

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.М. Каразіна
Факультет геології, географії, рекреації та туризму
Кафедра фундаментальної та прикладної геології

До захисту перед ЄК допущено
В.о. зав. кафедри _____ доц. Петік В.О.
« _____ » _____ 2025 року

**«Вплив мінералогічного складу на петрофізичні властивості
пластів нафтових колекторів»**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Виконав:

студент 2 курсу, група ГХ-21-з,
спеціальність 103 Науки про Землю,
освітньо-професійна програма
«геологія нафти і газу»

Гнатенко Олег Вікторович

Керівник:

к. геол.-мін. н., доцент

Горайнов Сергій Володимирович

*Кваліфікаційна робота захищена
з оцінкою « _____ »*

_____ *Голова ЄК Безрук К.О.*

_____ *Секретар ЄК Тищенко І.І.*

« _____ » _____ 2025 року

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить **64 сторінки**, включає **7 розділів**, **13 ілюстрацій**, **13 таблиць**, **30 джерел** за переліком посилань.

Об'єкт дослідження – пісковикові товщі нафтогазових родовищ.

Предмет дослідження – вплив мінералогічного складу на петрофізичні властивості порід-колекторів та їх геофізичні відповіді.

Мета роботи – встановити взаємозв'язки між мінералогічним складом, петрофізичними властивостями та параметрами геофізичних каротажів для підвищення точності інтерпретації даних свердловинних досліджень і прогнозу колекторських характеристик пісковиків.

Методи та апаратура. У дослідженні застосовано рентгеноструктурний аналіз (XRD) у поєднанні з Rietveld-методом, оптичну та електронну мікроскопію, елементний аналіз, лабораторні петрофізичні методики визначення пористості, проникності, густини та акустичних властивостей. Для інтерпретації геофізичних даних використані каротажні діаграми GR, NPHI, RHOB, DT, а також статистичні та кореляційні методи обробки результатів.

Результати та новизна. Уперше для досліджуваного об'єкта виконано комплексний кількісний мінералогічний аналіз кернового матеріалу з інтеграцією даних XRD, Rietveld-методу, мікроскопічних та геохімічних досліджень. Встановлено точні значення часток основних мінералів та їх діагенетичних модифікацій. Визначено петрофізичні параметри порід і виявлено ключові закономірності впливу мінералогічних компонентів на пористість та проникність. Встановлено нові кореляційні залежності між часткою глинистих, карбонатних та кварцових мінералів і геофізичними параметрами GR, NPHI, RHOB, DT. Показано, що використання кількісних мінералогічних даних суттєво підвищує точність інтерпретації каротажних діаграм та дозволяє прогнозувати петрофізичні властивості в інтервалах без кернової інформації.

Галузь застосування. Результати можуть бути використані у петрофізичних дослідженнях, при оцінці якості колекторів, побудові геолого-

петрофізичних моделей, інтерпретації каротажних діаграм, у процесі геолого-технологічного супроводу буріння та під час планування видобувних робіт на нафтогазових родовищах.

Економічна ефективність. Використання результатів дозволяє зменшити невизначеність у прогнозі колекторських властивостей, оптимізувати інтервали відбору керну, підвищити достовірність оцінки запасів і знизити ризики під час геологорозвідувальних робіт.

Значення роботи та висновки. Робота демонструє, що інтеграція мінералогічного, петрофізичного та геофізичного підходів забезпечує комплексну характеристику пісковикових колекторів і підвищує точність геолого-технічних рішень. Розроблені рекомендації щодо урахування мінералогічних особливостей у процесі інтерпретації каротажних даних можуть бути застосовані для інших родовищ із подібними літологічними умовами. Отримані результати становлять практичну цінність для фахівців з петрофізики, геології нафти і газу, геофізики та геомодельовання.

Прогнозні припущення. Подальший розвиток теми передбачає застосування методів автоматизованої інтерпретації, машинного навчання та 3D-петрологічного моделювання, а також розширення бази мінералогічних і петрофізичних даних для підвищення точності прогнозів колекторських властивостей у різних геолого-структурних умовах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МІНЕРАЛОГІЯ, XRD, RIETVELD-МЕТОД, ПЕТРОФІЗИКА, ПІСКОВИКИ, ГЕОФІЗИЧНИЙ КАРОТАЖ, КОЛЕКТОРИ НАФТИ І ГАЗУ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ	10
1.1 Аналіз керна.....	10
1.2 Геофізичні каротажі.....	11
1.2.1 Гамма-каротаж	12
1.2.2 Акустичний (сонічний) каротаж	12
1.2.3 Густинний каротаж	13
РОЗДІЛ 2. ГЕОЛОГІЧНА БУДОВА НАФТОВОГО РОДОВИЩА	
ЛАМІНАРІЯ	14
2.1 Геологічне положення	14
2.2 Стратиграфія північної частини басейну Бонапарт	15
2.3 Формация Пlover – головний резервуар родовища.....	16
РОЗДІЛ 3. ЕТАПИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	23
3.1 Вибір свердловин	23
3.2 Відбір зразків	24
3.3 Кількісні мінералогічні методи	26
РОЗДІЛ 4. МІНЕРАЛОГІЯ ФОРМАЦІЇ PLOVER.....	27
4.1. Свердловина LAMINARIA-2	27
4.1.1. Результати XRD-аналізу та обробки в Siroquant	27
4.1.2. Результати XRF-аналізу та втрати при прожарюванні (LOI).....	30
4.1.3. Порівняння результатів Siroquant та XRF	31
4.2 LAMINARIA-4.....	34
4.2.1 Дифрактометрія XRD та аналіз Siroquant.....	35
4.2.2 Аналіз XRF і втрати при прожарюванні (LOI)	36
4.2.3 Порівняння результатів Siroquant та XRF	36
4.2.4 Петрографічний аналіз (тонкі шліфи).....	39
4.2.5 Аналіз дрібної фракції (<2 мкм)	42
4.2.6 Порівняння Siroquant і орієнтованих препаратів	45
4.3. Порівняння співвідношень глинистих мінералів.....	46

РОЗДІЛ 5. КІЛЬКІСНИЙ МІНЕРАЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ	48
5.1. Розподіл основних глинистих мінералів	48
5.2. Порівняння результатів XRD та хімічного аналізу	49
5.3. Порівняння з результатами петрофакційного аналізу	49
5.4. Можливості рентгенівської томографії (X-ray CT)	50
РОЗДІЛ 6. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІНЕРАЛОГІЧНОГО СКЛАДУ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ КЕРНОВИХ ЗРАЗКІВ	51
6.1. Вплив глинистих мінералів на радіоактивні властивості порід	51
6.2. Вплив мінерального складу на пористість	52
6.3. Мінералогія та проникність	53
РОЗДІЛ 7. ПЛИВ МІНЕРАЛОГІЇ НА ДАНІ ГЕОФІЗИЧНИХ КАРОТАЖІВ ТА ВИКОРИСТАННЯ МІНЕРАЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В ОЦІНЦІ КОЛЕКТОРСЬКИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ	54
ВИСНОВКИ	59
Список використаних джерел	62

ВСТУП

Оцінка петрофізичних властивостей порід-колекторів є одним із ключових етапів під час визначення нафтогазового потенціалу продуктивних товщ і прийняття інвестиційних рішень. Традиційно такі властивості визначаються за даними лабораторних досліджень керну та геофізичних методів свердловинного каротажу. Попри високий рівень розвитку цих методик, отримані результати нерідко виявляються неоднозначними, а інколи – некоректними через відсутність повноцінної інтеграції геологічної та мінералогічної інформації у процес побудови петрофізичної моделі колектора. Наявність у пісковиках різних типів глинистих та важких мінералів, вуглефікованих включень або особливостей текстури та структури породи може суттєво впливати на густину, пористість, радіоактивність, електричний опір, магнітну сприйнятливість і швидкість пружних хвиль. Ігнорування цього впливу призводить до суттєвих похибок під час інтерпретації геофізичних каротажних даних та оціночних робіт у межах покладу.

Світовий досвід дослідження пісковикових колекторів свідчить про те, що інтеграція кількісних мінералогічних досліджень із петрофізичним аналізом дозволяє значно підвищити точність оцінки їхньої якості. У багатьох нафтогазових басейнах (Північне море, Західна Австралія, Північна Америка) застосування XRD-аналізу, методів Rietveld-рафінування, петрографічних досліджень тонких шліфів та рентгенофлуоресцентної спектроскопії стало стандартною практикою для калібрування каротажних моделей і підвищення достовірності прогнозу колекторських параметрів. Разом з тим, вітчизняна практика дослідження порід, як правило, спирається на роздільне використання кернових і геофізичних даних, що знижує рівень інтерпретації складних колекторів, особливо пісковиків з неоднорідним мінералогічним складом. Це зумовлює актуальність роботи та визначає її значення для розвитку сучасної геології та петрофізики.

Мета дослідження

Метою кваліфікаційної роботи є удосконалення підходів до оцінки петрофізичних властивостей пісковикових колекторів шляхом інтеграції кількісних мінералогічних досліджень та даних кернового і геофізичного аналізу.

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні наукові підходи до вивчення петрофізичних властивостей порід та методи кількісної мінералогії.
2. Дати геологічну характеристику вибраного нафтогазового об'єкта та пісковикової товщі, що є предметом дослідження.
3. Виконати кількісний мінералогічний аналіз керну з використанням XRD, Rietveld-методу, мікроскопічних і геохімічних досліджень.
4. Визначити пористість, густину, проникність та інші петрофізичні параметри порід за лабораторними методиками та даними каротажу.
5. Встановити кореляційні залежності між мінералогічним складом і петрофізичними властивостями пісковиків.
6. Проаналізувати особливості впливу мінералогічних компонентів на геофізичні відповіді (GR, NPHI, RHOB, DT та ін.).
7. Розробити рекомендації щодо удосконалення методики інтерпретації каротажних діаграм з урахуванням мінералогічних особливостей порід.

Об'єкт та предмет дослідження

Об'єкт дослідження – пісковикові породи продуктивної товщі, представлені керновими та геофізичними даними бурових свердловин.

Предмет дослідження – мінералогічні особливості пісковиків та їхній вплив на петрофізичні властивості і каротажні параметри.

Теоретичні та методологічні основи дослідження

Методологічну основу роботи становлять сучасні концепції петрофізики, літології та геології нафти й газу, а також методи кількісної мінералогії. У роботі застосовано:

- рентгенівську дифрактометрію (XRD);
- Rietveld-метод (Siroquant або аналогічні програми);
- мікроскопію тонких шліфів;
- рентгенофлуоресцентну спектрометрію (XRF);
- аналіз глинистих фракцій;
- лабораторні методи оцінки пористості, густини та проникності;
- інтерпретацію геофізичних каротажних матеріалів;
- статистичні методи встановлення кореляцій.

Теоретичну основу становлять праці Serra (1986), Emerson (2000), Nyberg et al. (1978), Guest (1990) та ін., присвячені взаємозв'язку мінералогії та петрофізичних властивостей порід.

Наукова новизна

Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні та впровадженні підходу до інтегрованої інтерпретації петрофізичних властивостей пісковикових колекторів з використанням кількісних мінералогічних даних, що дозволяє підвищити достовірність оцінки пористості та інших параметрів. Отримані кореляції між мінералогією та геофізичними логами можуть бути застосовані для покращеної інтерпретації у товщах зі складним мінералогічним складом.

Практичне значення та галузь застосування

Отримані результати можуть бути використані:

- під час побудови петрофізичних моделей колекторів;
- при уточненні інтерпретації даних каротажу в межах продуктивних пісковикових товщ;
- у процесі геолого-технологічного моделювання родовищ;
- під час оцінки нафтогазового потенціалу нових об'єктів;

- у навчальному процесі з дисциплін «Петрофізика», «Літологія», «Геологія нафти і газу».

Особистий внесок магістранта

Магістрант самостійно виконав аналіз літератури, здійснив обробку та інтерпретацію мінералогічних, петрофізичних і каротажних даних, провів кореляційні дослідження, сформулював висновки та розробив практичні рекомендації. Окремі результати були представлені у вигляді доповідей на студентських наукових конференціях та апробовані під час виконання навчально-наукових модулів.

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯД ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цьому розділі розглянуті ключові аспекти, пов'язані з аналізом керна, інтерпретацією геофізичних каротажів та методами кількісного мінералогічного аналізу. Особливу увагу приділено джерелам можливих похибок під час лабораторного вивчення кернів, принципам роботи різних типів геофізичних каротажів та впливу мінерального складу на результати вимірювань. Окремо розглянуто найбільш поширені методики мінералогічного аналізу осадових порід і їхню придатність для оцінки колекторських властивостей резервуарів.

1.1 Аналіз керна

Аналіз керна є єдиним методом, що дозволяє безпосередньо вимірювати низку важливих петрофізичних параметрів колектора, включаючи пористість, проникність, гранулометричний склад, густину зерен, мінералогічний склад, вплив гірського тиску та чутливість до флюїдів (Bateman, 1985).

Точність лабораторних вимірювань зазвичай є дуже високою: похибка визначення пористості складає приблизно $\pm 0.5\%$, а проникності – близько 5%, за умов дотримання стандартів підготовки та вимірювань (Core Laboratories, 1973). Разом з тим, отримані результати багато в чому залежать від якості керну, умов його вилучення, транспортування та обробки. Порушення процедури підготовки зразків може призводити до руйнування структури породи та суттєвих викривлень результатів (Sinclair & Duguid, 1990; Hurst, 1987b).

Особливо небезпечними є руйнівні методи підготовки керну, такі як висвердлювання пробок (plugging), що може спричинити дезінтеграцію породи та завищення проникності. Відомі випадки, коли неправильне висушування зразків повністю вилучало гігроскопічну воду з глинистих мінералів, що змінювало їх морфологію, призводило до хибної ідентифікації

та некоректного аналізу впливу глин на петрофізичні властивості (Sinclair & Duguid, 1990; McHardy et al., 1982; Pallat et al., 1984).

