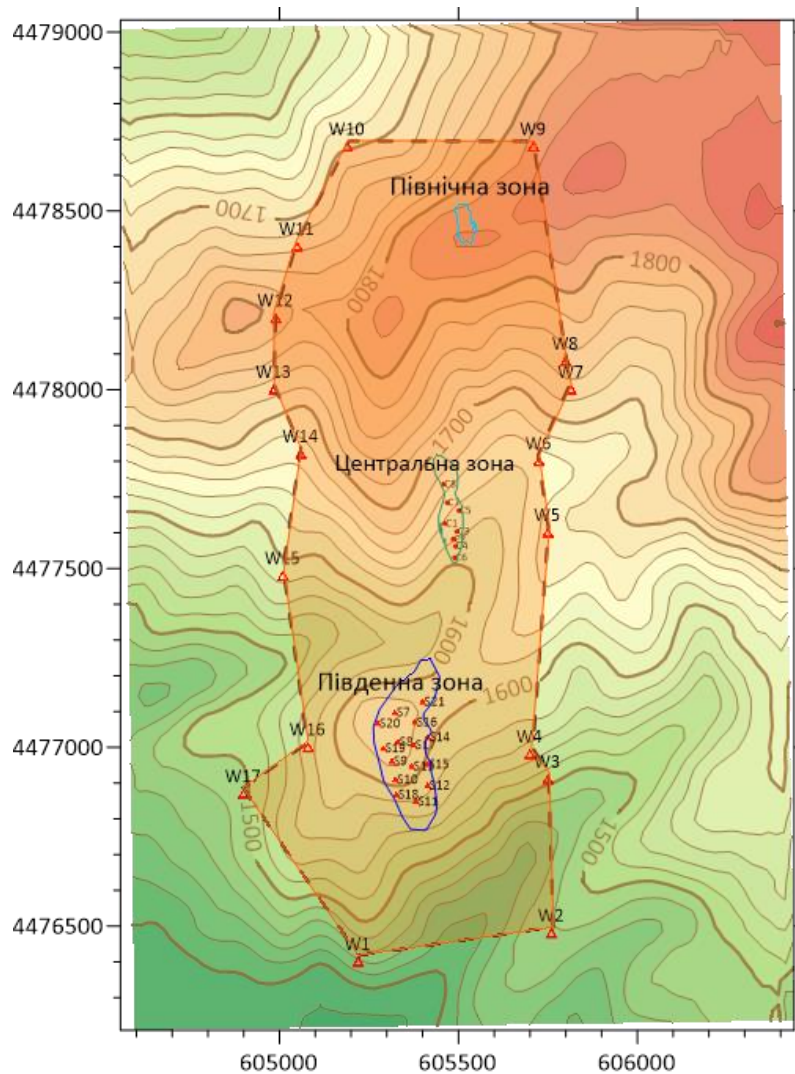


Рис. 1. Контурна карта видобувної ділянки

Також експортування даних з GoogleEarth дозволяє використовувати геопросторову інформацію для створення більш точних і детальних карт, тривимірних моделей та аналізу просторових явищ. Для цього з Google Earth здійснюється експорт аерофотознімків у форматі .kml. Далі, в Surfer, за допомогою функцій геореференції виконується прив'язка зображення до реальних координат, шляхом додавання опорних точок, що відповідають ключовим об'єктам місцевості. У результаті формується геоприв'язана карта, яка інтегрується у задану систему координат, наприклад, UTM. Програма Surfer дає можливість накладати на отриману карту інші типи карт, наприклад, контурну карту місцевості із зображенням

ізоліній поверхні, раніше представлений на рис. 1, карту Drillhole, що відображає розташування бурових свердловин (рис. 2). Такий підхід дозволяє візуалізувати взаємодію між об'єктами, наприклад, між рельєфом і видобувною ділянкою, будувати детальні моделі рельєфу. Налаштування візуалізації, наприклад кольорових градацій чи типів ліній, забезпечує чітке відображення досліджуваних параметрів, сприяючи отриманню інформативних і наочних результатів.

