

Посібник з геофізичних досліджень свердловин для дотримання вимог гірничої звітності

Цей посібник призначений для загального застосування під час геофізичних досліджень свердловин та оцінювання відповідності вимогам гірничої звітності.

Сфера застосування охоплює геофізичні дослідження свердловин (ГДС) для пошуків і оцінювання родовищ корисних копалин, а також геотехнічні дослідження гірничих виробок, споруд і об'єктів хвостового господарства. Основну увагу приділено практикам ГДС, що забезпечують відповідність гірничим стандартам.



Посібник з геофізичних досліджень свердловин для дотримання вимог гірничої звітності

Чому стандарти звітності у гірничодобувній галузі важливі

Стандарти звітності мають особливе значення для гірничодобувної галузі, де типовими є тривалі строки реалізації та значні початкові капіталовкладення до виходу проєкту на прибутковість. Стандартизація подання гірничих проєктів, особливо до початку видобутку, необхідна для формування довіри, послідовності та відповідальності перед зацікавленими сторонами щодо фінансових ризиків і впливу на довкілля.

Прозорість для інвесторів забезпечується застосуванням відповідного стандарту країни реалізації проєкту: оцінки ресурсів і запасів подаються у зрозумілій стандартизованій формі, що зменшує фінансовий ризик. Такі системи, як CRIRSCO, узгоджують визначення на міжнародному рівні та дають змогу порівнювати проєкти різних країн на однаковій основі.

Стандарти вимагають підтвердження звітів кваліфікованими фахівцями та надання детальних доказів, що допомагає запобігати завищенню потенціалу родовищ. Чітка звітність дає компаніям, зацікавленим сторонам та інвесторам змогу обґрунтовано оцінювати економічну доцільність, технічну реалізованість і екологічну прийнятність проєкту.

Рисунок 1:
Широко визнані
стандарти звітності
у гірничодобувній галузі.



Для публічних компаній застосування відповідного стандарту може бути обов'язковим, оскільки це забезпечує виконання юридичних і фінансових вимог до розкриття інформації. Сучасні стандарти також охоплюють екологічну та соціальну відповідальність, заохочуючи компанії розкривати вплив на землю, воду й громади. Дотримання визнаних стандартів підвищує міжнародну довіру, полегшує залучення інвестицій і роботу в різних юрисдикціях. Зрештою, стандарти звітності захищають інвесторів, підвищують прозорість і допомагають забезпечити чесне та відповідальне оцінювання проєктів.

Стандарти звітності щодо гірничих робіт і мінеральних ресурсів

Стандарт	Розробник	Застосовується
CRIRSCO International Reporting Template	International Council on Mining and Metals	16 організацій-членів; основа національних стандартів
JORC Code	Australia Minerals Institute	Австралія, Нова Зеландія
CIM (NI 43-101)	Canadian Institute of Mining	Канада
MRC Code	MPIGM	Монголія
PERC Reporting Standard	Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee	ЄС, EFTA, Велика Британія
SAMREC Code	SAIMM & GSSA	Південна Африка
SME Mining Code	Society for Mining, Metallurgy & Exploration	США
UNCF Guidance Europe	UNECE та ін.	Європа
CBRR Guide	Brazilian Commission for Resources and Reserves	Бразилія
CAMRA Code	China Association of Mineral Resource Appraisers	Китай
KCMI Code	IAGI & PERHAPI	Індонезія
Chilean Certification Code	Institute of Mining Engineers of Chile	Чилі

Шаблон звітності CRIRSCO

Комітет міжнародних стандартів звітності про запаси корисних копалин (CRIRSCO) розробляє ключовий шаблон, який використовується гірничими компаніями для публічного звітування про результати розвідки, мінеральні ресурси та запаси.

Сам шаблон не є стандартом, але слугує основою для країн, що розробляють власні національні правила звітності, і використовується 16 організаціями-членами CRIRSCO.

Три базові принципи шаблону:

- **Прозорість** — чіткі та детальні факти.
- **Суттєвість** — включати лише інформацію, необхідну інвесторам для ухвалення рішень.
- **Компетентність** — звіти мають бути підписані кваліфікованим професійним експертом.

Шаблон передбачає опис об'єктів розвідки, результатів розвідки та оцінок мінеральних ресурсів і запасів, які можуть використовуватися іншими для подальшої оцінки вартості або експертного аналізу.