Незважаючи на розвиток сучасних мікроскопічних та спектроскопічних методів (SEM, EDX, XRD, IR-спектроскопія; Juhasz, 1990), у сфері аналізу керну досі відсутні уніфіковані стандарти та єдині процедури калібрування. Це означає, що результати аналізів, отримані у двох різних лабораторіях, можуть суттєво відрізнятися. Наприклад, пористість проб, висушених у керованому середовищі, систематично нижча порівняно з пробами, висушеними в печі (Penney & Looi, 1996). Такі розбіжності ускладнюють зіставлення лабораторних даних із результатами геофізичного каротажу, що нерідко призводить до помилкових висновків під час оцінки колекторських властивостей.

1.2 Геофізичні каротажі

Геофізичний каротаж полягає в реєстрації фізичних параметрів порід за допомогою приладів, які спускаються в обсаджену або відкриту свердловину. Дані збираються в безперервному режимі під час підйому інструмента. Типовий інтервал вертикального розрізнення сягає приблизно 0.25 м (Rider, 1996).

Каротажні криві **не є прямими вимірюваннями** петрофізичних властивостей. Вони відображають фізичні параметри порід – природну радіоактивність, електричний опір, густину, швидкість пружних хвиль тощо. Ці величини вже під час інтерпретації перекладаються на геологічно значущі властивості.

Ключовою проблемою є те, що дані керну та каротажу часто не збігаються через:

- різні масштаби вимірювань (точкові дані керну vs. інтегральні дані каротажу);
- різні умови проведення (in situ vs. лабораторія);
- вплив умов буріння, температури та тиску (Rider, 1996).

Важливою процедурою є **глибинне зіставлення керну та каротажних кривих**, яке виконується шляхом порівняння гамма-активності, літологічних описів та кривих нейтронно-густинного каротажу. Лабораторні дані часто використовують для калібрування кривих у інтервалах без керну.

1.2.1 Гамма-каротаж

Гамма-каротаж реєструє природну радіоактивність порід, що визначається вмістом ізотопів калію, торію та урану (Schlumberger, 1989). Оскільки глинисті мінерали (особливо іліт) мають високий вміст К та радіоактивних домішок, гамма-каротаж широко застосовують для оцінки «глинистості» породи.

Проте існують обмеження:

- радіоактивними можуть бути **не лише глини**, а й калієві польові шпати, слюди, важкі мінерали (Nyberg et al., 1978);
- деякі глинисті мінерали (каолінит, хлорит) **майже нердіоактивні**, що робить інтервал візуально "чистим" на каротажі (Hurst, 1987a);
- залежність між показником гамма-каротажу та об'ємом глинистих мінералів не є строгою (Hamada, 1999; Katahara, 1995).

Для оцінки об'єму глин використовують індекс I_{GR} (Dresser Atlas, 1979), який, однак, базується на припущенні про однакову природну радіоактивність усіх пісковиків і всіх глин – припущенні, яке часто порушується.

1.2.2 Акустичний (сонічний) каротаж

Сонічний каротаж вимірює інтервальний час проходження пружних хвиль (Δt), що використовується для оцінки пористості та літології. Основна формула – рівняння Вайлі (Wyllie), яке встановлює залежність між Δt і пористістю (Rider, 1996).

Проблеми використання сонічного каротажу:

- глинисті мінерали значно сповільнюють хвилі, тому пористість у глинистих пісковиках **завищується**;

- корекції на глинистість базуються на даних гамма-каротажу, що також містить визначені вище похибки;
- відмінності між керновими та каротажними даними можуть бути значними.

Це обґрунтовує необхідність альтернативних підходів, що дозволяють достовірно враховувати вміст глинистих мінералів.

1.2.3 Густинний каротаж

Густинний каротаж вимірює об'ємну густину порід на основі поглинання гамма-випромінювання. Інструмент складається з джерела γ -квантів і двох детекторів, що дозволяє скоригувати вплив бурового розчину та кірки (Schlumberger, 1989). Густина породи залежить як від густини мінеральної матриці, так і від густини флюїду в порах, що дозволяє:

- оцінювати пористість,
- диференціювати літологію,
- робити висновки щодо типу флюїду.

Глибина дослідження становить близько 10 см (Rider, 1996).

РОЗДІЛ 2.

ГЕОЛОГІЧНА БУДОВА НАФТОВОГО РОДОВИЩА ЛАМІНАРІЯ

У цьому розділі подано огляд геологічного розташування, структурної будови та стратиграфії північної частини басейну Бонапарт, де локалізоване нафтове родовище Ламінарія. Особливу увагу приділено умовам формування, літології та стратиграфічному положенню формації Пlover – основного продуктивного комплексу родовища.

2.1 Геологічне положення

Свердловини, обрані для даного дослідження, – Laminaria-2 та Laminaria-4 (надалі **Lam-2** і **Lam-4**) – розташовані в межах нафтового родовища Ламінарія, яке знаходиться у північній частині басейну Бонапарт, у зоні Північно-Західного шельфу Австралії (рис. 2.1) [Woodside Petroleum, 1996].

Родовище приурочене до локального структурного підняття – **височини Ламінарія**, що є ізольованим відгалуженням платформ Ашмор і Сахул. Формування височини Ламінарія, як і інших структурних елементів регіону, пов'язане з тектонічними процесами відкриття басейну Бонапарт [Whibley & Jacobson, 1990].

Тектонічна еволюція басейну Бонапарт включала два головні етапи рифтингу:

1. **Пізньодевонський рифтинг**, який започаткував формування басейну та зумовив виникнення субмеридіональних (NW–SE) структурних трендів [Lee & Gunn, 1988]. Однією з таких структур є суббасейн Петрел.

2. **Юрський рифтинг**, що сформував переважно NE–SW орієнтовані структури та був пов'язаний з розпадом Гондвани у середній юрі [O'Brien et al., 1993].

Перехрещення цих ортогональних структурних напрямків сформувало сучасну конфігурацію платформи Сахул, платформи Ашмор, грабенів Малита та Вулкан, а також височин Ламінарія і Фламінго [Woodside Petroleum, 1998].

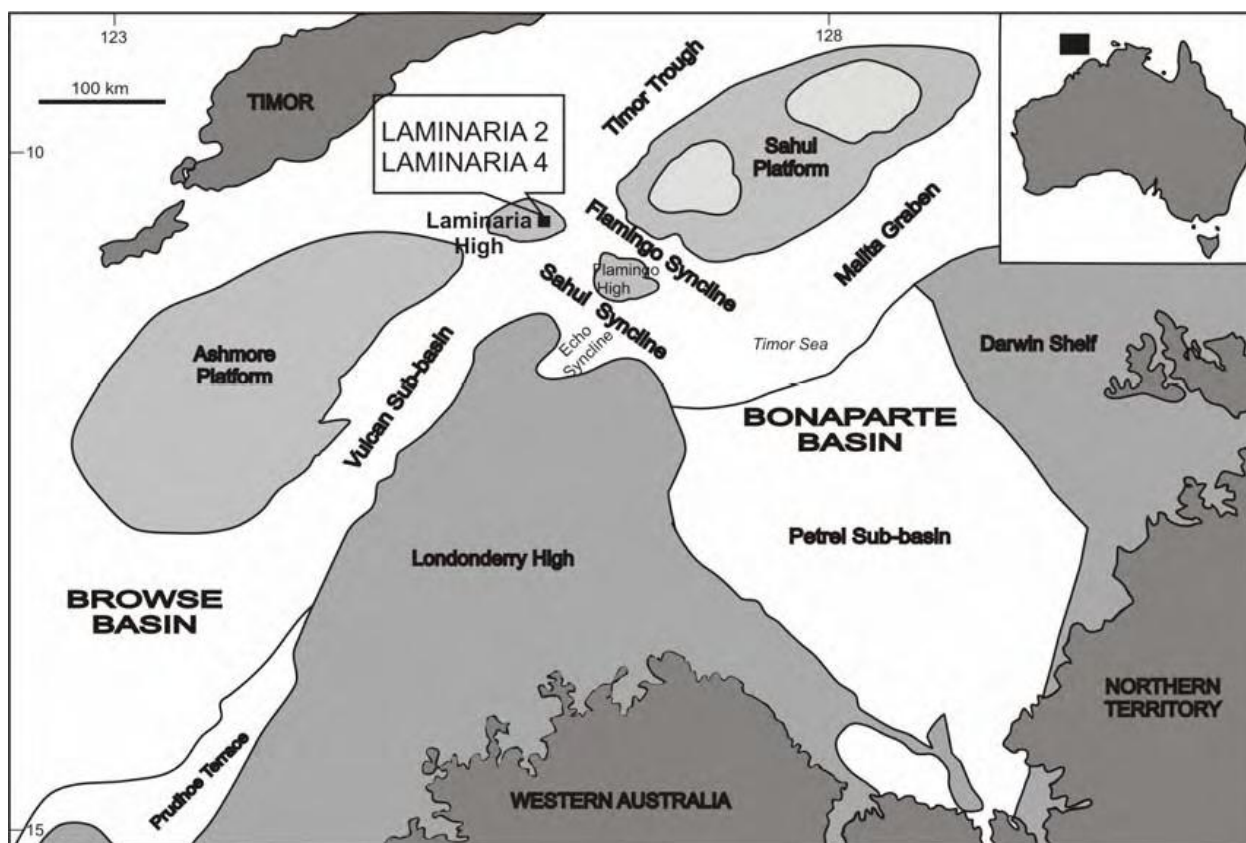


Рисунок 2.1. Розташування свердловин Lat-2 і Lat-4 (модифіковано за Woodside Petroleum, 1996).

2.2 Стратиграфія північної частини басейну Бонапарт

У цьому підрозділі наведено узагальнену стратиграфічну послідовність регіону (рис. 2.2), відповідно до схем, запропонованих Mory (1988; 1990) та Lee & Gunn (1988).

Пермські відклади

Найдавнішим осадовим комплексом є **формація Хайленд-Бей (Permian Hyland Bay Formation)**, представлена льодовиковими грубоуламковими теригенними відкладами з прошарками вапняків і вугілля [Mory, 1990].

Тріасові відклади

Тріасові породи займають більшу частину басейну.

Основні підрозділи:

- **Формація Маунт-Гудвін (Lower Triassic)** – трансгресивні сланці та алевроліти.

- **Група Сахул (Middle–Upper Triassic)** – чергування пісковиків, аргілітів та вапняків, сформованих у мілководних та дельтових умовах [Whibley & Jacobson, 1990].

Перехід до юри позначений континентальними червоними відкладами **формації Маліта**.

Юрські відклади

До юрської системи належить головний продуктивний горизонт родовища – **формація Пlover (Plover Formation)**.

Відклади Пловера завершує **оксфордський (середньоюрський) стратиграфічний розрив**, який відділяє їх від післярифтингової товщі – **формації Фламінго (Flamingo Group)**.

Крейда

Подальший розвиток басейну відбувався в умовах пасивної континентальної окраїни, що сприяло накопиченню потужної трансгресивної послідовності **групи острова Батерст (Cretaceous Bathurst Island Group)**.

Кайнозой

На Ашморській та Сахульській платформах у ранньому палеогені домінував карбонатний осадоплив (формація Хібернія). У міоцені регіон зазнав підняття і ерозії внаслідок зіткнення Австралійської та Азійської плит [Whibley & Jacobson, 1990].

2.3 Формація Пlover – головний резервуар родовища

Основний продуктивний розріз у свердловинах Lam-2 і Lam-4 відповідає відкладами формації Пlover та верхньою частиною формації Ламінарія [Woodside Petroleum, 1998].

- У **Lam-2** розріз простягається від 3200 до 3502 м (рис. 2.3).
- У **Lam-4** – від 3209 до 3371 м (рис. 2.4).

		AGE	STRATIGRAPHIC NOMENCLATURE (Mory, 1988)	LITHOLOGY	MAIN SEISMIC HORIZONS	TECTONIC EVENTS			
TERTIARY	NEOGENE	QUATERNARY	UNDIFFERENTIATED MIOCENE - RECENT		BASE MIOCENE UNCONFORMITY	Continued subduction of Australian plate with extensional faulting. Collision of Australian and Asian plates - formation of Timor trough subduction zone and island arc system. Northward drift of Australia into tropical waters enhances change from clastic to carbonate shelf environment. Complete separation of western landmass from Australian plate - platform areas subside and NW tilt is applied to whole shelf. Initiation seafloor spreading in Indian Ocean - associated volcanics on SW portion of Ashmore Platform. Rifting period - Initiation of NE trending Vulcan and Malita grabens with concomitant uplift exposure and erosion of western landmass and parts of Ashmore Platform.			
		PLIOCENE							
	PALEOGENE	MIOCENE	HIBERNIA FORMATION		TOP PALEOCENE				
		OLIGOCENE							
		EOCENE							
CRETACEOUS	UPPER	MAASTRICHTIAN	BATHURST ISLAND GROUP		TOP CRETACEOUS				
		CAMPANIAN							
		SANTONIAN							
		CONIACIAN							
		TURONIAN							
		CENOMANIAN							
	LOWER	ALBIAN	FLAMINGO GROUP		NEAR BASE CRETACEOUS (VALANGINIAN UNCONFORMITY)				
		APTIAN							
		BARREMIAN							
		HAUTERIVIAN							
		VALANGINIAN							
		BERRIASIAN							
JURASSIC	UPPER	PORTLANDIAN	PLOVER FORMATION		BREAKUP (OXFORDIAN UNCONFORMITY)				
		KIMMERIDGIAN							
	MIDDLE	OXFORDIAN	MALITA FORMATION						
		CALLOVIAN							
		BATHONIAN							
		BAJOCIAN							
	LOWER	ALENIAN	SAHUL GROUP						
		TOARCIAN							
		PLIENSCHACHIAN							
		SINEMURIAN							
TRIASSIC	UPPER	HETTANGIAN	MT. GOODWIN FM.						
		RHAETIAN							
	MIDDLE	NORIAN					HYLAND BAY FORMATION		TOP PERMIAN
		CARNIAN							
		LADINIAN							
PERM.	UPPER	ANISIAN	KINMORE GRP.						
		SCYTHIAN							
	UPPER	TATARIAN	HYLAND BAY FORMATION						
		KAZANIAN							

Рисунок 2.2. Узагальнена стратиграфія північного басейну Бонапарт (модифіковано за Whibley & Jacobson, 1990).

У даній роботі термін **«формація Пlover»** використовується для позначення всього продуктивного інтервалу в обох свердловинах, відповідно до схем стратиграфії Mory (1988).