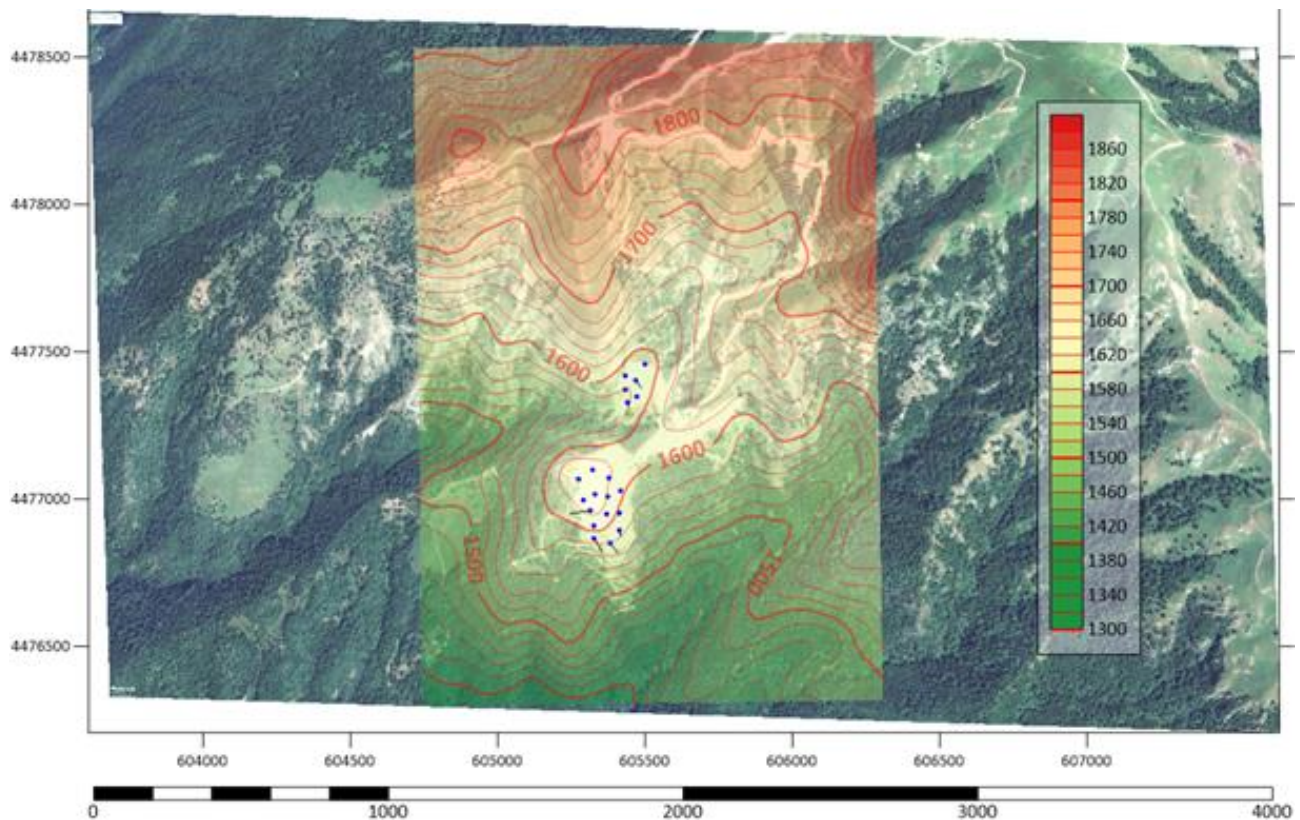


Рис. 2. Інтеграція аерофотознімків в Surfer

Під час дослідження родовища і видобутку корисних копалин суттєве значення має рельєф місцевості. Для створення цифрової моделі рельєфу поверхні, картографування природних ресурсів за допомогою ГІС технологій використовуються різні методи інтерполяції, кожен з яких має свої особливості та область застосування. Найбільш поширеними є Natural Neighbor, Inverse Distance Weight (IDW) і Kriging. Natural Neighbor інтерполяція використовує середньозважене значення локальних даних, забезпечуючи гладкість поверхні. Він підходить для нерівномірно розташованих даних, але не враховує просторову кореляцію, що знижує точність у складному рельєфі. Inverse Distance Weight (IDW) використовує зворотну залежність відстані для обчислення значень, при цьому чим ближче одна до іншої розташовані точки вимірювань, тим більше вони схожі, тим більший їхній взаємний вплив. Метод ефективний для рівномірно розподілених даних, але менш точний на складному рельєфі, оскільки не враховує просторовий тренд. Метод інтерполяції Kriging оптимізує процедуру інтерполяції на основі статистичної природи поверхні. Це геостатистичний метод, який враховує як відстань, так і просторову кореляцію між точками. Крігінг дозволяє точно описати

складні рельєфні структури за рахунок використання варіограми, яка враховує залежності між точками на різних відстанях. Це особливо важливо для гірських ландшафтів, де є різкі зміни висот і складний рельєф. Метод дозволяє отримати гладку, детальну поверхню навіть за наявності значних перепадів висот. Отже, для створення цифрової моделі гористої місцевості з великою кількістю вихідних точок найкраще підходить метод Kriging [2].