Об'єкт розвідки — це заява або оцінка потенціалу мінерального родовища у визначеному геологічному середовищі, де обсяг розвідки ще недостатній для оцінювання мінеральних ресурсів.

Результати розвідки охоплюють дані та інформацію, отримані під час програм мінеральної розвідки, які можуть бути корисними інвесторам, але ще не є декларацією мінеральних ресурсів або запасів.

Мінеральний ресурс — це концентрація або прояв матеріалу економічного інтересу у земній корі, форма, вміст або якість і кількість якого дають обґрунтовані перспективи економічного видобутку. Для переведення об'єкта розвідки до категорії мінерального ресурсу потрібні конкретні підтверджувальні дані.

Після виконання цих критеріїв об'єкт розвідки може бути класифікований за трьома зростаючими категоріями.

Передбачувані мінеральні ресурси — частина мінерального ресурсу, для якої кількість і вміст або якість оцінені на основі обмежених геологічних даних і випробувань. Геологічних даних достатньо, щоб припустити, але недостатньо, щоб підтвердити вміст або якість руди через низький рівень впевненості. Обґрунтовано очікується, що за результатами подальшої розвідки передбачувані ресурси можуть бути переведені до категорії виявлених.

Виявлені мінеральні ресурси — частина ресурсу, для якої кількість, вміст або якість, густина, форма та фізичні характеристики визначені з достатньою впевненістю для застосування модифікуючих факторів у деталізації, необхідній для планування гірничих робіт і оцінки економічної життєздатності.

Виміряні мінеральні ресурси — аналогічна категорія з вищим ступенем впевненості, яка потребує кращого розуміння геології, мінералогії, можливості видобутку та технологічної переробки родовища.

Після визначення класифікації мінеральних ресурсів до них застосовують модифікуючі фактори, перш ніж об'єкт розвідки може бути заявлений як запас — ймовірний або доведений. До модифікуючих факторів належать гірничі, технологічні, металургійні, інфраструктурні, економічні, маркетингові, правові, екологічні, соціальні, управлінські (ESG) та регуляторні чинники. Для переведення ресурсів у запаси також потрібні концептуальне дослідження (Scoping Study), попереднє техніко-економічне обґрунтування (Pre-Feasibility Study) або техніко-економічне обґрунтування (Feasibility Study).

У всіх випадках звітність має бути підписана належно кваліфікованою Компетентною особою.



Роль геофізики у гірничодобувній галузі

Геофізичні методи широко застосовують під час розвідки родовищ корисних копалин для характеристики об'єктів і переведення їх до категорій ресурсів та запасів відповідно до стандартів країни реалізації проекту. Стандарти звітності важливі, оскільки забезпечують відповідальне, прозоре й коректне в належному контексті використання непрямих даних про геологічне середовище під час оцінювання мінерального потенціалу.

Типові гірничі технології та можливості застосування геофізичних досліджень свердловин наведено на [рисунок 3](#).

Рисунок 2:
Послідовне підвищення категорій ресурсів і запасів

Типи та технології гірничих робіт		
Тип	Технологія	Застосування геофізичних досліджень свердловин
Відкриті роботи	Смуговий видобуток	Застосовується на всіх етапах розвідки; геотехнічні дані для оцінювання розпушуватості та гірничих споруд.
	Кар'єрний видобуток	
	Зняття вершини гори	
Підземні роботи	Камерно-стовпова система	Широко застосовується в розвідці. Після проведення виробок свердловини можна каротувати під землею.
	Блокове обвалення	
	Лавна система розробки	
Розробка розсипних родовищ	Ручні методи	Застосовується для глибоководного драгування; в інших випадках переважно на ранніх етапах розвідки.
	Промивання	
	Гідромоніторний спосіб	
	Драгування	
In-situ видобуток	Експлуатаційний видобуток	Є невід'ємною частиною буріння та оцінювання.
	Вилуговування	

Для більшості стандартів у звіті про геофізичні методи щонайменше зазначають: тип знімання (наприклад, свердловинна геофізика, гравіметрія, магнітометрія), методи збору даних, методи обробки, обмеження та невизначеності.

Ключовим принципом для геофізичних даних при оцінюванні рудних тіл є прозорість. У звітах слід показати, що дані калібровані, відтворювані, а застосовані методи релевантні; інтерпольовані дані мають більшу цінність, ніж екстрапольовані

Рисунок 3:
Типи й технології гірничих робіт, для яких застосовуються геофізичні дослідження свердловин.