Літологія та особливості розрізу

Формація Пlover у свердловинах Lam-2 та Lam-4 представлена:

- масивними кварцовими пісковиками;
- змінними прошарками глинистого матеріалу;
- інтенсивною біотурбацією;
- рідкісними прошарками алевролітів і вуглистого матеріалу;
- окремими інтервалами кальцитовмісних пісковиків.

Інтенсивна біотурбація свідчить про добру перемитість пісків, що забезпечує порівняно однорідні вертикальні та горизонтальні колекторські властивості [Hearn et al., 1984].

Осадонакопичення та тектонічні умови

Осадження формації Пlover відбувалося на початку юрського рифтингу (пізня середня – рання пізня юра), у зоні активного розтягнення земної кори. Пісковики формувалися у:

- прибережно-морських,
- бар'єрно-барових
- та дельтових умовах [Whibley & Jacobson, 1990].

Потужність формації Пlover у різних частинах басейну сягає >600 м [Mory, 1988].

Колекторські властивості

Пісковики Пlover – один з найкращих резервуарів Північно-Західного шельфу Австралії, з середніми значеннями:

- пористість: ~25 %,
- проникність: до 1200–1300 мД [Whibley & Jacobson, 1990].

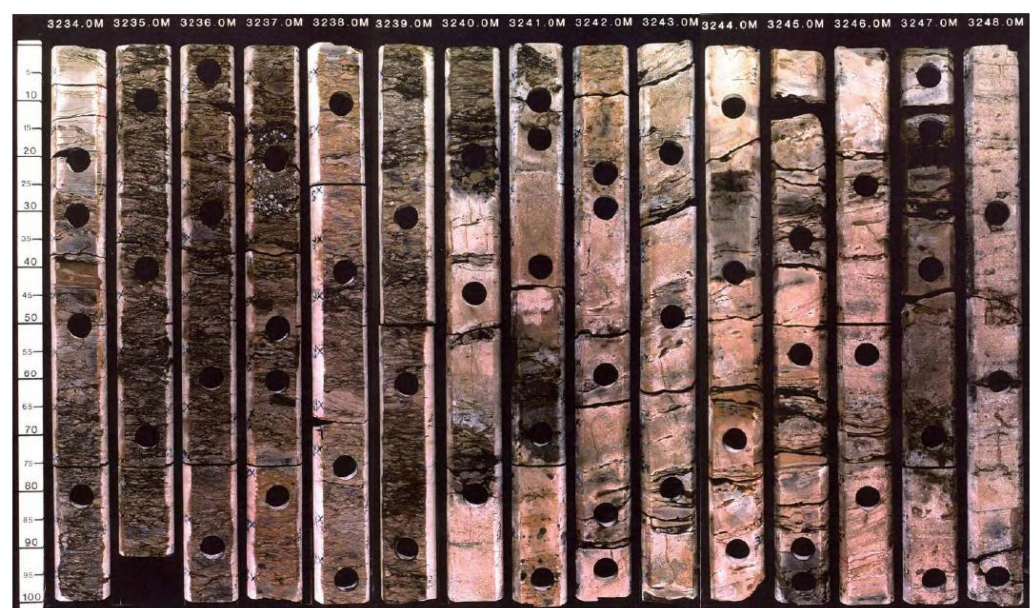
Цей комплекс містить основні нафтові поклади регіону – Jabiru, Skua, Laminaria тощо [MacDaniel, 1988].

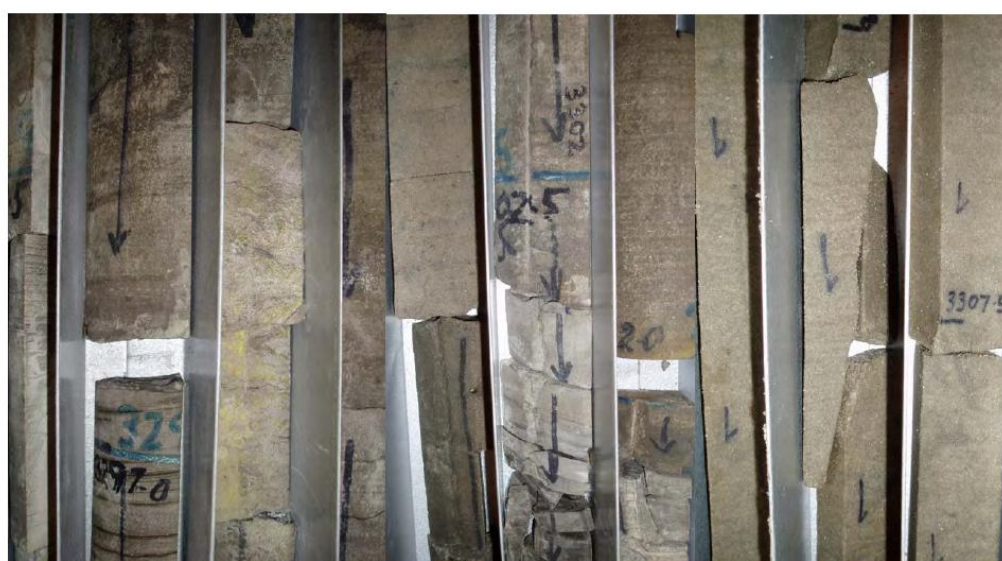
LAMINARIA - 2 STRATIGRAPHIC TABLE					
AGE		FORMATION UNIT	LITHOLOGY	DEPTH (mRT)	Thick-ness (m)
Sea Bed				378	
					484
TERTIARY	early Pliocene - late Miocene		Calcarenite, calcisiltite, claystone	862	70
	early Pliocene - early Miocene	Oliver Formation	Calcarenite, dolomite, minor claystone, calcilutite	932	713
	? early Miocene	Cartier Formation	Calcilutite, calcarenite, claystone	1645	43
	late Eocene - mid Eocene	Upper Hibernia Formation	Calcarenite, calcilutite, claystone	1688	637
	? mid Eocene - early Eocene	Lower Hibernia Formation	Calcarenite, calcilutite, chert, claystone	2325	281.5
	late Paleocene	Johnson Formation	Calcarenite, claystone	2606.5	71.5
CRETACEOUS	mid Maastrichtian - late Cenomanian	Bathurst Island Group	Minor claystone, calcilutite	2678	135
	late Albian	Wangarlu Formation	Claystone	2813	88
		Radiolarian Unit	Claystone	2901	14
	no dating available	Darwin Formation	Claystone	2915	38
JURASSIC	- Tithonian	Upper Flamingo Group	Claystone, siltstone	2953	204
	Oxfordian	Lower Flamingo Group	Claystone	3157	43
	Oxfordian - Callovian	Laminaria Formation	Sandstone, claystone	3200	115
	Callovian - Bathonian	Plover Formation	Sandstone, claystone	3315	187
				3502	
Total Depth					

Рисунки 2.3. Стратиграфічні розрізи свердловин Лам-2.

LAMINARIA - 4 STRATIGRAPHIC TABLE					
AGE		FORMATION UNIT	LITHOLOGY	DEPTH (mRT)	Thick-ness (m)
Sea Bed				394	
				886	492
TERTIARY	Miocene (inferred)	Oliver Formation	Calcarenite, minor sandstone	1702.5	816.5
	Oligocene (inferred)	Cartier Formation	Calcarenite	1714	11.5
	Eocene (inferred)	Prion Formation	Calcarenite, calcisiltite, minor calcilutite and claystone	2316.5	602.5
	Eocene	Hibernia Formation	Calcarenite, calcilutite, chert, minor calcareous claystone	2767	450.5
	Campanian (inferred)	Fenelon Formation	Argillaceous calcilutite	2780	13
CRETACEOUS	Campanian-Santonian	Gibson Formation	Argillaceous calcilutite	2815	35
	Santonian (inferred) - Cenomanian	Woolaston Formation	Argillaceous calcilutite	2846	31
	Albian	Jamieson Formation	Claystone, calcareous claystone	2938	92
	Albian - Barremian	Darwin Formation	Argillaceous calcilutite	2951	13
	Barremian Valanginian-Berriasian	Echuca Shoals Formation	Claystone	2979	28
	Valanginian-Berriasian Berriasian	Flamingo Formation	Claystone	3162	183
JURASSIC	Oxfordian	Frigate Formation	Claystone	3209	47
	Callovian	Laminaria Formation	Sandstone, minor silty claystone	3316	107
	Callovian-Bathonian (inferred)	Plover Formation	Sandstone, minor silty claystone	3371.5	55.5
				Total Depth	

Рисунки 2.4. Стратиграфічні розрізи свердловин Лам-4.





Рисунки 2.5–2.6. Фотографії керна формації Пlover (Lat-2 та Lat-4).

РОЗДІЛ 3.

ЕТАПИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому розділі описано методики, застосовані в дослідженні – від етапу збирання матеріалів до етапу їх аналізу. Обговорення кількісних мінералогічних методів включає принципи вимірювань, підготовку зразків та аналітичні програми, використані в роботі. Також наведено короткий огляд процедур кернавого аналізу, виконаних на відібраних свердловинах відповідними лабораторіями. Розгляд геофізичних каротажів зосереджено на обробці даних як вихідному етапі для їх інтерпретації, представленої у наступних розділах.

3.1 Вибір свердловин

Свердловини Laminaria-2 та Laminaria-4 були обрані завдяки тому, що в них спостерігається зменшення пористості зі збільшенням глинистості. Очікувалось, що залежність пористості від літологічних (а отже, й мінералогічних) змін дозволить оцінити, як мінералогія впливає на петрофізичні властивості та відображається в геофізичних каротажах. Крім того, для дослідження були доступні як каротажі, так і дані кернавого аналізу.

Обидві свердловини містять понад 100 м добре збереженого керну, який забезпечив достатню кількість матеріалу для відбору зразків. Керни, відібрані з частини формації Plover, представлені однорідними та інтимно змішаними піщано-глинистими літотипами, що робить їх придатними для порошкових аналітичних методів. Така однорідність мінімізує можливі похибки при порівнянні мінералогії та даних кернавих проб з інформацією геофізичних каротажів, які мають інший масштаб вимірювання.

Формація Plover є головною резервуарною товщею Бонапартського басейну (Whibley and Jacobsen, 1990). Тому її вивчення робить суттєвий внесок у розуміння ресурсів та характеристик продуктивності цього важливого нафтового району Австралії.

3.2 Відбір зразків

Керни зі свердловин Lam-2 та Lam-4 зберігаються у керноскровищі Геонауки Австралії (Geoscience Australia) у Канберрі. Відбір зразків був обмежений чвертю керну, що була доступна у скровищі. Зразки вирізали вздовж довжини керну, щоб охопити максимально можливу частину стратиграфічного розрізу та отримати репрезентативні фрагменти через кілька площин нашарування. Кожен зразок мав приблизні розміри $3 \times 8 \times 1$ см і був вирізаний алмазною пилкою (рис. 3.1).



Рис. 3.1 Фотографії зразків, розрізаних вздовж довжини основних секцій за допомогою алмазного пильного диска.

Відбір проводили на тих самих глибинах, що й відбір кернових проб у первинному дослідженні свердловин, що дозволило співставити результати мінералогічного аналізу з іншими даними керну. Такий підхід також забезпечив кращу кореляцію між мікромасштабною мінералогією та даними каротажів. У Lam-2 глибини відбору кернових проб були позначені круглими отворами у керні (рис. 3.2), що дозволило максимально точно відбирати

матеріал на тих самих інтервалах. У Lam-4 таких позначок не було, тому орієнтувалися лише на розмітку глибини на кернових секціях. Інтервали відбору змінювалися від кількох сантиметрів до понад 5 метрів залежно від змін пористості в керні.



Рис. 3.2 Фотографія точки відбору проб з тієї ж глибини, що й пробки керна, позначеної круглими отворами в перерізах керна (Laminaria-2).

Всього було відібрано 117 зразків у межах інтервалів, наведених у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Характеристика зібраних зразків у кернових інтервалах свердловин Laminaria-2 та Laminaria-4.

Назва свердловини	Зібрані зразки	Глибина (м)	
		від	до
Laminaria-2			
Cores 1 to 3	57	3208.42	3324.17
Core 4	6	3358.80	3369.33
Laminaria-4	54	3221.14	3368.79

Глибини кернів наведені у метрах від рівня роторного столу (mRT), висота якого становила 22 м для Lam-2 і 30,5 м для Lam-4. Зсуви глибин були скориговані шляхом порівняння кернової гамма-каротажної кривої з глибинною гамма-кривою; встановлено, що зсуви досягають 4 м. Подальший аналіз використовує вже скориговані глибини.

3.3 Кількісні мінералогічні методи

У цьому дослідженні застосовано кілька мінералогічних методів, зокрема рентгенівську дифракцію (XRD), рентгенівську флуоресценцію (XRF) та петрографічний аналіз тонких шліфів. Кожен метод має свої переваги, а результати доповнюють і перевіряють один одного.

Частину кожного зразка подрібнювали до порошку; один і той самий порошок використовували як для XRD, так і для XRF. Інша частина зразка відкладалася для виготовлення тонких шліфів і проведення рентгенівської томографії.

Рентгенівська дифракція застосовувалася для визначення складу глинистих та неглинистих мінералів і оцінки їх відносного вмісту. Порошковий метод дозволяє охопити більш репрезентативну частину зразка порівняно з тонким шліфом, що особливо важливо для гетерогенних порід і для порівняння з даними каротажів.

Додатково проводився детальніший аналіз глинистих мінералів у вибраних зразках. Фракцію <2 мкм відділяли шляхом відстоювання і аналізували окремо, що дозволило точніше визначити типи глин та їх пропорції.

XRF застосовували для перевірки узгодженості мінералогічних оцінок на основі хімічного складу. Оскільки XRF є високочутливим методом, він дозволяє визначати елементи навіть у малих концентраціях. Водночас XRD і XRF не дають інформації про текстуру, діагенез, просторовий розподіл мінералів і пористість, тому такі дані отримували з тонких шліфів.

РОЗДІЛ 4.

МІНЕРАЛОГІЯ ФОРМАЦІЇ PLOVER

Цей розділ присвячено вивченню мінералогічного складу резервуарної товщі формації Plover, розкритої у свердловинах Ламінарія. Дослідження виконано з використанням методів, описаних у попередньому розділі. Структурно розділ складається з трьох основних частин.