Цифрова модель поверхні ділянки Tulallar, що створена в програмі Surfer за допомогою методів Natural Neighbor, Inverse Distance Weight і Kriging наведена на рисунку (рис. 3). Оскільки перепад висот поверхні родовища Тулаллар знаходиться в межах 1400–1800 м, місцевість можна вважати гористою і найбільш точним методом відображення поверхні приймається метод Kriging.

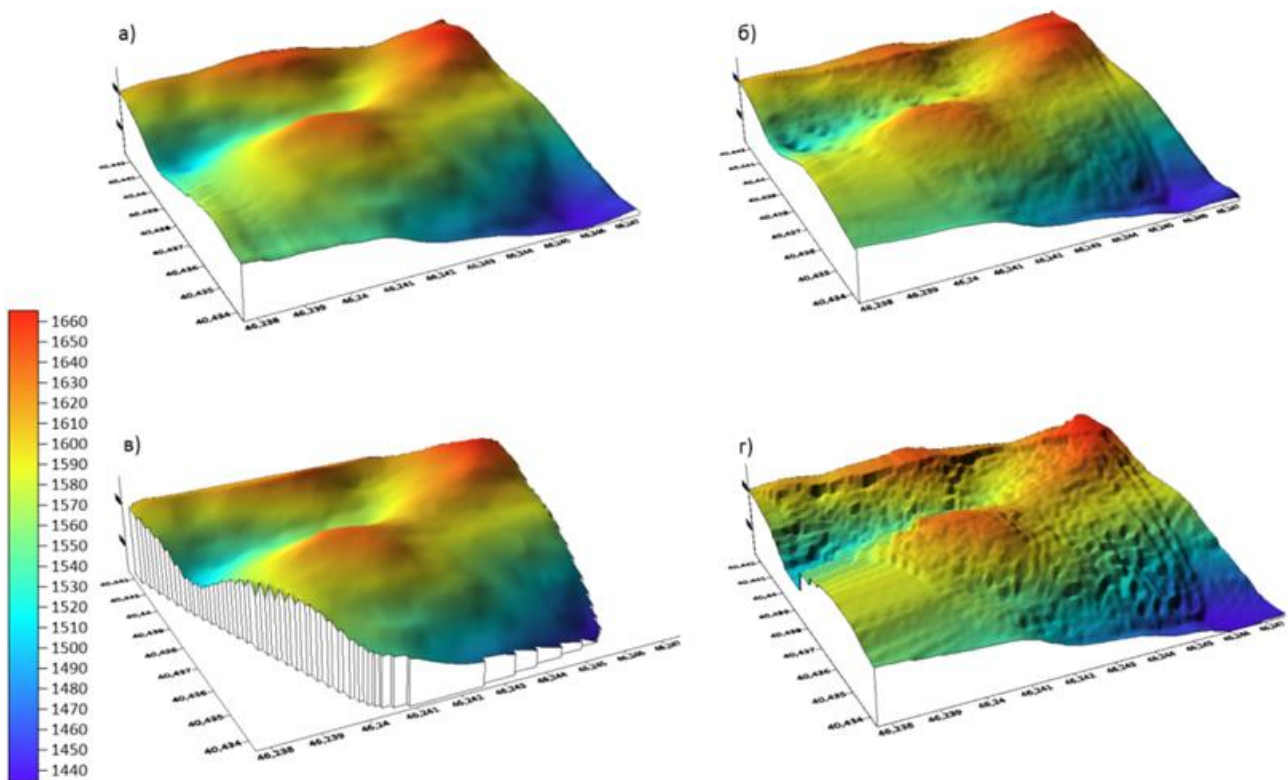


Рис. 3. Цифрова модель рельєфу ділянки Tulallar, створена методами:
а – Kriging; б – Inverse Distance Weight; в – Natural Neighbor; г – Nearest Neighbor