Методи, що застосовуються для гірничої розвідки

Метод	Технологія	Виявлення / вимірювання
Космічні	Мультиспектральне зондування	Оксиди заліза та глини, пов'язані з рудними тілами
	Гіперспектральне зондування	Хімічний склад поверхневих порід
Авіаційні	Магнітометрія	Феромагнітні породи
	Електромагнітні методи	Електропровідність
	Радіометрія (гамма)	Приповерхневі радіоактивні елементи
	Гравіметрія	Щільні рудні тіла
Наземні	Відбір геологічних проб	Відбір та аналіз цільових мінералів
	Магнітометрія	Феромагнітні та феримагнітні породи
	Електромагнітні методи	Електропровідність
	Гравіметрія	Щільні рудні тіла
	Відбивальна сейсморозвідка	Структура порід і рудних тіл, розломи
	Рефракційна сейсморозвідка	Глибини реголіту та шарів порід
Підповерхневі	Кернове буріння	Опробування та структура порід
	Свердловинний каротаж	Численні вимірювання структури, міцності та властивостей порід і гідрогеологічних чинників; перетворення двобічного часу проходження відбитої хвилі (TWT) у глибину.
	Мюонна томографія	Щільні рудні тіла у менш щільній вмисній породі

Рисунок 4:
Геофізичні методи,
що застосовуються
у гірничій розвідці.

На ранніх етапах, коли невизначеність найбільша, часто застосовують геофізику. Щільність даних може послідовно зростати від космічних методів через авіаційні та наземні до геофізичних досліджень свердловин. Площі геофізичні методи відносно недорогі та охоплюють великі території, але окремо можуть бути неоднозначними. Просторова дискретність геофізичних даних (крок між точками вимірювання) має зменшуватися, а деталізація — зростати в міру переходу об'єкта від розвідувальної цілі до ресурсів і запасів.

Після визначення об'єктів розвідки потрібна програма буріння для збору даних, що підтверджують потенційну комерційну життєздатність. Розвідувальне кернове буріння дає безперервний зразок породи від поверхні до цільової глибини, що дає змогу виділяти інтервали, які становлять інтерес, і виконувати їх випробування. Геофізичні дослідження свердловин економічно ефективно використовують ці свердловини для отримання широкого набору даних про структуру, міцність і властивості порід та гідрогеологію.

Після проходки підземних виробок мюонна томографія може з високою точністю картувати підземні рудні тіла, порожнини та аномалії густини.

Кодекси звітності вимагають підпису Компетентної особи під інтерпретаціями, що зменшує ризик помилок і викривлення. Найбільшу цінність геофізичні дані мають у поєднанні з геологічним картуванням і результатами буріння; стандарти звітності вимагають такої інтеграції.

Геофізичні дослідження свердловин у гірничій справі та під час оцінювання мінеральних ресурсів

Геофізичні дослідження свердловин регулярно застосовують для відносно недорогого отримання цінних даних про геологічне середовище з уже пробурених розвідувальних свердловин — кернових або спеціально пробурених без відбору керна.

Програми буріння використовують як у відкритих, так і в підземних роботах; вони є ключовими для вилугування та глибоководного драгування. Свердловинні геофізичні методи не вимірюють мінерали безпосередньо, а визначають фізичні властивості.

Каротаж також використовується для геотехнічних досліджень поблизу шахт і кар'єрів: оцінювання розпушувальності, розміщення гірничих споруд, стійкості укосів, управління хвостовим господарством і стану хвостосховищ.

Розвідувальні свердловини зазвичай мають малий діаметр 60–123 мм і можуть досягати глибини 2 км і більше залежно від глибини залягання рудного об'єкта. Багато з них бурять із відбором керна для оконтурювання мінеральних об'єктів і випробування керна. На ранніх етапах розвідки такі свердловини зазвичай бурять з поверхні вертикально або похило. Для глибоководного видобутку буріння й каротаж виконують із бурових суден із компенсацією хитавиці за глибини води 2 км і більше.

Після виявлення перспективних рудних тіл можуть застосовувати складні схеми «материнських» і «дочірніх» свердловин. дочірня свердловина відгалужується від існуючої за допомогою відхилювачів і керованого буріння, що зменшує витрати порівняно з новою свердловиною з поверхні. Підземні виробки також дають змогу бурити коротші напружені свердловини — вертикальні, похилі, горизонтальні або висхідні.