У першій частині наведено результати кількісного мінералогічного аналізу кернових зразків зі свердловини **Laminaria-2**, отримані методами рентгеноструктурного (XRD), рентгенофлуоресцентного (XRF) аналізу та петрофабричного вивчення.

Друга частина присвячена мінералогічній характеристиці свердловини **Laminaria-4**, з аналогічною логікою викладу.

У завершальній частині розглянуто порівняння глинистої компоненти між свердловинами.

4.1. Свердловина LAMINARIA-2

4.1.1. Результати XRD-аналізу та обробки в Siroquant

Як було зазначено у розділі 2, визначення індивідуальних мінеральних фаз у зразках свердловини Laminaria-2 виконували за порошковими дифрактограмами XRD із використанням програмного комплексу X-Plot, базованого на картотеці порошкових дифракцій ICDD.

Мінеральний склад кернових зразків Lam-2 характеризується домінуванням **кварцу**, який присутній по всій дослідженій товщі. У більшості зразків ідентифіковано також **каолініт** і **пірит**. У низці інтервалів присутні **ілліт** і змішано-шаруватий **ілліт-сметтит**. Мусковіт, кальцит і рутил трапляються лише в окремих випадках, так само як мікроклін та гоязит, зафіксовані у поодиноких зразках. Типові дифрактограми наведено на рисунку 3.1.

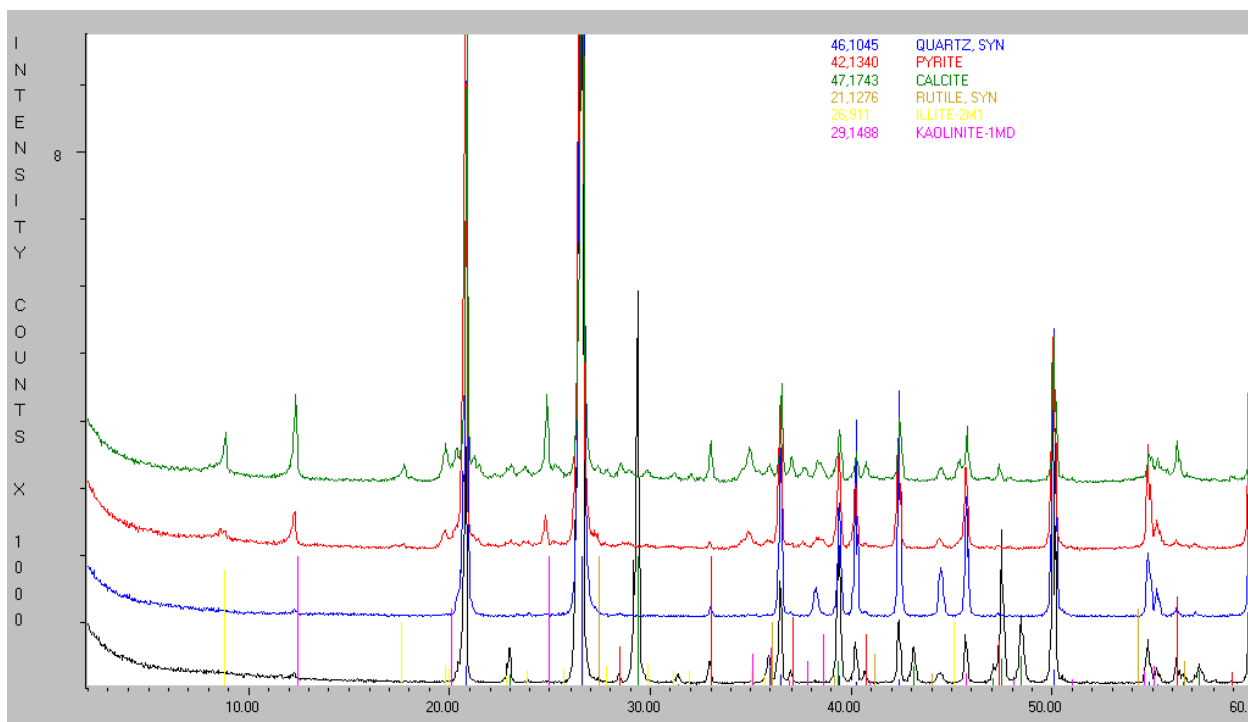


Рис 3.1 Типові рентгенівські дифрактограми зразків формації Плавер з Ламінарії-2. Кут 2θ збільшується зліва направо по горизонтальній шкалі. Інтенсивність дифракційного піку над фоном визначається вертикальною шкалою та стрижневим малюнком кожної мінеральної фази.

Кількісне визначення мінеральних фаз виконано методом Ритвельда в програмному середовищі **Siroquant**. Підсумкові результати кожного аналізу представлені у *.tsk файлах після досягнення найкращої відповідності між експериментальним та розрахованим дифрактограмами. Якість апроксимації характеризується глобальним параметром χ^2 , який у дослідженні змінюється від 4 до 10 (переважно близько 7).

Кількісні пропорції мінералів наведено в таблиці 3.1. У дужках зазначено оцінку похибки (у вагових %), яку для повного значення похибки слід помножити на $\sqrt{(\chi^2)}$.

Таблиця 3.1 Мінералогія зразків Laminaria-2, визначена за допомогою XRD та Siroquant. Значення похибки (e.s.d.) наведено в дужках.

Depth m	Lithology	Quartz %	Kaolinite %	Illite %	I-S %	Muscovite %	Microcline %	Calcite %	Rutile %	Pyrite %	Goyazite %	Total %	Global Chi ²
3208.65	sandstone	93.9 (1.0)	3.7 (1.0)							2.3 (0.5)		99.9	6.66
3208.95	sandstone	94.6 (1.9)	1.3 (0.9)		2.3 (1.7)					1.8 (0.4)		100.0	7.82
3209.55	sandstone	88.8 (1.6)	4.6 (0.8)	2.9 (1.5)						3.7 (0.4)		100.0	8.45
3209.85	shaly sandstone	77.9 (1.9)	9.2 (0.8)	4.6 (1.7)	3.2 (1.5)				0.4 (0.4)	4.7 (0.4)		100.0	7.21
3211.65	sandstone	93.9 (1.9)	2.6 (1.0)	2.5 (1.6)					0.5 (0.5)	0.6 (0.5)		100.1	7.76
3213.89	sandstone	91.8 (1.7)	2.4 (0.9)	5.1 (1.5)						0.7 (0.4)		100.0	9.70
3216.44	sandstone	94.9 (1.0)	3.3 (0.8)						0.8 (0.4)	0.9 (0.4)		99.9	7.75
3217.79	sandstone	95.3 (1.6)	2.0 (0.8)		2.0 (1.3)					0.7 (0.4)		100.0	8.05
3222.89	sandstone	96.7 (0.9)	1.1 (0.8)						0.6 (0.4)	1.6 (0.4)		100.0	6.77
3228.28	sandstone	97.4 (0.9)	1.0 (0.8)							1.6 (0.4)		100.0	6.16
3229.18	sandstone	72.3 (1.3)	0.9 (0.8)		1.0 (1.4)			21.9 (0.6)		3.9 (0.4)		100.0	7.03
3230.98	sandstone	97.2 (1.0)	1.3 (0.9)							1.5 (0.4)		100.0	6.67
3232.18	sandstone	94.1 (0.8)	2.0 (0.7)						0.5 (0.3)	3.4 (0.3)		100.0	6.31
3232.48	sandstone	93.4 (1.9)	1.8 (0.8)	2.6 (1.7)						2.1 (0.4)		99.9	6.89
3233.23	sandstone	93.6 (1.0)	3.4 (0.9)							3.0 (0.4)		100.0	7.49
3234.88	sandstone	94.3 (1.8)	1.9 (0.9)		3.8 (1.7)							100.0	8.36
3235.18	sandstone	95.6 (0.8)	1.5 (0.8)							2.9 (0.4)		100.0	6.33
3237.28	sandstone	96.4 (1.6)	1.4 (0.9)	2.2 (1.4)								100.0	7.96
3239.68	shaly sandstone	76.1 (2.3)	10.3 (0.9)	4.7 (2.0)	3.8 (1.8)				0.3 (0.4)	4.8 (0.4)		100.0	7.81
3241.63	sandstone	83.3 (1.2)	7.4 (0.7)	8.9 (1.2)					0.4 (0.3)			100.0	7.57
3244.62	sandstone	91.8 (1.6)	2.2 (0.8)	3.6 (1.4)						1.7 (0.4)	0.6 (0.5)	99.9	7.53
3245.82	sandstone	98.6 (0.5)	0.2 (0.4)							1.3 (0.3)		100.1	7.51
3247.62	sandstone	96.2 (0.7)	1.2 (0.6)							2.6 (0.3)		100.0	5.06
3250.62	sandstone	92.7 (1.1)	0.6 (0.9)					5.7 (0.5)		0.9 (0.4)		99.9	7.97
3253.02	sandstone	96.4 (1.4)	1.0 (1.3)							2.6 (0.6)		100.0	7.13
3256.62	siltstone	96.4 (1.0)	3.1 (0.9)							0.5 (0.4)		100.0	7.76
3257.37	shaly sandstone	62.9 (1.1)	15.3 (0.5)	10.4 (1.0)	1.4 (0.6)	7.6 (0.9)				2.5 (0.3)		100.1	7.60
3258.71	sandstone	83.4 (1.1)	1.4 (0.7)	1.5 (1.0)						13.8 (0.3)		100.1	9.24
3260.81	sandstone	88.7 (1.0)	1.5 (1.0)							9.8 (0.5)		100.0	5.97
3261.71	sandstone	84.9 (1.6)	2.1 (0.9)	2.8 (1.6)						10.2 (0.4)		100.0	8.74
3264.41	sandstone	90.3 (1.6)	0.8 (0.8)		3.4 (1.5)				0.2 (0.4)	5.3 (0.4)		100.0	7.77
3267.11	sandstone	96.9 (1.2)	2.0 (1.0)							1.1 (0.5)		100.0	8.43

I-S=interstratified illite-smectite

Таблиця 3.1 (продовження) Мінералогія зразків Laminaria-2, визначена за допомогою XRD та Siroquant. Значення похибки (e.s.d.) наведено в дужках.

Depth m	Lithology	Quartz %	Kaolinite %	Illite %	I-S %	Muscovite %	Microcline %	Calcite %	Rutile %	Pyrite %	Goyazit %	Total %	Global Chi ²
3268.61	sandstone	83.8 (1.6)	7.6 (0.8)		4.9 (1.5)				0.4 (0.4)	3.3 (0.4)		100.0	8.02
3269.21	sandstone	86.5 (1.2)	7.1 (0.6)	1.4 (0.8)			3.6 (0.8)		1.3 (0.3)			99.9	6.73
3271.46	sandstone	91.6 (1.6)	3.1 (0.8)	3.6 (1.5)						1.6 (0.4)		99.9	8.29
3272.96	sandstone	86.5 (1.2)	7.8 (0.6)	4.2 (1.1)					0.6 (0.3)	0.9 (0.3)		100.0	6.45
3275.05	sandstone	91.9 (0.9)	4.6 (0.4)			1.8 (0.7)			1.1 (0.2)	0.7 (0.2)		100.1	6.00
3277.45	sandstone	88.6 (1.3)	8.2 (0.7)			1.6 (1.2)				1.7 (0.3)		100.1	7.12
3280.45	shale	44.2 (0.7)	20.9 (0.5)	22.5 (0.8)		6.6 (0.9)			0.6 (0.2)	5.2 (0.2)		100.0	9.21
3280.60	shaly sandstone	69.8 (1.5)	13.8 (0.7)	11.4 (1.3)		2.8 (1.3)			0.4 (0.3)	1.8 (0.3)		100.0	7.81
3281.95	sandstone	91.7 (1.5)	4.8 (0.7)	2.4 (1.3)						1.2 (0.3)		100.1	7.71
3283.75	sandstone	94.9 (1.2)	1.3 (1.0)					1.6 (0.6)	0.6 (0.4)	1.7 (0.4)		100.1	10.34
3284.05	sandstone	86.3 (1.3)	2.0 (1.2)					2.5 (0.7)		9.3 (0.5)		100.1	7.34
3286.30	sandstone	98.3 (0.7)	0.8 (0.6)							0.9 (0.3)		100.0	7.05
3289.59	sandstone	98.3 (1.1)	0.6 (0.9)					0.1 (0.5)		1.0 (0.4)		100.0	6.95
3292.74	sandstone	98.6 (0.3)								1.4 (0.3)		100.0	6.66
3297.09	sandstone	95.9 (0.9)	1.5 (0.8)						0.5 (0.6)	2.1 (0.4)		100.0	6.84
3300.24	sandstone	91.9 (0.7)						6.4 (0.5)		1.7 (0.4)		100.0	7.55
3302.04	sandy shale	72.2 (2.4)	9.8 (0.7)	6.1 (1.9)	6.4 (2.0)	1.1 (1.2)				4.3 (0.3)		99.9	7.35
3305.78	shale	58.7 (0.9)	11.3 (0.5)	13.9 (0.9)	1.0 (0.5)	10.9 (0.8)				4.3 (0.2)		100.1	7.60
3307.13	siltstone	86.9 (1.5)	6.9 (0.8)			4.2 (1.4)				2.0 (0.4)		100.0	7.66
3310.28	sandstone	90.5 (1.4)	4.0 (0.7)	5.1 (1.2)					0.4 (0.3)			100.0	8.08
3312.08	sandstone	93.4 (1.8)	3.1 (0.9)	3.5 (1.6)								100.0	8.03
3313.58	shaly siltstone	59.9 (1.7)	11.6 (0.6)	11.9 (1.7)	5.9 (1.8)	9.6 (0.9)			1.0 (0.2)			99.9	7.92
3315.83	sandstone	98.2 (1.1)	1.1 (1.0)							0.6 (0.5)		99.9	8.00
3317.48	sandstone	78.7 (1.3)	0.9 (0.8)	1.7 (1.4)						18.7 (0.4)		100.0	4.96
3320.78	sandstone	98.3 (1.2)	1.2 (1.1)							0.5 (0.5)		100.0	8.38
3322.13	sandstone	96.3 (0.8)	1.2 (0.7)						0.4 (0.3)	2.1 (0.3)		100.0	6.72
3359.30	sandstone	93.4 (1.2)	1.2 (0.9)							5.4 (0.4)		100.0	7.86
3361.55	sandstone	93.8 (1.2)	2.5 (1.0)						0.4 (0.5)	3.3 (0.5)		100.0	7.09
3364.55	sandstone	89.9 (2.7)	1.9 (0.9)	3.6 (2.0)	1.6 (1.8)					3.0 (0.4)		100.0	9.80
3366.50	sandstone	92.6 (1.2)	2.0 (0.6)		2.4 (1.0)					3.0 (0.3)		100.0	6.55
3367.40	sandstone	94.9 (0.9)	2.8 (0.8)						0.5 (0.4)	1.8 (0.4)		100.0	7.71
3369.20	sandstone	93.6 (1.2)	2.0 (0.6)		3.3 (1.0)				0.4 (0.3)	0.7 (0.3)		100.0	7.07

I-S=interstratified illite-smectite

Результати підтверджують, що **кварц є домінуючою фазою**, його вміст варіює від **98,6 %** у пісковиках до **44,2 %** у глинистих різновидах. **Сумарний вміст глинистих мінералів** коливається від **43,4 % до 0,2 %**.