У формуванні основного рудоносного родовища Tulallar суттєву роль зіграли тектонічні процеси, в результаті яких утворилися три зони, багатих на золотоносні руди. Так, північна і південна частини родовища, хоча й мають подібну літологічну структуру, суттєво відрізняються за розподілом золота. У північній частині зосереджені бідні руди (максимальний вміст золота до 50 г/т), тоді як південна частина містить багаті руди з високим вмістом золота (до 1000 г/т), що може свідчити про те, що вони формувалися в різний час і в різних геодинамічних умовах [4]. Також слід зазначити, що руди північної частини належать до золото-кварцово-слабосульфідизованої формації, де вміст сульфідів у золото-кварцових жилах становить до 5%. У південній частині переважно зустрічається

самородне золото з зернами різної форми, у тому числі в асоціації із сульфідними мінералами. Крупність зерен самородного золота знаходиться в межах 0,004–0,05 мм. Локально в південній частині зустрічаються зони з надзвичайно високим вмістом золота. Тому південна частина зони є найбільш перспективною [4]. В роботі проводиться порівняння центральної і південної ділянки родовища.

Для визначення запасів корисних копалин, які можуть бути видобуті на золоторудному родовищі Tulallar, були проведені випробувальні роботи, для цього було пробурено 152 свердловини загальною довжиною 17705,55 м і кутами нахилу від 50 до 90 градусів. Дані про свердловини, що належать до південної і центральної ділянки, які розглядаються у статті, наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Дані про бурові свердловини південної і центральної зони

Hole ID	X	Y	Elevation	AU, г/т
C1	605434	4477421	1589	1,90
C2	605434	4477372	1579	1,70
C3	605469	4477403	1585	3,15
C4	605473	4477349	1585	1,03
C5	605501	4477457	1590	2,00
C6	605442	4477328	1578	1,80
C7	605468	4477684	1655	2,23
C8	605458	4477735	1669	1,42
S7	605322	4477098	1632	5,45
S8	605331	4477016	1633	3,00
S9	605314	4476962	1627	3,70
S10	605324	4476911	1607	2,10
S11	605382	4476849	1579	1,00
S12	605414	4476894	1586	1,80
S13	605370	4476948	1611	1,30
S14	605415	4477029	1605	0,70
S15	605413	4476953	1597	1,70
S16	605378	4477071	1621	0,64
S17	605375	4477007	1618	5,00
S18	605327	4476868	1590	0,90
S19	605290	4476998	1631	3,40
S20	605275	4477068	1638	3,05

Випробувальні роботи дозволили простежити за розподілом металу за простяганням і за глибиною залягання рудних тіл, визначити межі промислово важливих руд.

Використовуючи програмне забезпечення Golden Software Surfer, було створено тривимірну модель зон розповсюдження золотоносних руд в залежності від концентрації цінного компоненту. Ця модель дозволяє досліджувати розподіл корисних копалин у надрах землі з високою точністю і деталізацією. Процес створення 3D моделі

здійснюється за допомогою інструменту Drillhole і включає введення значень координат, висот свердловин і концентрацій корисного компоненту на різних глибинах [5, 6]. Для досягнення максимально інформативної візуалізації використовуються параметри Sizing method і Color method. Налаштування цих параметрів "за даними" дозволяє автоматично змінювати діаметр та колір ділянок свердловин в залежності від концентрації золотого компоненту по їх довжині (рис. 4).