“Стандарти звітності важливі для геофізичної розвідки, оскільки забезпечують відповідальне, прозоре та коректне в належному контексті використання непрямих підповерхневих даних під час оцінювання мінерального потенціалу”



Майже горизонтальні та висхідні свердловини потребують спеціалізованого обладнання, ретельного планування та тісної взаємодії між буровиками й інженерами ГДС; їх горизонтальна довжина може перевищувати 800 м.

Незалежно від стадії розвідки геофізичні дослідження свердловин дають змогу за один виїзд вимірювати багато властивостей геологічного середовища. Дані належать до чотирьох груп: структура, міцність порід, гідрогеологічні параметри та властивості порід.

Для структурних досліджень свердловинні телевізори істотно змінили практику виявлення й трасування розломів, тріщин і площин нашарування. **Оптичний телевізор високої роздільної здатності (Hi-OPTV)[®]** працює у сухих свердловинах або свердловинах із прозорою рідиною та забезпечує найвищу роздільну здатність повноколірних зображень. **Акустичний телевізор високої роздільної здатності (HRAT)[®]** потребує заповнення рідиною; його роздільна здатність нижча, але цілком достатня для виділення тріщин. На орієнтованому зображенні стінки свердловини структурні елементи, що проявляються як синусоїди, легко виділяються та автоматично оконтурюються. Такі цифрові дані добре придатні для побудови 3D-моделей рудних тіл завдяки точному виділенню тріщин і площин нашарування, що зменшує залежність від фізичного керна, параметри якого складно вимірювати. Безперервне розгорнуте зображення стінки свердловини також може замінити дороге й трудомістке фотографування фізичного керна.

Міцність порід можна визначати за допомогою триприміального акустичного зонда повної хвильової форми **Full Waveform Triple Sonic[®]** разом із **зондом Formation Density**. Швидкості P- і S-хвиль дають змогу обчислити коефіцієнт Пуассона, а разом з об'ємною густиною — модулі пружності при малих деформаціях: модуль зсуву, модуль об'ємної пружності та модуль Юнга.

Вода і гірничі роботи взаємодіють у трьох основних аспектах: вода загрожує безпеці, видобуток може погіршувати якість води та змінювати місцевий рівень ґрунтових вод через постійне водовідведення. Вимірювання гідрогеологічних властивостей рудного тіла й перекривних порід дає змогу точніше визначати проєктні рішення, витрати та ризики, що впливають на модифікуючі фактори. Для гідрогеологічних задач ГДС можуть надавати детальні дані про пористість, питомий електричний опір і характеристики потоку. Властивості порід є важливими індикаторами для виявлення рудних тіл та їх меж. Свердловинний каротаж може вимірювати десять і більше параметрів порід, тренди яких корелюють з іншими даними для оконтурювання цільових рудних тіл або виявлення нових перспективних зон.

Геотехнічні дослідження свердловин на гірничому об'єкті охоплюють вивчення поведінки порід, ґрунтів і підземних вод для безпечного та ефективного видобутку. Будівлі, вентиляційні системи, водовідведення та об'єкти хвостового господарства також можуть потребувати геотехнічних даних. Підтримка 3D-геотехнічних моделей дає змогу динамічно оцінювати ризики. Цифрові дані геотехнічного каротажу добре придатні для оперативного наповнення таких моделей.

Свердловинні геофізичні зонди для гірничих застосувань		
Зонд	Калібровані вимірювання	Застосування
Оптичний свердловинний телевізор високої роздільної здатності (Hi-OPTV [®])	Зображення стінки, тріщини та шаруватість	Структура
Акустичний свердловинний телевізор високої роздільної здатності (HRAT [®])	Зображення стінки, тріщини та шаруватість	Структура
Formation Density	Калібрована густина	Міцність порід Властивості порід
Density Gamma	Якісна оцінка густини	Властивості порід
Formation Density HD	Калібрована густина до 5 г/см ³	Міцність порід Властивості порід
Dual Neutron	Пористість	Гідрогеологія
Natural Gamma	Сумарне природне гамма-випромінювання	Структура Властивості порід
Spectral Gamma	Калібрований повний гамма-спектр	Властивості порід
Full Waveform Triple Sonic [®]	Швидкості P- і S-хвиль	Властивості порід Властивості порід
Electric Log	Питомий електричний опір	Гідрогеологія Властивості порід
Focussed Electric (Guardlog)	Фокусований питомий електричний опір	Гідрогеологія Властивості порід
Dual Focussed Induction	Електропровідність пласта	Гідрогеологія Властивості порід
Magnetic Susceptibility	Магнітна сприйнятливність	Властивості порід
Induced Polarisation	Заряджуваність	Властивості порід
3-Arm Caliper	Діаметр свердловини	Структура
Verticality	Нахил і азимут свердловини	Структура
Gyro	Нахил і азимут (у сталевій обсадці)	Структура
Temperature Conductivity	Температура та електропровідність рідини	Гідрогеологія
Impeller Flowmeter	Витрата рідини — високі значення	Гідрогеологія
Heat-Pulse Flowmeter	Витрата рідини — низькі значення	Гідрогеологія