Основною глиною є **каолініт**, присутній майже у всіх зразках. Вміст **ілітових мінералів (іліт, ІС-змішаношаруватість, слюда)** зростає паралельно зі збільшенням каолініту – важливий фактор для подальшої оцінки об’єму глин за гамма-каротажем.

У кількох зразках наявний **мусковіт**, відмінний різко вираженими піками; його кількість становить 1,1–10,9 %. **Кальцит** присутній у небагатьох зразках у кількостях до 21,9 %. Вміст **піриту** – від 0,5 до 18,7 %. **Рутил** трапляється до 1,1 %. **Мікроклін** і **гоязит** зафіксовано по одному разу у кількостях 3,6 % та 0,6 % відповідно.

Для мінералів, визначених у низьких концентраціях (<1 %), похибка часто є співмірною або більшою за значення (наприклад, $0,4 \pm 0,5$), що відображає межу чутливості методу Ритвельда. Такі фази залишено в результатах, щоб не виключати їх потенційної присутності.

4.1.2. Результати XRF-аналізу та втрати при прожарюванні (LOI)

Вибрані **кернові зразки** проаналізовано методом рентгенофлуоресцентної спектрометрії (XRF) та визначенням втрат при прожарюванні (LOI). Результати наведено в таблиці 3.2.

Вміст елементів подано у вигляді відповідних оксидів. Загальна сума масових часток (total) розраховувалась за формулою:

$$\text{total} = (\text{сума оксидів} + \text{LOI}) - \text{SO}_3,$$

оскільки певні форми сірки також випаровуються під час прожарювання, і їх необхідно виключати.

У двох зразках (3229,18 м та 3250,62 м) сумарний вміст оксидів та LOI не потрапляє у нормативний інтервал 99–101 %. Обидва зразки містять кальцит, і відхилення, ймовірно, пов’язане з реакцією кальциту та піриту під

час прожарювання – частина сірки зв'язується у вигляді гіпсу замість втрати при високій температурі, що знижує LOI та завищує SO₃.

Таблиця 3.2 Хімічний склад вибраних зразків Laminaria-2, визначений за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізу.

Depth m	Lithology	SiO ₂ %	K ₂ O %	Na ₂ O %	CaO %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	MgO %	MnO %	SO ₃ %	LOI* %	Total %
3209.55	sandstone	89.19	0.44	0.25	0.01	2.26	3.77	0.17	0.04	0.16		6.01	3.05	99.33
3211.65	sandstone	93.63	0.37	0.29		1.58	1.03	0.24	0.03	0.15		1.69	1.12	98.44
3216.44	sandstone	94.45	0.32	0.25	0.05	1.18	1.26	0.12	0.06	0.15		2.23	1.21	99.05
3228.28	sandstone	95.32	0.12	0.32	0.01	0.49	2.02	0.04	0.04	0.13		4.00	1.46	99.94
3229.18	sandstone	72.16	0.18	0.28	11.83	0.46	3.22	0.07	0.03	0.28	0.07	5.22	7.27	95.85
3232.48	sandstone	92.62	0.26	0.50	0.04	0.87	2.67	0.10	0.04	0.13		5.13	1.96	99.18
3234.88	sandstone	92.86	0.50	0.26	0.11	2.70	1.11	0.18	0.04	0.15	0.01	1.85	1.72	99.63
3239.68	shaly sandstone	77.83	1.13	0.27	0.06	7.19	4.40	0.54	0.05	0.30	0.01	6.36	8.33	100.10
3241.63	sandstone	82.96	1.22	0.26	0.03	7.18	2.35	0.54	0.05	0.27	0.01	3.63	4.46	99.33
3250.62	sandstone	79.36	0.07	0.29	7.65	0.37	3.79	0.04	0.03	0.22	0.07	5.96	5.62	97.51
3256.62	siltstone	95.98	0.20	0.35	0.01	1.19	0.84	0.11	0.03	0.16		1.51	1.00	99.87
3258.71	siltstone	86.32	0.28	0.72	0.23	0.94	6.82	0.06	0.20	0.19		9.29	4.12	99.88
3272.96	sandstone	87.52	0.79	0.38	0.02	5.15	1.18	0.36	0.04	0.21		1.80	2.86	98.51
3280.45	shale	64.85	2.42	0.28	0.10	14.25	5.99	0.92	0.06	0.43	0.01	6.54	10.24	99.55
3284.05	sandstone	80.29	0.18	0.42	1.50	0.65	10.34	0.09	0.03	0.15	0.02	10.19	6.01	99.68
3302.04	sandy shale	76.08	1.47	0.35	0.09	8.41	4.29	0.66	0.05	0.37	0.01	6.22	8.00	99.78
3305.78	shale	73.65	2.21	0.45	0.07	12.41	3.06	1.00	0.06	0.52	0.01	3.78	7.62	101.05
3313.58	shaly siltstone	72.08	2.16	0.44	0.06	11.55	1.20	0.84	0.05	0.47	0.01	0.92	10.97	99.82
3364.55	sandstone	88.72	0.47	0.44	0.02	1.70	4.82	0.10	0.03	0.15	0.01	8.07	3.10	99.56

*LOI = loss on ignition

XRF показує, що **силіцій (SiO₂)** є домінантним оксидом і становить до **95,98 %**, що відповідає високому вмісту кварцу.

Алюміній, залізо та сірка є наступними за кількістю компонентами.

- **Al₂O₃ = 0,37–14,25 %**, переважно у складі глинистих мінералів.
- **Fe₂O₃ = до 10,34 %**, пов'язаний із глинами, піритом та можливо аморфними оксидами.
- **SO₃ = 0,92–10,19 %**, що відповідає вмісту піриту.
- **LOI = 1–10,97 %**, що відображає дегідратацію глини, розклад органіки, карбонатів та леткі складові.

4.1.3. Порівняння результатів Siroquant та XRF

Окрім прямої оцінки хімічного складу, XRF використовували як незалежну перевірку правильності кількісної мінералогії Siroquant. Для

кожного зразка хімічний склад був розрахований із врахуванням стехіометрії ідеальних мінералів (Ward et al., 1999).

Отриманий “розрахунковий хімічний склад” порівнювали з фактичним XRF-аналізом. Результати подано в таблиці 3.3 та графіках (рис. 3.2).

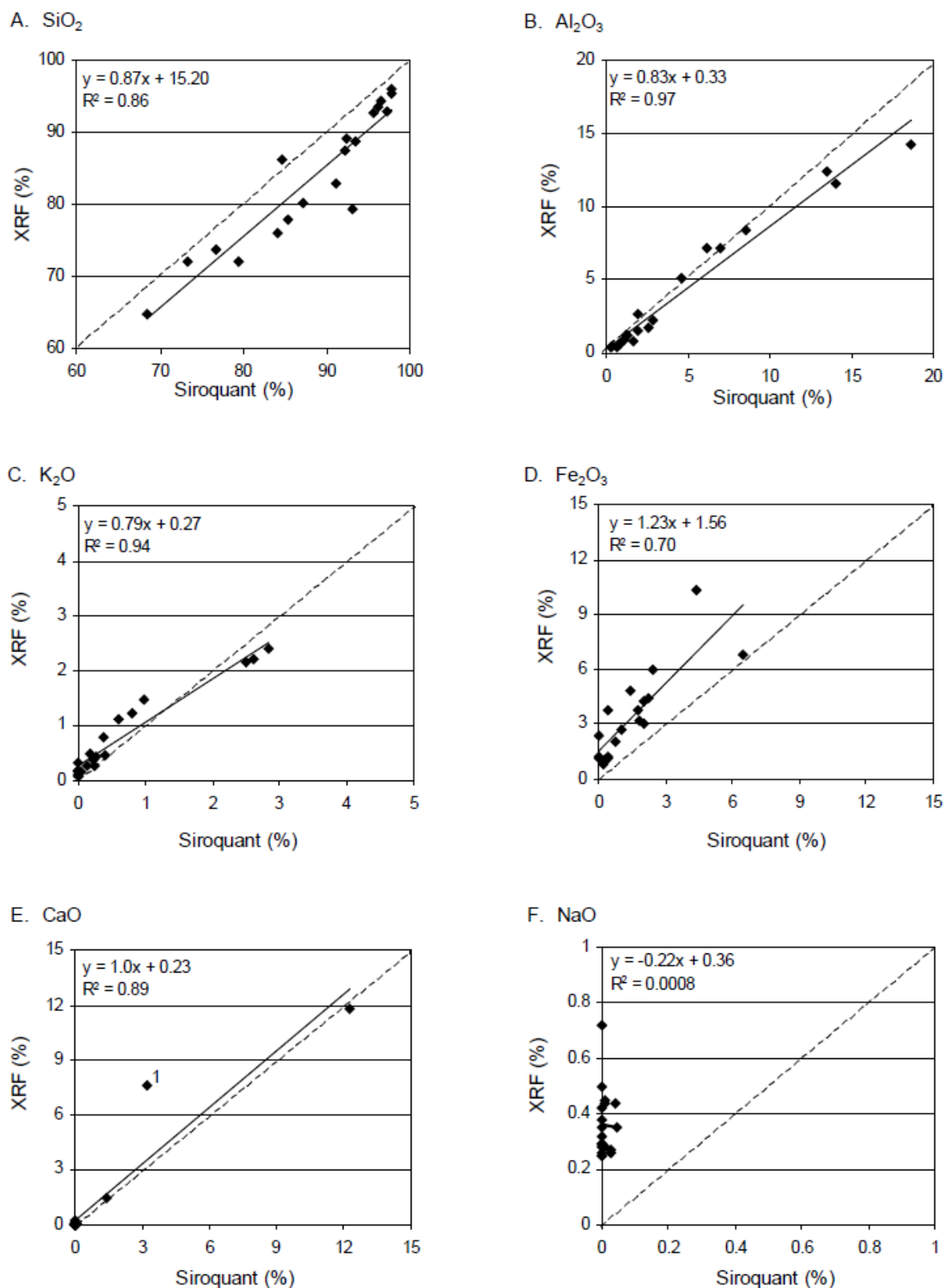


Рисунок 3.2 Порівняння розрахункового хімічного складу зразків Laminaria-2, розрахованого за даними Siroquant, з фактичним хімічним складом гірських порід, визначеним за допомогою рентгенофлуоресценції (XRF).

Таблиця 3.3. Визначений хімічний склад вибраних зразків Laminaria-2, розрахований за даними Siroquant

Depth m	Lithology	SiO ₂ %	K ₂ O %	Na ₂ O %	CaO %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	MgO %	H ₂ O %	CO ₂ %	H ₂ O+CO %	S %
3209.55	sandstone	92.40	0.26			2.86	1.73			0.78		0.78	1.97
3211.65	sandstone	96.27	0.23			1.93	0.28	0.50		0.48		0.48	0.32
3216.44	sandstone	96.53				1.30	0.42	0.80		0.46		0.46	0.48
3228.28	sandstone	97.87				0.40	0.75			0.14		0.14	0.85
3229.18	sandstone	73.28	0.05	0.01	12.27	0.67	1.82		0.01	0.17	9.64	9.81	2.08
3232.48	sandstone	95.64	0.24			1.65	0.98			0.37		0.37	1.12
3234.88	sandstone	97.33	0.17	0.03	0.02	1.96			0.03	0.45		0.45	
3239.68	shaly sandstone	85.39	0.60	0.03	0.02	6.98	2.24	0.30	0.03	1.85		1.85	2.56
3241.63	sandstone	91.21	0.81			6.13	0.00	0.40		1.45		1.45	
3250.62	sandstone	93.07			3.20	0.24	0.42			0.08	2.51	2.59	0.48
3256.62	siltstone	97.84				1.22	0.23			0.43		0.43	0.27
3258.71	siltstone	84.72	0.14			1.09	6.44			0.27		0.27	7.35
3272.96	sandstone	92.24	0.38			4.60	0.42	0.60		1.29		1.29	0.48
3280.45	shale	68.41	2.83			18.64	2.44	0.60		4.30		4.30	2.78
3284.05	sandstone	87.14			1.40	0.79	4.34			0.28	1.10	1.38	4.95
3302.04	sandy shale	84.05	0.98	0.04	0.04	8.50	2.01		0.06	2.02		2.02	2.30
3305.78	shale	76.74	2.60	0.01	0.01	13.51	2.02		0.01	2.81		2.81	2.30
3313.58	shaly siltstone	79.37	2.49	0.04	0.04	14.06		1.01	0.05	2.94		2.94	
3364.55	sandstone	93.49	0.40	0.01	0.01	2.56	1.40		0.01	0.51		0.51	1.60

Силіцій (SiO₂)

Кореляція добра ($R^2 = 0.86$). Лінія регресії лежить нижче лінії рівності, що вказує на **незначне переоцінювання кварцу методом Siroquant** – ймовірно, через недооцінку глин (ефект преференційної орієнтації).

Алюміній (Al₂O₃)

Кореляція дуже висока ($R^2 \approx 0.97$). Лінія майже збігається з діагоналлю. Невеликі відхилення у бік завищення можуть бути пов'язані з неврахованим заміщенням Fe та Mg у структурі глин.