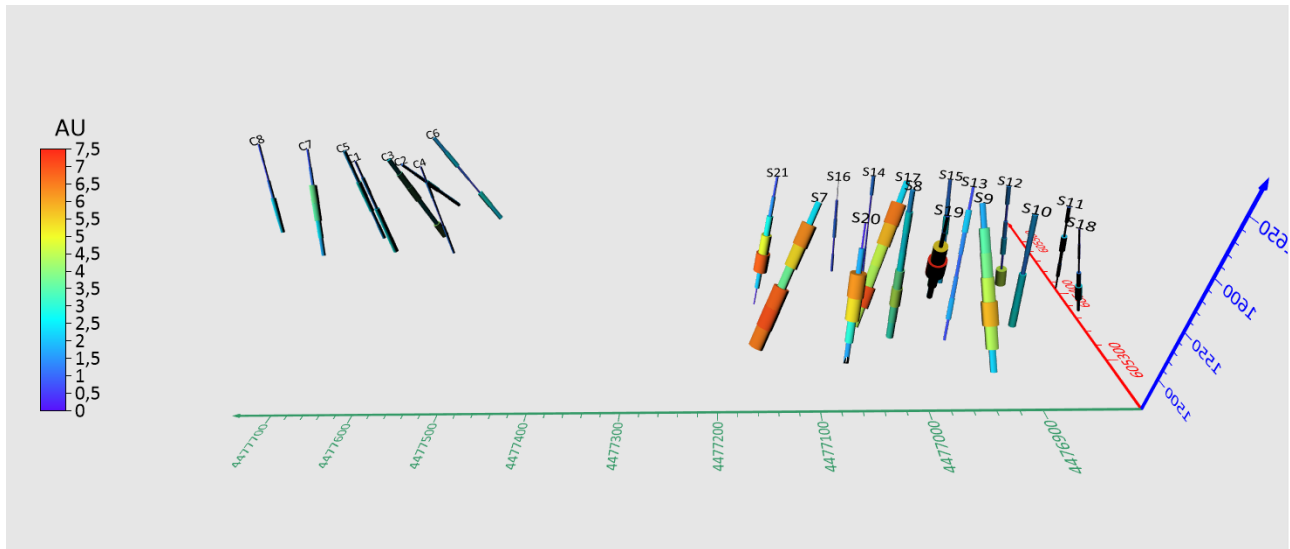


Рис. 4. 3D модель розповсюдження корисного компоненту за концентрацією по довжині свердловини

Додавши земну поверхню до тривимірної моделі, представленої на рис. 4, ми отримуємо більш повне і точне уявлення про просторове розташування свердловин. Таким чином візуалізація стає динамічною та інформативною, дозволяючи легко ідентифікувати зони з найбільшим вмістом золота за їх простяганням та глибиною (рис. 5).

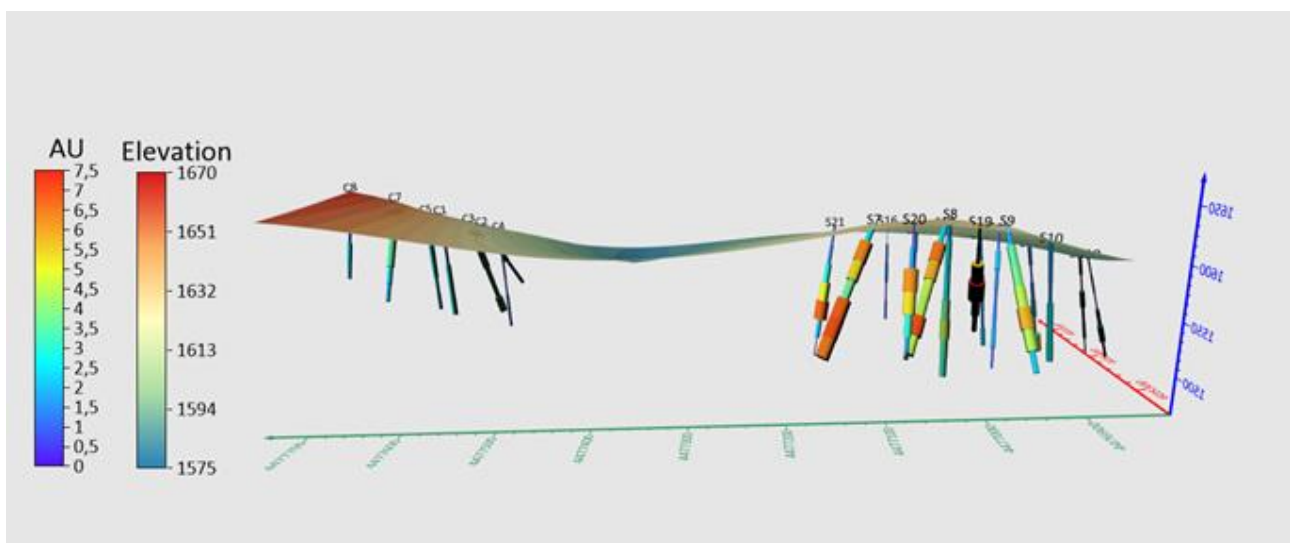


Рис. 5. 3D модель розповсюдження корисного компоненту з зображенням земної поверхні

Створена тривимірна модель поєднує інформацію щодо просторового розташування досліджуваних зон та концентрації корисного компонента в межах цих зон і за глибиною.