Рекомендована практика геофізичних досліджень свердловин

Цифрові дані геофізичних досліджень свердловин є важливим джерелом підтверджувальної інформації для класифікації ресурсів і запасів. Для гірничих застосувань доступно близько двадцяти різних зондів. Дані всіх цих зондів цифрові, типова вертикальна роздільна здатність — 1 см. Майже всі дані калібровані відповідно до встановлених виробником режимів калібрування. Для багатьох каротажних кривих від виконавця не потрібна інтерпретація — достатньо коректного подання даних. Для акустичних зондів і телевізорів необхідна базова інтерпретація відповідно для аналізу швидкості та виділення структурних елементів.

Для отримання високоякісних даних слід враховувати наведені нижче фактори.

Вибір постачальника послуг з геофізичних досліджень свердловин: такі роботи в гірничій галузі зазвичай передають спеціалізованому підряднику, а не виконують власними силами. Це може бути місцева сервісна компанія або фахівці, які працюють віддалено. Постачальник повинен мати добру репутацію, відповідний досвід і демонструвати прихильність до якості (наприклад, ISO 9001). Членство в галузевих асоціаціях, документовані приклади виконаних робіт і технічні публікації додатково підтверджують репутацію компанії.

*Рисунок 5:
Вихідні дані
геофізичних зондів
та їх застосування*

“Цифрові дані ГДС — ключове джерело доказів, необхідних для класифікації ресурсів і запасів”

Якість обладнання

Якість зондів підтверджують технічними специфікаціями до укладання договору та чинними сертифікатами відповідності, що підтверджують калібрування зонда на момент каротажу. Якісне й належно обслуговуване обладнання має мінімізувати непродуктивний час (NPT), що особливо важливо для віддалених об'єктів.

Кваліфікація інженерів ГДС

Польові інженери мають бути повністю компетентними та добре підготовленими для безпечної й ефективної роботи. Підтвердження навчання і кваліфікації повинні надаватися на вимогу. Інженери мають бути адаптивними, динамічними й здатними працювати в команді, оскільки тісна взаємодія з буровими бригадами часто необхідна, особливо під землею або на морських об'єктах.

Сервісна підтримка

Гірничі об'єкти часто розташовані у віддалених районах, де доставка обладнання та переїзд персоналу займають багато часу. Надійний постачальник рекомендує мати на майданчику резервні зонди та достатню кількість запасних частин. Інженери повинні вміти виконувати польові ремонти, наприклад заміну кабельної головки.

Дотримання стандартів

ASTM D5753-18 є найбільш застосовним стандартом для свердловинного каротажу в гірничій галузі, хоча також потрібні внутрішні стандарти й процедури. Якісний постачальник має демонструвати додаткові компетенції. Сертифікація ISO 9001 підтверджує якість інших аспектів сервісу.

Калібрування зондів

Калібрування зонда є критично важливим для відповідності гірничим стандартам. Див. розділ «Калібровані геофізичні дані забезпечують точну звітність».

Повторюваність

Геофізичні дані, що використовуються як підтвердження у гірничій галузі, мають бути відтворюваними. Сучасна практика часто передбачає кілька проходів, щоб максимально повно отримати дані, особливо за ризику обвалення свердловини. Обсадну або бурильну колону можуть витягувати поетапно (casing pulls), захищаючи нестійкі інтервали; перекриття прокарованих ділянок підтверджує повторюваність. Для одиночного проходу слід записати повторний інтервал із чіткими характерними ознаками. Моніторинг у реальному часі дає змогу негайно виявляти аномалії або несправності обладнання.