Калій (K₂O)

Також показано високу кореляцію ($R^2 \approx 0.94$). Невеликі розбіжності пояснюються низьким вмістом іллітових мінералів (менше 10 %), чиї широкі XRD-піки важко точно кількісно описати.

Залізо (Fe_2O_3)

Метод Siroquant недооцінює Fe_2O_3 ($R^2 = 0.70$), що може свідчити про наявність заліза в глинистих структурах або аморфних фазах, невидимих для XRD.

Кальцій (CaO)

Загальна кореляція добра ($R^2 = 0.89$). Розбіжність у зразку з високим кальцитом пояснюється нерівномірністю текстурного поширення кальциту.

Na_2O , MgO , TiO_2

Кореляції практично немає ($R^2 \approx 0.0$ – 0.2) через дуже низький вміст цих компонентів та високу відносну похибку.

LOI

Загалом дані LOI вищі за розрахункові з Siroquant, що очікувано – Siroquant враховує лише OH і CO_2 , тоді як LOI фіксує додаткові леткі компоненти (органіку, S, Cl).

Зразок із високим кальцитом ($\approx 21,9$ %) демонструє LOI, близьке до розрахункового, що відображає реакції між піритом і кальцитом під час прожарювання.

Аналіз вмісту сірки

Окремий елементний аналіз дав можливість перевірити узгодженість визначень SO_3 із XRF і оцінки сірки за мінералогічними даними Siroquant, а також виявити можливі інші форми S (наприклад, сульфати), не представлені у мінеральній моделі.

4.2 LAMINARIA-4

Мінералогічні методики, застосовані для зразків свердловини Lam-2, були використані таким самим чином і для Lam-4. Це дозволило порівняти дві свердловини та перевірити, чи можуть висновки, отримані для Lam-2, бути використані як прогностичні для інших свердловин району. Результати обох свердловин інтерпретовані та подані однаковим способом.

4.2.1 Дифрактометрія XRD та аналіз Siroquant

Основними мінеральними компонентами формації Пловєр у кернових інтервалах Lam-4 є кварц, пірит і каолініт. Іліт, мусковіт, рутил і мікроклін виявлені в окремих зразках. Альбіт та анатаз присутні лише в 1–2 зразках. Типові рентгенофазові дифрактограми наведено на рисунку 3.12.

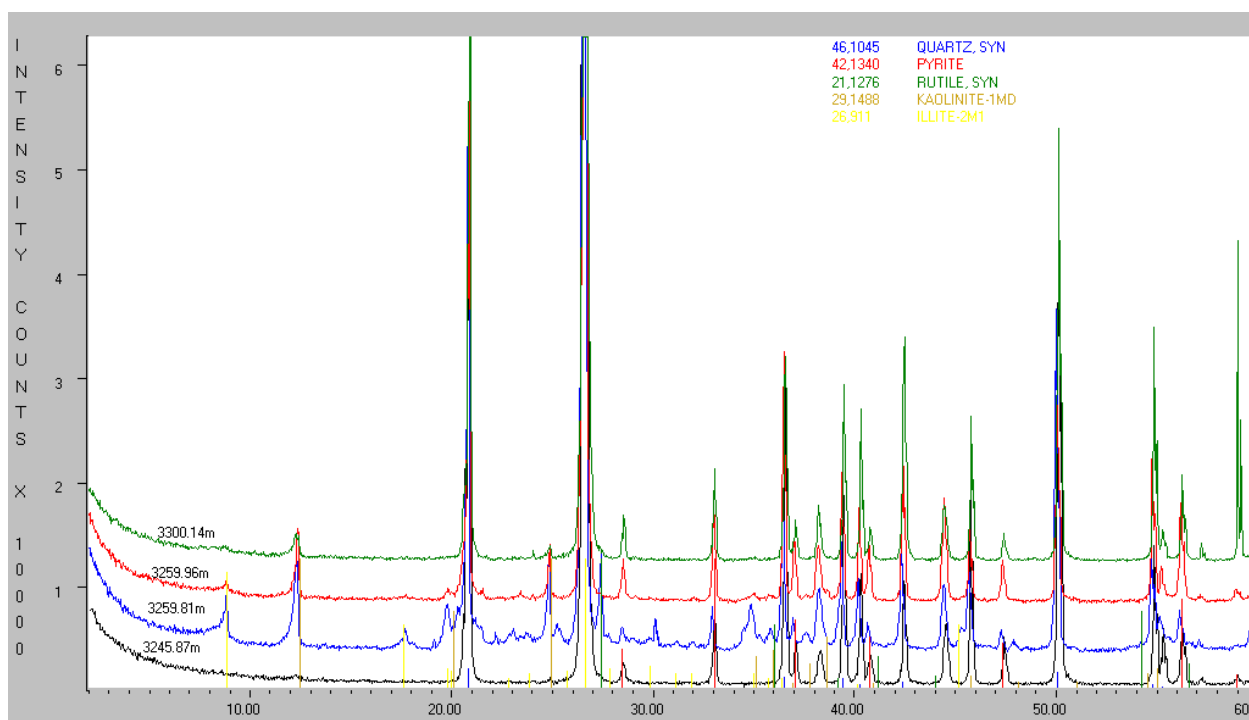


Рис. 5.12 Типові діаграми рентгенівської дифракції зразків формації Плавєр з Ламінарії-4. Кут 2θ збільшується зліва направо по горизонтальній шкалі. Інтенсивність дифракційного піку над фоном визначається вертикальною шкалою та стрижнеподібним малюнком кожної мінеральної фази.

Пропорції окремих мінералів, визначені за Siroquant для зразків Lam-4, наведено в таблиці 3.7. Кварц знову є домінантним мінералом (до 98,6%). Каолініт варіює від слідових кількостей до 21,5%, а іліт – до 57,3%. У декількох зразках присутній мусковіт у невеликих пропорціях. Вміст іліту також збільшується зі збільшенням кількості каолініту, що подібно до результатів Lam-2 (обговорюється наприкінці розділу).

Пірит визначений у більшості зразків (0,3–29,7%). Польові шпати, присутні в декількох зразках, представлені альбітом і мікрокліном. Рутил також виявлено у кількості до 2,1%.

У таблиці 3.7 наведено мінерали, похибка визначення яких дорівнює або перевищує їх фактичну кількість. Ці мінерали, якщо й присутні, імовірно перебувають у кількостях нижче межі виявлення Siroquant, але були включені в аналіз, щоб уникнути пропуску їх можливого існування.

4.2.2 Аналіз XRF і втрати при прожарюванні (LOI)

Концентрації елементів, визначені методом XRF, наведено в таблиці 3.8. Аналіз проводили на прокалених зразках, а загальний вміст елементів у перерахунку на оксиди було скориговано з урахуванням значень LOI.

Діоксид кремнію є домінантним оксидом (до 95,74%), що відповідає високому вмісту кварцу. Глинозем і залізо є наступними за кількістю компонентами. Втрата при прожарюванні (LOI) зумовлена випаровуванням зв'язаної води в структурах глинистих мінералів, органічної речовини, а також деяких форм сірки та хлору. Для Lam-4 очікувалась підвищена LOI через наявність залишків нафти, які випаровуються при прокаленні. Значення LOI сягають 14,69%.

4.2.3 Порівняння результатів Siroquant та XRF

Концентрації елементів і LOI для Lam-4 порівняли з хімічним складом, розрахованим на основі Siroquant, щоб оцінити узгодженість кількісного XRD-аналізу. Хімічний склад кожного мінералу, визначений Siroquant, був розрахований за ідеальними стехіометричними формулами так само, як для Lam-2 (таблиця 3.9). Дані були накреслені у перехресних графіках і проаналізовані методом лінійної регресії.

Таблиця 3.7 Мінералогія зразків Laminaria-4, визначена за допомогою XRD та Siroquant. Значення похибки (e.s.d.) наведено в дужках.

Depth m	Lithology	Quartz %	Kaolinite %	Illite %	Muscovite %	Albite %	Microcline %	Rutile %	Anatase %	Pyrite %	Total %	Global Chi ²
3227.13	sandstone	92.8(1.3)	5.4(1.3)					0.2(0.4)		1.6(0.4)	100.0	9.04
3230.88	sandstone	96.8(1.2)	2.0(1.0)					0.2(0.5)		1.0(0.5)	100.0	8.38
3232.08	sandstone	98.3(1.3)	0.8(1.1)					0.2(0.5)		0.7(0.5)	100.0	9.53
3234.93	sandstone	97.5(1.3)	1.0(1.1)					0.2(0.5)		1.4(0.5)	100.1	7.84
3241.07	sandstone	96.5(1.3)	1.0(0.9)	0.6(0.6)						1.9(0.4)	100.0	8.91
3245.87	sandstone	93.1(1.2)	0.7(1.0)					0.2(0.5)		5.9(0.5)	99.9	7.18
3248.72	shale	6.8(0.3)	5.8(0.1)	57.3(0.7)	8.9(8.9)					21.2(0.4)	100.0	7.22
3250.67	sandstone	92.2(1.1)	1.6(1.1)							6.1(0.5)	99.9	8.18
3251.72	shaly sandstone	59.5(1.4)	5.1(1.0)	5.6(1.9)					0.2(0.4)	29.7(0.8)	100.1	6.97
3252.77	sandstone	96.6(1.9)	1.3(1.2)				1.4(1.4)			0.8(0.6)	100.1	10.19
3254.56	shaly sandstone	81.6(1.4)	10.1(0.7)	5.6(1.3)				0.2(0.4)		2.5(0.4)	100.0	10.65
3256.81	shaly sandstone	76.0(1.6)	10.4(0.8)	7.2(1.5)			3.2(1.0)			3.2(0.4)	100.0	7.60
3257.56	sandstone	98.5(0.6)	0.1(0.2)							1.4(0.6)	100.0	13.63
3259.81	shaly sandstone	61.4(0.9)	15.6(0.6)	17.9(1.0)				2.1(0.3)		3.0(0.3)	100.0	7.87
3259.96	sandstone	80.2(1.8)	9.8(0.8)	1.0(1.6)			0.3(1.1)			8.8(0.4)	100.1	8.68
3260.26	sandstone	96.3(2.5)	0.6(1.5)				2.6(1.9)			0.5(0.7)	100.0	10.90
3263.71	sandstone	97.2(1.1)	1.5(0.9)					0.2(0.4)		1.1(0.4)	100.0	7.61
3265.36	sandstone	97.2(1.1)	1.6(0.9)					0.3(0.4)		0.9(0.4)	100.0	7.91
3266.56	shale	60.4(0.8)	18.4(0.5)	10.3(0.8)	8.3(0.7)					2.6(0.2)	100.0	7.19
3268.51	sandstone	94.5(0.8)	3.2(0.7)							2.3(0.3)	100.0	8.70
3271.80	sandstone	95.2(1.2)	3.7(1.1)							1.1(0.5)	100.0	11.40
3274.05	sandstone	94.6(1.0)	4.5(0.9)					0.5(0.4)		0.4(0.4)	100.0	9.70
3274.65	sandstone	80.7(1.2)	12.2(0.7)		3.4(1.2)			1.2(0.3)		2.5(0.3)	100.0	8.48
3282.15	sandstone	97.6(1.1)	1.9(1.0)							0.5(0.5)	100.0	8.92
3286.19	sandstone	95.8(1.0)	2.2(0.8)					0.2(0.4)		1.8(0.4)	100.0	7.78
3286.94	sandstone	88.3(1.1)	3.4(1.0)					0.2(0.5)		8.1(0.5)	100.0	9.82
3288.44	shaly sandstone	74.4(1.5)	14.1(0.6)	7.5(1.7)						4.0(0.3)	100.0	8.70
3290.09	shaly sandstone	49.3(1.4)	20.9(1.2)	19.0(1.7)	8.2(1.1)			0.6(0.3)		2.0(0.3)	100.0	9.68

Таблиця 3.7 (продовження) Мінералогія зразків Laminaria-4, визначена за допомогою XRD та Siroquant. Значення похибки (e.s.d.) наведено в дужках.

Depth m	Lithology	Quartz %	Kaolinite %	Illite %	Muscovite %	Albite %	Microcline %	Rutile %	Anatase %	Pyrite %	Total %	Global Chi ²
3291.14	sandstone	89.7(1.3)	8.4(1.0)	1.7(0.8)						0.3(0.4)	100.1	8.31
3295.04	shaly sandstone	73.4(1.4)	13.7(1.0)	1.4(1.2)	6.6(1.0)			1.1(0.3)		3.7(0.3)	99.9	12.67
3295.94	sandstone	90.6(1.3)	7.8(1.0)	1.2(0.9)				0.4(0.3)			100.0	12.09
3299.09	sandstone	93.6(0.9)	5.5(0.8)					0.5(0.4)		0.5(0.4)	100.1	11.83
3300.14	sandstone	90.8(2.0)	2.4(1.0)	2.6(1.8)						4.3(0.5)	100.1	11.38
3305.68	sandstone	95.7(1.3)	1.2(0.8)			2.0(1.0)				1.1(0.4)	100.0	8.54
3307.63	sandstone	98.6(1.3)	0.3(1.1)					0.4(0.5)		0.7(0.5)	100.0	8.86
3311.53	sandstone	98.1(1.5)	0.1(1.2)					0.1(0.6)		1.6(0.6)	99.9	12.21
3315.73	sandstone	95.6(0.8)	1.7(0.7)					0.2(0.3)		2.5(0.3)	100.0	7.57
3317.37	shale	58.1(0.6)	21.5(0.4)	14.8(0.7)				0.3(0.2)		5.3(0.2)	100.0	6.64
3322.62	shale	75.2(1.1)	7.3(0.6)	14.7(1.0)					0.3(0.2)	2.4(0.3)	99.9	6.62
3325.92	sandstone	96.2(1.1)	2.5(1.0)					0.2(0.4)		1.1(0.4)	100.0	7.35
3329.67	sandstone	98.5(1.9)	0.9(1.1)				0.4(1.5)				99.8	8.96
3332.36	shale	67.6(1.0)	11.5(0.6)	14.3(1.1)	0.2(0.3)			0.6(0.3)		5.8(0.3)	100.0	7.62
3335.36	sandstone	96.8(1.3)	1.4(1.1)					0.3(0.5)		1.5(0.5)	100.0	13.90
3337.61	sandstone	93.8(1.1)	2.0(1.0)					0.2(0.5)		4.0(0.4)	100.0	7.80
3340.61	shaly sandstone	72.4(1.7)	3.2(0.7)	22.2(1.6)			2.2(0.7)				100.0	13.33
3344.36	sandstone	96.6(1.7)	1.5(1.1)	1.0(1.1)				0.3(0.5)		0.7(0.5)	100.1	9.35
3346.16	shale	45.0(0.6)	20.3(0.4)	20.3(0.7)	10.0(0.7)			0.4(0.2)		4.0(0.2)	100.0	9.29
3347.20	sandstone	94.7(1.4)	3.2(0.7)	1.4(1.3)						0.7(0.3)	100.0	8.26
3349.15	sandstone	90.6(2.0)	2.7(0.8)	1.5(1.6)			2.5(1.1)			2.6(0.4)	99.9	8.43
3352.15	sandstone	93.8(1.9)	1.8(0.9)	0.6(1.7)				0.1(0.4)		3.7(0.4)	100.0	9.71
3358.15	sandstone	95.8(1.3)	1.5(1.2)					0.3(0.5)		2.4(0.5)	100.0	12.22
3362.19	sandstone	92.5(1.8)	1.7(0.8)	2.0(1.6)				0.2(0.4)		3.6(0.4)	100.0	6.36
3364.14	sandstone	88.3(1.8)	3.6(1.0)	5.2(1.5)				0.5(0.5)		2.3(0.5)	99.9	10.47
3366.24	sandstone	92.0(1.9)	3.1(0.9)	2.6(1.7)						2.3(0.4)	100.0	9.04

Таблиця 3.9. Визначений хімічний склад вибраних зразків Laminaria-4, розрахований за даними Siroquant.