Згідно з результатами моделювання в межах південної зони були виявлені свердловини з найвищою концентрацією золотого компонента, яка варіюється від 2,5 до 7 г/т (свердловини S7, S9, S17, S19). Мінімальна концентрація становить 0,8 г/т і зафіксована в свердловині S16. Слід зазначити, що концентрація золотого компонента розподіляється по довжині свердловин нерівномірно, що можна пояснити неоднорідністю геологічної будови, мінералогічними властивостями рудоносних порід та особливостями гідротермальних процесів. Також варто відзначити, що свердловини з високим вмістом цінного компонента зосереджені в північно-західній частині цієї зони, тоді як на периферійних ділянках спостерігається значне зниження показників концентрації. Середній показник концентрації цінного компонента в південній зоні становить 2,41 г/т.

У центральній зоні візуально спостерігається менша концентрація золотого компонента. Максимальні значення спостерігаються в свердловинах C3 та C7 і становлять 3,0–3,5 г/т, тоді як мінімальна концентрація у цій зоні, 0,7 г/т, виявлена в свердловинах C4, C8. Середній показник концентрації цінного компонента в центральній зоні складає 1,9 г/т. Зосередження зон найбільших концентрацій також можна побачити на карті ізоліній концентрацій (рис. 6).

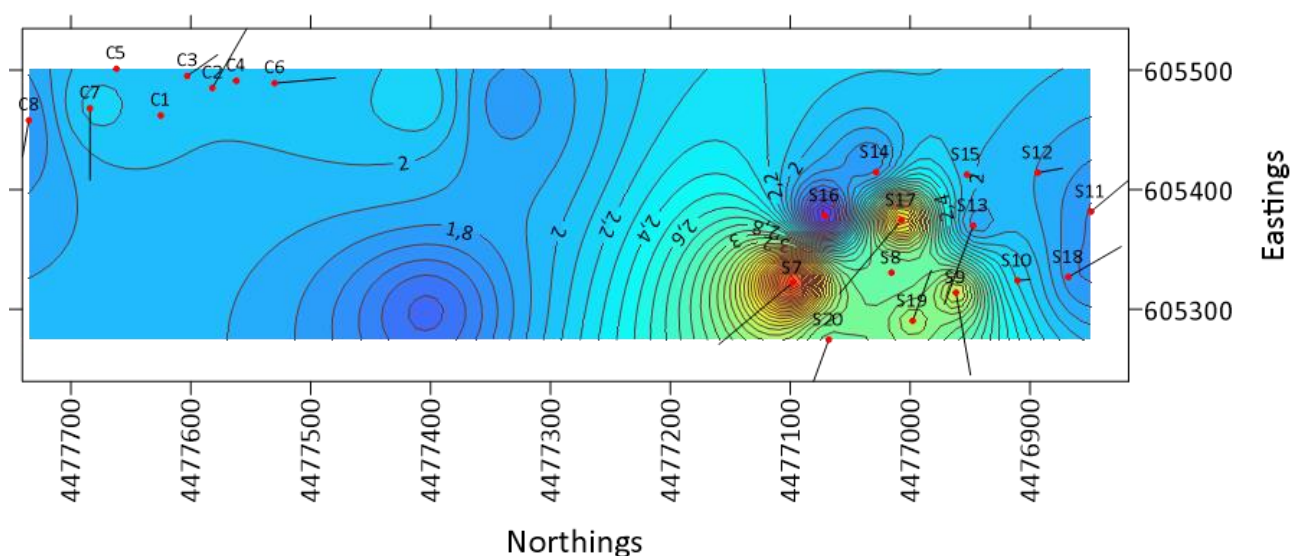


Рис. 6. Карта ізоліній концентрацій золотого компонента

Не зважаючи на те, що середній показник концентрації в обох зонах відрізняється не суттєво, у південній зоні виявлені локальні ділянки з значно вищим вмістом золотого компонента. Порівняльний аналіз зон показав, що концентрація золотого компонента в південній зоні значно перевищує значення в центральній. Це дозволяє визначити південну зону як більш перспективну для подальшої розробки.

Висновки. Використання геодезичного моніторингу та ГІС технологій при дослідженні і плануванні розробки золоторудних родовищ довело свою

ефективність у визначенні перспективних зон видобутку. Комплексний підхід, заснований на інтеграції геодезичних даних із сучасними методами просторового аналізу, дозволяє досягати високої точності картографування та моделювання геологічних структур, забезпечуючи достовірну інформацію для прийняття управлінських рішень.