Безпека

Документовані докази визнаного навчання з безпеки є обов'язковими для складних робіт у гірничій галузі. Навчання з першої допомоги, робота бригадою з двох осіб і внутрішня система зворотного зв'язку підвищують безпеку. Перед виїздом компанії мають готувати оцінки ризиків і методи виконання робіт, а на місці — оцінювання ризиків безпосередньо на робочому місці (POWRA). Систему карток фіксації небезпечних дій (Hazard Action Card) слід використовувати для розроблення додаткових процедур за результатами майже-інцидентів і аварій.

Простежуваність

Прозорість усіх аспектів геофізичних досліджень свердловин необхідна для дотримання гірничих стандартів. Польові роботи слід документувати у каротажних листах, які включають до фінального звіту разом із чинними сертифікатами відповідності зондів за серійними номерами. Прив'язка глибин за кривими природного гамма-каротажу забезпечує точне суміщення даних різних зондів і також має бути задокументована.

Швидкість каротажу

Виробник визначає рекомендовану швидкість каротажу для кожного типу зонда. Ці значення слід документувати й дотримуватися їх для отримання даних найвищої якості.

Ядерні зонди

Formation Density і Dual Neutron використовують радіоактивні джерела, які приєднують до зонда на час каротажу. Правила використання ядерних джерел відрізняються за країнами й охоплюють дозиметрію, транспортування, тимчасове зберігання та польові процедури.

Підземний каротаж

Свердловини, пробурені з підземних камер, можуть мати будь-яку орієнтацію — похилу, горизонтальну або висхідну. Інженери повинні мати досвід підземних робіт і вміти працювати у команді з буровиками, оскільки для безпечного «проштовхування» зондів у свердловину потрібні спеціальні пристрої та технології.

Глибоководний видобуток

Каротаж свердловин для глибоководних проєктів виконують із бурових суден із компенсацією хитами. Це специфічне середовище, тому до робіт слід залучати досвідчених фахівців для виконання каротажу та/або навчання місцевого персоналу.



Обробка даних

Зонди записують необроблені дані, застосовують файли калібрування та формують повністю калібровані результати; обробка часто є процедурною, а не інтерпретаційною. Для телевізорів (виділення структурних елементів), акустичних зондів (сембланс-аналіз (semblance processing)) і витратомірів потрібен певний рівень базової інтерпретації, який слід документувати. Обробка виконується у галузевому ПЗ, наприклад GeoCAD®, із веденням журналу аудиту вибраних параметрів.

Обмеження

Розвідувальні свердловини часто бурять обертальним керновим способом, що дає високоякісні свердловини з незначною нерівністю стінок і мінімумом тріщин, спричинених бурінням. Однак сильно тріщинуваті зони, пухкі прошарки та перехідні зони можуть створювати проблеми незалежно від способу буріння. Для мінімізації їх впливу часто застосовують поетапне витягування обсадної колони. Похилі свердловини можуть мати недостатнє центрування. Усі обмеження мають бути задокументовані у фінальному звіті.

Фінальний звіт

Фінальний звіт має містити достатні докази та деталізацію, щоб гірнича компанія і Компетентна особа могли оцінити якість свердловинних даних. Оброблені дані подаються у цифровому вигляді в галузевих форматах. Звіт повинен містити підсумок каротажу для кожної свердловини, методику каротажу, принципи роботи зондів, заходи забезпечення якості, процедури обробки та всі обмеження, що вплинули на дані.

Калібровані геофізичні дані забезпечують точну звітність

Гірничі компанії значною мірою покладаються на геофізичні дослідження свердловин під час оцінювання розвідувальних об'єктів та їх життєздатності. Якщо свердловини вже пробурені для відбору керна й випробувань, економічно доцільно використовувати їх і для збирання каліброваних геофізичних даних. Такі дані забезпечують фактичне підґрунтя для інтерпретації, зменшують ризик і забезпечують прийняття рішень на основі надійних доказів. Міжнародні системи звітності, зокрема CRIRSCO, вимагають надійності та валідації підтверджувальних даних.

Калібрування кожного зонда за серійним номером забезпечує узгодженість між різними зондами. Результати можна надійно порівнювати між різними каротажними кампаніями незалежно від конкретного використаного зонда. Це дає змогу порівнювати також результати різних проєктів і впевнено інтегрувати цифрові дані у 3D-моделі геологічного середовища.