Depth m	Lithology	SiO ₂ %	K ₂ O %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	H ₂ O %	S %
3248.72	shale	42.48	6.28	26.05	9.94		3.91	11.35
3251.72	shaly sandstone	64.62	0.51	4.03	13.86	0.20	0.97	15.81
3254.56	shaly sandstone	89.11	0.51	6.01	1.17	0.20	1.67	1.33
3256.81	shaly sandstone	86.52	1.19	7.29	1.49		1.79	1.71
3259.81	shaly sandstone	77.65	1.63	12.62	1.40	2.10	3.01	1.60
3260.26	sandstone	98.26	0.44	0.72	0.23		0.08	0.27
3266.56	shale	78.18	1.92	13.82	1.22		3.46	1.39
3274.65	sandstone	88.05	0.40	5.97	1.17	1.20	1.87	1.33
3286.94	sandstone	89.88		1.34	3.78	0.20	0.48	4.32
3288.44	shaly sandstone	84.72	0.68	8.27	1.87		2.32	2.13
3290.09	shaly sandstone	72.54	2.70	17.93	0.94	0.60	4.21	1.07
3295.04	shaly sandstone	83.80	0.91	8.17	1.73	1.10	2.31	1.98
3300.14	sandstone	93.13	0.24	1.88	2.01		0.46	2.29
3317.37	shale	75.53	1.34	13.83	2.48	0.30	3.70	2.82
3322.62	shale	86.06	1.34	8.19	1.12	0.30	1.70	1.28
3332.36	shale	80.23	1.32	9.77	2.71	0.60	2.28	3.09
3340.61	shaly sandstone	86.46	2.39	9.67			1.48	
3346.16	shale	69.48	3.04	18.78	1.88	0.40	4.28	2.14
3349.15	sandstone	94.32	0.56	2.07	1.22		0.45	1.39
3364.14	sandstone	92.68	0.47	3.30	1.08	0.50	0.75	1.23

Кремнезем (SiO₂)

Встановлено дуже високу кореляцію між Siroquant і XRF ($R^2 = 93\%$). Лінія регресії близька до лінії рівності. Легке завищення SiO₂ у Siroquant пояснюється впливом окремих зразків – особливо сильно аргілітизованого пісковика (точка 1), де хімічна неоднорідність призводить до різниці між методами.

Оксиди алюмінію та заліза

Для Al₂O₃ – дуже висока кореляція ($R^2 = 0.95$). Більшість точок лежить вище лінії рівності, що свідчить про ізоморфну заміну Al на Fe/Mg в іліті, яку не враховують формули Siroquant.

Для Fe₂O₃ – кореляція добра ($R^2 = 0.87$), але Siroquant недооцінює залізо. Частина заліза може бути в аморфних формах, які не виявляються XRD.

K₂O

Кореляція добра ($R^2 = 0.85$). Siroquant дещо завищує K₂O, можливо через зменшення ступеня ізоморфної заміни калію в структурах іліту порівняно з ідеальними формулами.

TiO₂

Точки сильно розсіяні (низький R^2), що пов'язано з дуже низькими концентраціями TiO₂ у зразках.

LOI

Значення LOI більші, ніж розраховані Siroquant H₂O, що очікувано, оскільки LOI включає випаровування сірки, хлору, органіки та залишків нафти.

4.2.4 Петрографічний аналіз (тонкі шліфи)

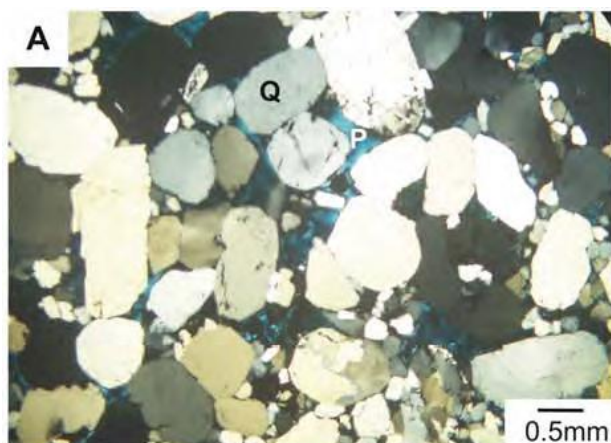
Петрографічні характеристики пісковиків формації Пловєр у Lam-4 загалом подібні до Lam-2, але без кальцитового цементу.

Зерна – від субокруглих до субкутових, розміром 0,2–1 мм, добре відсортовані. Переважають чисті зерна кварцу (рис. 3.14А). Місцями спостерігається залізисте забарвлення. Виявлено вторинні кварцові нарости: там, де в порах є глини, нарости слабкі або відсутні (рис. 3.14В,С); у деяких зразках цементация кварцом майже повністю перекриває поровий простір (рис. 3.14D).

Поровість міжзернова, але часто заповнена глинами, кварцовим цементом або піритом.

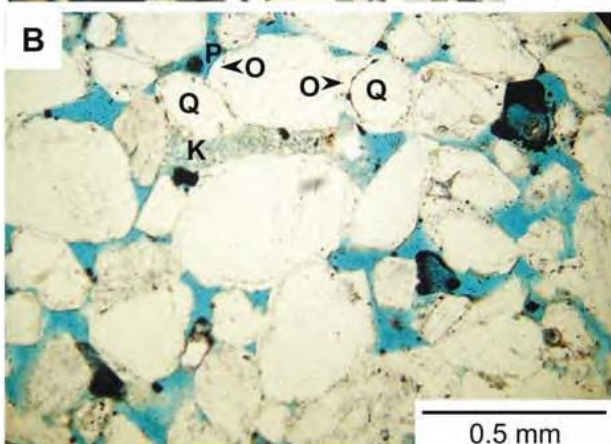
Результати підрахунку точок подано в таблиці 3.10.

Фреймворк утворений кварцом, слюдами, польовими шпатами, глауконітом, цирконом, апатитом і уламковим матеріалом. Матрикс – каолініт із домішками мусковіту, хлориту та чорних опаків (рис. 3.15).



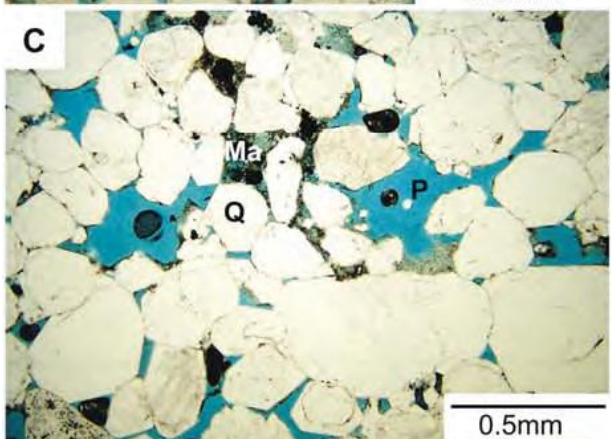
Quartz grains (Q) in varying size and shape. Grain shape ranges from sub-rounded to sub-angular. Pore spaces between the grains are shown in blue (P).

Lam-4 3245.87m, crossed polars



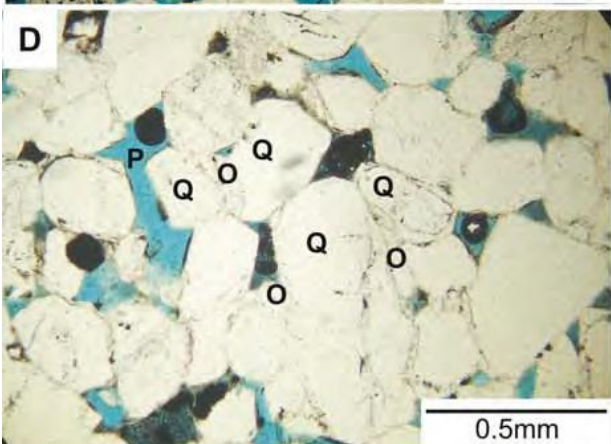
Quartz overgrowths (O) developing outward towards the pore spaces (P) and forming an interlocking structure of quartz grains (Q). Kaolinite between the quartz grains blocks the space for further secondary enlargement.

Lam-4 3260.26m, plane polars



A highly porous sandstone with quartz grains of variable degrees of overgrowth development, creating hexagonal crystal shape. Sub-rounded outline is retained along the edges of the grain in contact with the matrix (Ma) of clay and opaque minerals.

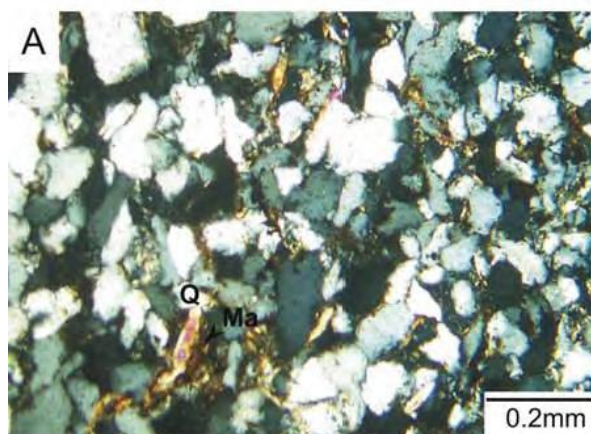
Lam-4 3259.96m, plane polars



Quartz overgrowths (O) formed interlocking structure of grains (Q), taking up the pore spaces.

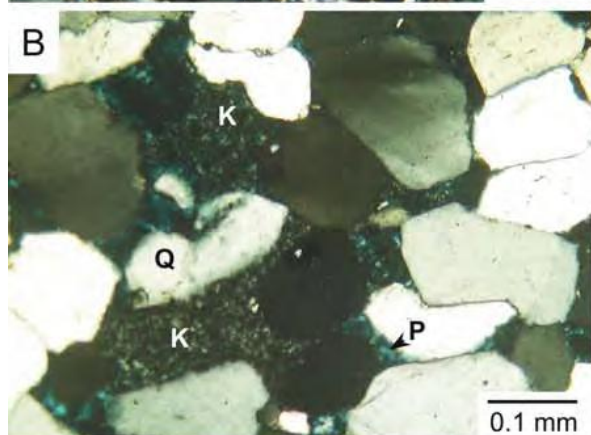
Lam-4 3307.63m, plane polars

Рис. 3.14 Фотографії тонких шлифів, що показують наявність кварцу в пісковиках формації Плавер з Ламінарії-4.



Matrix (Ma) consists of kaolinite, mica and opaque grains occurring between the quartz grains (Q).

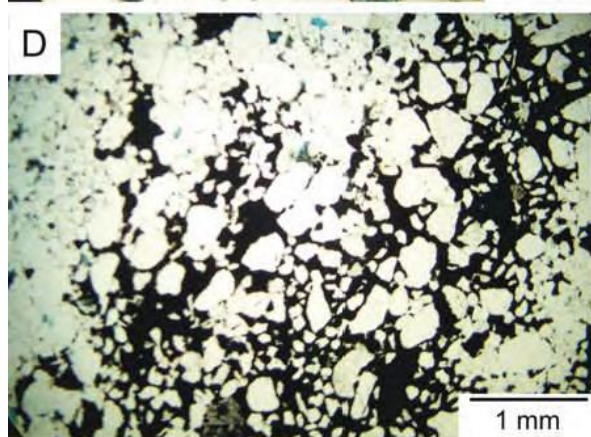
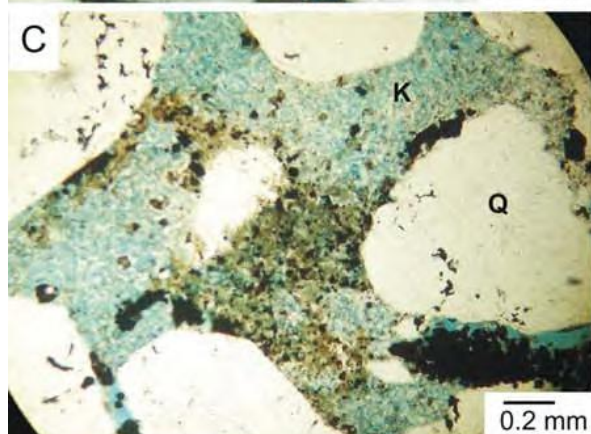
Lam-4 3295.04m, crossed polars



Kaolinite flakes (K) dispersed in the pores (P) mixed with fine opaque materials.

B. Lam-4 3337.61, crossed polars

C. Lam-4 3245.87, crossed polars



Pyrite/opaque minerals cementing the quartz grains.

Lam-4 3251.72m, plane polars

Рис. 3.15 Фотографії тонких зрізів пісковиків формації Плавер з Ламінарії-4, що показують матрицю та непрозорий цемент.