Інтеграція даних із використанням програмного забезпечення Surfer та Google Earth дозволила створити тривимірну модель зон зосередження рудних тіл і визначити закономірності розподілу золота в межах родовища Tulallar. Модель стала ключовим інструментом для оцінки запасів корисних копалин та оптимізації планування гірничих робіт.

На основі проведеного моделювання встановлено, що південна зона родовища Tulallar демонструє більш високі показники концентрації золотого компоненту порівняно із центральною, із середнім значенням 2,41 г/т проти 1,9 г/т. У південній зоні виявлено локальні ділянки з високим вмістом золота (до 7 г/т), що робить її найбільш перспективною для подальшої розробки. У центральній зоні максимальні концентрації не перевищують 3,5 г/т, а просторове розподілення руд характеризується меншою однорідністю.

Таким чином, поєднання геодезичних методів та ГІС технологій забезпечує якісно новий рівень дослідження родовищ, сприяє підвищенню економічної ефективності видобутку та мінімізації екологічних ризиків. Це підкреслює важливість застосування таких підходів у сучасній гірничодобувній промисловості для раціонального освоєння природних ресурсів.

Перелік посилань

1. Поморцева, О., Пілічева, М. & Анопрієнко Т. (2019). Технологія використання геоінформаційних систем при обробці геодезичних даних. *Технічні науки та технології*, 4, 229–237. http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt_2019_4_33
2. Шипулін, В.Д. (2014). *Основи ГІС-аналізу: навч. посібник*. Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова.
3. Зацерковний, В.І., Бурачек, В.Г., Железняк, О.О. & Терещенко, А.О. (2014). *Геоінформаційні системи і бази даних : монографія*. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя.
4. Quliyev, E.E. & İsayev E.N. (2022). Tülallar qizil yatağinin perspektivliliyi və onun yaxın cinahlarında potensial minerallaşma zonalarına dair qisa icmal. *ANAS Transactions, Earth Sciences*, 2, 88–97.
5. Зуєвська, Н. В., Косенко, Т. В., Шукюрлю, Е., & Коробійчук, В. В. (2024). Оцінка фракційності мінералів з використанням геоінформаційних систем в інженерно-геологічних вишукуваннях. *Технічна інженерія*, 1(93), 332–338. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-332-338](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-332-338)
6. Зуєвська, Н.В., Шайдецька, Л.В., Косенко, Т.В. & Матвійчук, І.О. (2024). Прогнозування зон зі змінними фізико-механічними характеристиками ґрунтових масивів. *Збірник наукових праць НГУ*, 77, 118–125. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.118>

ABSTRACT

Purpose. Development of a methodology for analyzing gold deposits based on the use of geodetic monitoring and GIS technologies to increase the accuracy of analyzing the spatial distribution of the useful component and optimizing mining operations.

Methods. The research methodology is based on a comprehensive approach to the analysis of the Tulallar gold mine, which provides a combination of modern geodetic and geoinformation technologies. The work involved geodetic monitoring methods, exporting spatial data from Google Earth and integrating it into Surfer, and creating a 3D model of the distribution of the useful component. This made it possible to visualize and identify promising areas for further development of the deposit.

Results. The results of the study confirm the effectiveness of using geodetic monitoring and GIS technologies to identify promising mining areas, ensuring high accuracy of mapping and modeling of geological structures. The integration of data in Surfer and Google Earth software allowed us to create a 3D model of ore bodies, which became a key tool for estimating reserves and optimizing mining operations.

Originality. The article first develops a methodology for the study of gold deposits, based on an integrated approach to analysis, using geodetic data and geographic information systems (GIS). The methodology allows creating 3D models that combine data on the concentration of a useful component and geological structure, increasing exploration accuracy, optimizing production and reducing environmental risks.

Practical value. The practical value of the methodology is to identify promising mining areas, optimize mining operations and reduce environmental impact. The integration of geodetic data and GIS provides accurate spatial analysis, which contributes to efficient mining planning. The methodology can be adapted to other deposits, increasing resource efficiency and economic effectiveness.

Keywords: *GIS technologies, geodetic monitoring, gold deposits, geodetic surveys, relief, three-dimensional modeling, Surfer, Google Earth.*