Одного лише калібрування недостатньо: для виконання вимог прозорості потрібні документовані докази. Задокументовані режими калібрування, збереження необроблених калібрувальних даних і чинні сертифікати відповідності формують довіру гірничих компаній, їх зацікавлених сторін і Компетентних осіб. Для підтримки гірничих робіт доступно понад двадцять каротажних зондів, і кожен має власний режим заводського та польового калібрування. Ці режими можуть також передбачати розрахунок коефіцієнтів для калібрувальних файлів. Режим калібрування зондів наведено на рисунку 6.

Режими калібрування геофізичних зондів для гірничих і мінеральних застосувань			
Зонд	Заводське	Польове	Примітка
Hi-OPTV®	Осьове вирівнювання обертального зображення камери.	Калібрувальне пристосування для перевірки вирівнювання	Опційний природний гамма-канал.
HRAT®	Вирівнювання акустичної головки.	Процедура перевірки вирівнювання головки.	Опційний природний гамма-канал.
Formation Density (див. також Natural Gamma нижче)	Первинне калібрування LSD/HRD у повному AI-блоці й водяному резервуарі; коефіцієнти нанесені на AI-півблок.	AI-півблок із нанесеними коефіцієнтами та водяний резервуар; калібрувальні пристосування для важеля каверноміра й природного гамма.	Зонд і джерело мають бути узгодженою парою; діапазон густини 1,1–2,95 г/см³.
Density Gamma	Лише якісне вимірювання густини.	Калібрувальне пристосування для природного гамма.	Переважно для розвідки вугілля.
Formation Density HD	Первинне калібрування LSD/HRD в AI-півблоці та сталевому циліндрі.	Постачаються AI-півблок і сталевий циліндр; шаблони для каверноміра й природного гамма.	Високі густини до 5 г/см³.
Dual Neutron	Первинне калібрування у лабораторії ELGI за відношенням імпульсів; визначення коефіцієнта калібрувального пристосування.	Постачається калібрувальне пристосування з нанесеним коефіцієнтом.	Зонд і джерело — узгоджена пара. Діапазон густини 1,1–2,95 г/см³.
Natural Gamma (опційний для багатьох зондів)	Первинне калібрування у тестових шурфах; на калібрувальному пристосуванні зазначено значення API.	Постачається калібрувальне пристосування для природного гамма.	Сумарне природне гамма-випромінювання.
Spectral Gamma	Заводське калібрування нормалізованої характеристики (.mcf).	Калібрувальне пристосування для сумарного гамма; файл .mcf для спектральної характеристики.	Включає сумарний природний гамма-канал.
Full Waveform Triple Sonic®	Заводське калібрування для кожної частоти дискретизації.	Вибрати правильний файл калібрування для використаної частоти.	Стандартний природний гамма-канал.
Electric Log	Заводське налаштування; перевірка тестовим блоком.	Постачається тестовий блок.	Стандартні природний гамма і температура.
Focussed Electric (Guardlog)	Заводське налаштування; перевірка тестовим блоком.	Постачається тестовий блок.	Стандартний природний гамма.
Dual Focussed Induction	SCON/LCON калібруються калібрувальним кільцем.	Калібрувальне кільце; попереднє налаштування та значення відліків формують cal-файл.	Стандартний природний гамма.
Magnetic Susceptibility	Внутрішнє заводське налаштування; перевірка тестовим блоком.	Перевірка тестовим блоком.	Стандартний природний гамма.
Induced Polarisation	Заводське налаштування.	Калібрувальне пристосування для природного гамма.	Стандартний природний гамма.
3-Arm Caliper	Калібрувальне пристосування для важелів.	Постачається калібрувальне пристосування для важелів.	Опційний природний гамма.
Verticality	Заводське налаштування.	Процедура перевірки орієнтації.	Стандартний природний гамма.
Gyro	Заводське налаштування.	Процедура перевірки орієнтації.	Стандартний природний гамма.
Temperature Conductivity	Заводське калібрування температури та електропровідності.	Постачається cal-файл.	Стандартний природний гамма.
Impeller Flowmeter	Попереднє налаштування природного гамма.	Постачається користувацька функція.	Опційний природний гамма.
Heat-Pulse Flowmeter	Попереднє налаштування природного гамма.	Cal-файл природного гамма	Покази витрати знімають при нерухомому зонді.

Рисунок 6:
Режими калібрування геофізичних зондів

“Калібровані дані геофізичних досліджень свердловин забезпечують фактичне підґрунтя для інтерпретації, зменшують ризик і дають змогу ухвалювати рішення на основі надійних доказів”

Зонд Formation Density призначений для вимірювання об'ємної густини з компенсацією впливу свердловини за допомогою знімного джерела цезію-137 та двох екранованих детекторів. Задokumentований режим калібрування вимагає калібрувати разом лише узгоджену пару «зонд/джерело». Первинне калібрування на заводі виконують у повному алюмінієвому блоці та водяному резервуарі великого діаметра.

Замовнику надають алюмінієвий півблок, оскільки повний блок надто важкий для зручного транспортування. Після калібрування в повному блоці процедуру повторюють у півблоці та визначають коефіцієнт приведення до повного блока. Коефіцієнт наносять на півблок і вводять у ПЗ під час наступних калібрувань. Така методика фактично калібрує півблок, мінімізує крайові ефекти та вплив відмінностей у виготовленні й матеріалах і залишається стабільною в міру зниження активності джерела через розпад цезію-137 (період напіврозпаду 30,17 року). Методика **Formation Density** може відрізнитися між виробниками.

Зонд **Dual Neutron** забезпечує каліброване вимірювання нейтронної пористості з компенсацією впливу свердловини у необсаджених свердловинах, заповнених буровим розчином, і є оптимальним для кількісних досліджень пластових флюїдів. Він використовує два пропорційні детектори $^{241}\text{Am-Be}$ та знімне герметичне джерело нейтронів $^{241}\text{Am-Be}$.

Калібрування також вимагає узгодженої пари «зонд/джерело». На заводі застосовують калібрувальне пристосування, для якого співвідношення імпульсів двох детекторів встановлено під час калібрувальної процедури, виконаної в ELGI, за результатами якої розраховано коефіцієнт. Узгоджену пару спочатку калібрують у заводському калібрувальному пристосуванні, потім у калібрувальному пристосуванні замовника й обчислюють його коефіцієнт, який наносять на калібрувальне пристосування. Під час польового калібрування ПЗ вимагає ввести цей коефіцієнт. Під час каротажу необхідно ввести діаметр свердловини у користувачку функцію компенсації та застосовувати ексцентратор. Два детектори та метод відношення імпульсів забезпечують вимірювання пористості з компенсацією впливу діаметра свердловини, але результат не є незалежним від діаметра. Через період напіврозпаду $^{241}\text{Am-Be}$ понад 432 роки активність джерела між калібруваннями суттєво не зменшується. Методики **Dual Neutron** також можуть відрізнитися між виробниками.

Підсумки та висновки

Головна мета стандартів звітності у гірничодобувній галузі — надати стандартизовані визначення та рамкову систему звітності для гірничих компаній, інвесторів і зацікавлених сторін. Хоча різні країни та фондові біржі застосовують різні стандарти, багато найбільших гірничих організацій світу є членами CRIRSCO, а їх національні стандарти втілюють шаблон CRIRSCO.

Для геофізичних досліджень свердловин найбільш релевантним є принцип прозорості CRIRSCO. Постачальники геофізичних послуг повинні надавати калібровані дані та документальні підтвердження. Значний обсяг доступних свердловинних геофізичних даних є каліброваним; до них застосовано мінімальну інтерпретацію або її не застосовано взагалі. Найкращу інтерпретацію виконують самі гірничі компанії, поєднуючи ці дані з результатами інших геофізичних методів, керновими даними та результатами випробувань.

Очікується, що світова гірничодобувна галузь протягом наступних п'яти років зросте приблизно на 30 %, зокрема через попит зеленої економіки на критичні та рідкісноземельні мінерали. Це відбуватиметься попри виснаження багатих руд, перехід у віддалені райони, посилення екологічних обмежень і тривалі строки від початку розвідки до видобутку. У такому ринку перспективи геофізичних досліджень свердловин залишаються позитивними, особливо для постачальників обладнання й послуг, здатних забезпечити перевірювані дані та рівень сервісу, яких очікують гірничі компанії під час побудови дедалі точніших моделей рудних тіл.



Додаткова інформація про калібрування:
Probe Calibration at Robertson Geo



Практичні рекомендації щодо підготовки обладнання:
The Basics of Rigging Up