Таблиця 3.10 Дані модального аналізу вибраних пісковиків Laminaria-4, визначені за допомогою точкового підрахунку.

Depth m	Quartz		Opaque %	Feldspar %	Mica %	Lithics %	Matrix %	Other Materials %	Pores %
	Grains %	Overgrowths %							
3230.88	75.5	11.7	3.0			0.3	2.5		7.2
3232.08	75.5	7.7	1.7				2.1		13.1
3234.93	72.5	13.5	2.7				1.6		10.0
3245.87	75.2	7.0	7.1				1.3		10.1
3251.72*	70.8	4.0	15.9		0.1		7.6		1.8
3257.56	71.4	12.7	1.4				3.6		11.2
3259.96	78.4	5.9	2.9			0.3	4.7		8.2
3260.26	66.4	15.8	1.0				3.1		13.9
3263.71	78.2	3.1	1.4				2.6		15.1
3268.51	68.0	7.6	4.8		0.1		9.8		10.9
3271.80	67.1	11.0	2.5		0.5		6.7		13.3
3272.05	72.9	7.3	1.6	0.1			6.7		12.1
3274.65	78.3	0.0	2.9		1.2		17.2	0.2	
3282.15	71.4	17.3	1.7				3.4		6.3
3286.19	68.8	8.3	3.0				4.0	0.1	16.7
3288.44*	67.0	10.7	9.1				10.2	2.6	0.1
3290.09*	74.0	0.0	3.0	0.1	2.3	0.1	15.2	5.0	
3291.14	67.0	8.0	0.9		0.2		11.8	0.2	13.3
3295.04*	74.3	0.5	2.2		1.0		20.7	0.1	1.0
3295.94	62.9	6.0	1.4		0.9		11.2		20.1
3299.09	63.9	5.0	1.3		0.3		5.5		25.6
3300.14	82.5	0.6	5.0				1.8		10.6
3305.68	71.7	8.4	3.2				5.7		11.9
3307.63	66.6	19.0	1.7				3.1		9.9
3325.92	76.6	2.0	3.2				5.0		14.2
3329.67	70.0	12.5	0.8	0.1			2.3		14.2
3335.36	77.0	2.4	2.7				7.7		11.1
3337.61	76.4	7.3	0.3				4.1		12.1
3340.61*	68.5	3.0	1.1		0.4		14.8		14.5
3344.36	75.3	0.7	2.2		0.1		3.1	0.1	19.2
3347.20	62.5	9.0	6.3		0.4		13.2		10.7
3349.15	71.8	3.6	6.0				5.6		14.4
3352.15	70.9	4.0	5.6	0.1			8.8		12.0
3362.19	77.7	3.0	3.3		0.1		5.0		11.6
3364.14	66.7	7.0	7.0				8.1		13.0
3366.24	72.8	8.2	3.4				9.9		6.2

* shaly sandstone

4.2.5 Аналіз дрібної фракції (<2 мкм)

Результати аналізу глинистої фракції наведено в таблиці 3.11. Каолініт – домінуючий (51,6–88,2%). Іліт – до 33%. Іліт-сметитові змішаношарові структури – до 20%. Типові XRD-графіки подано на рис. 3.17.

Таблиця 3.11 Відносні частки глинистих мінералів у фракціях <2 мкм зразків Laminaria-4, як показано за допомогою рентгенівської дифракційної дифракції з орієнтованим агрегатом, разом з відсотками кожного глинистого мінералу, перерахованими на загальну глинисту фракцію з використанням даних Siroquant для всієї породи.

Depth m	Total clays in clay fraction based on normalised Siroquant data		Total clays in <2µm fraction		
	Kaolinite %	Illite %	Kaolinite %	Illite %	Illite-smectite %
3248.72	9.19	90.81	51.61	36.66	11.73
3251.72	47.66	52.34	88.24	9.83	1.92
3254.56	64.33	35.67	78.50	15.85	5.65
3256.81	59.09	40.91	81.94	19.46	
3259.81	46.57	53.43	76.24	25.59	
3266.56	64.11	35.89	69.73	29.57	0.70
3274.05	100.00		86.13	9.91	3.96
3288.44	65.28	34.72	86.05	15.15	
3290.09	52.38	47.62	70.43	23.36	6.21
3300.14	48.00	52.00	78.15	9.54	12.31
3317.37	59.23	40.77	76.29	14.76	8.95
3322.62	33.18	66.82	71.40	17.20	11.39
3332.36	44.57	55.43	63.32	23.58	13.09
3340.61	12.60	87.40	69.91	26.74	3.36
3346.16	50.00	50.00	47.02	33.01	19.97
3349.15	64.29	35.71	74.32	23.25	2.42
3364.14	40.91	59.09	68.56	14.87	16.57

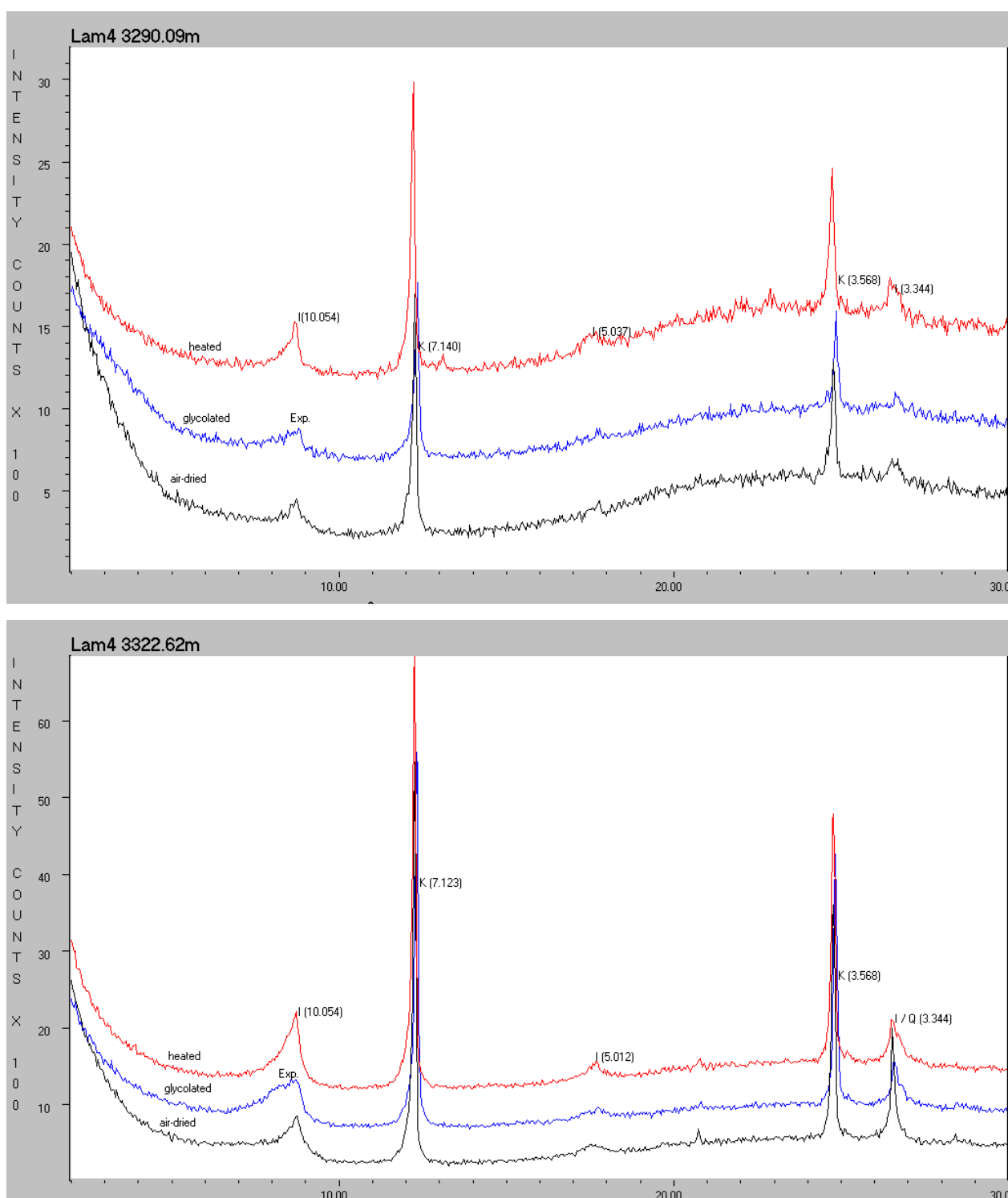
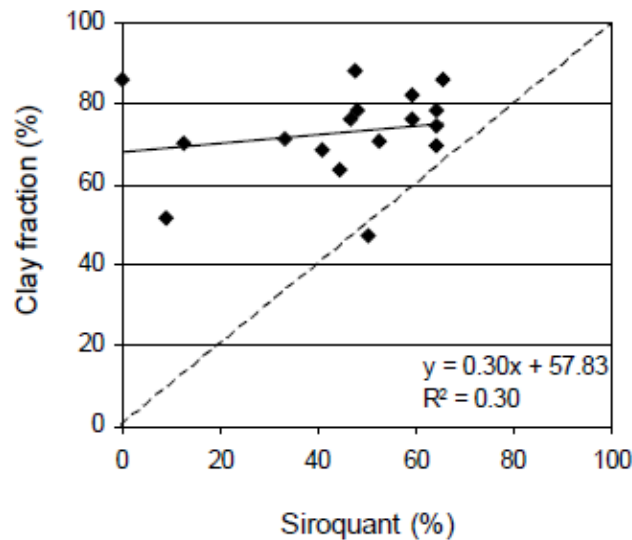


Рисунок 3.17 Типові рентгенограми глинистої фракції зразків *Laminaria-4*. Кут 2θ збільшується зліва направо на горизонтальній шкалі, а інтенсивність дифрагованого піку над фоном задається вертикальною шкалою. Значення d -відстані основних піків наведено в одиницях ангстрем (Å). Exp - розширювана решітка; I - іліт; K - каолінит, Q - кварц.

4.2.6 Порівняння Siroquant і орієнтованих препаратах

Графіки кореляції наведено на рис. 3.18. Siroquant ідентифікує лише каолініт та іліт, тому кореляції для них взаємно протилежні. Кореляція низька ($R^2 \approx 0.3$). Аналіз глинистої фракції показав наявність іліт-сметкиту, який не визначається в порошкових препаратах через слабку інтенсивність рефлексів.

A. Kaolinite



B. Illite and interstratified illite-smectite

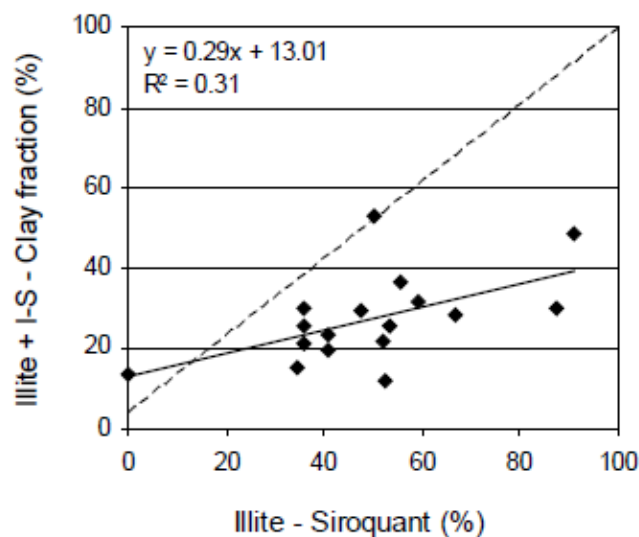


Рисунок 3.18 Порівняння пропорцій глинистих мінералів, визначених за допомогою Siroquant, з пропорціями еквівалентних глинистих мінералів, визначеними за допомогою орієнтовано-агрегатного рентгенівського дифракційного аналізу фракції <2 мкм із зразків Laminaria-4.

4.3. Порівняння співвідношень глинистих мінералів

Дані про вміст глинистих мінералів, отримані за результатами кількісного рентгенофазового аналізу (XRD), демонструють певні пропорційні залежності між окремими мінеральними фазами. Загалом у вибірці простежується тенденція до одночасного збільшення каолініту та іліту, хоча ступінь кореляції варіює залежно від свердловини та літотипу.

Для зразків із **свердловини Lam-2** встановлено **високий ступінь кореляції** між кількісними вмістами каолініту та іліту ($R^2 = 0.75$). Більшість точок на діаграмі розташовані поблизу лінії рівності, що вказує на узгоджене співвідношення між цими мінералами та подібні умови їх утворення (рис. 3.19А).

На відміну від цього, у зразках **свердловини Lam-4** спостерігається **слабкий зв'язок** між вмістами каолініту та іліту ($R^2 = 0.08$), а частина точок знаходиться поблизу осі каолініту. Це свідчить про те, що для певних інтервалів Lam-4 характерний підвищений вміст каолініту порівняно з ілітом, а пропорційність між цими фазами порушується (рис. 3.19В). Така ситуація може бути зумовлена локальними діагенетичними перетвореннями або різною інтенсивністю постседиментаційних процесів.

Важливе значення порівняльні співвідношення глинистих компонентів мають і для подальшої інтерпретації **радіоактивних (гамма-рей) параметрів порід**, що детально розглядається у розділі 7. У межах досліджених інтервалів встановлено наявність **мусковіту** як у пісковиках, так і в глинистих породах. Оскільки мусковіт робить внесок у природну радіоактивність разом з ілітовими мінералами, його частку об'єднано зі складовою «ілітових» глин (іліт + іліт-сметит).

Порівняння вмісту каолініту з **сумарною кількістю іліту + інтерстратифікованого іліт-сметиту + мусковіту** для зразків Lam-2 також демонструє **високу пропорційну залежність** ($R^2 = 0.71$), причому ілітові фази переважають за вмістом у більшості зразків (рис. 3.19С).

У зразках зі свердловини Lam-4 інтерстратифікований іліт-сметит не виявлено, тому для аналізу використано сумарний уміст іліту та мусковіту. Проте в цьому випадку **кореляції практично немає**, що підтверджує неоднорідність глинистого складу та значну варіабельність діагенетичних умов (рис. 3.19D).

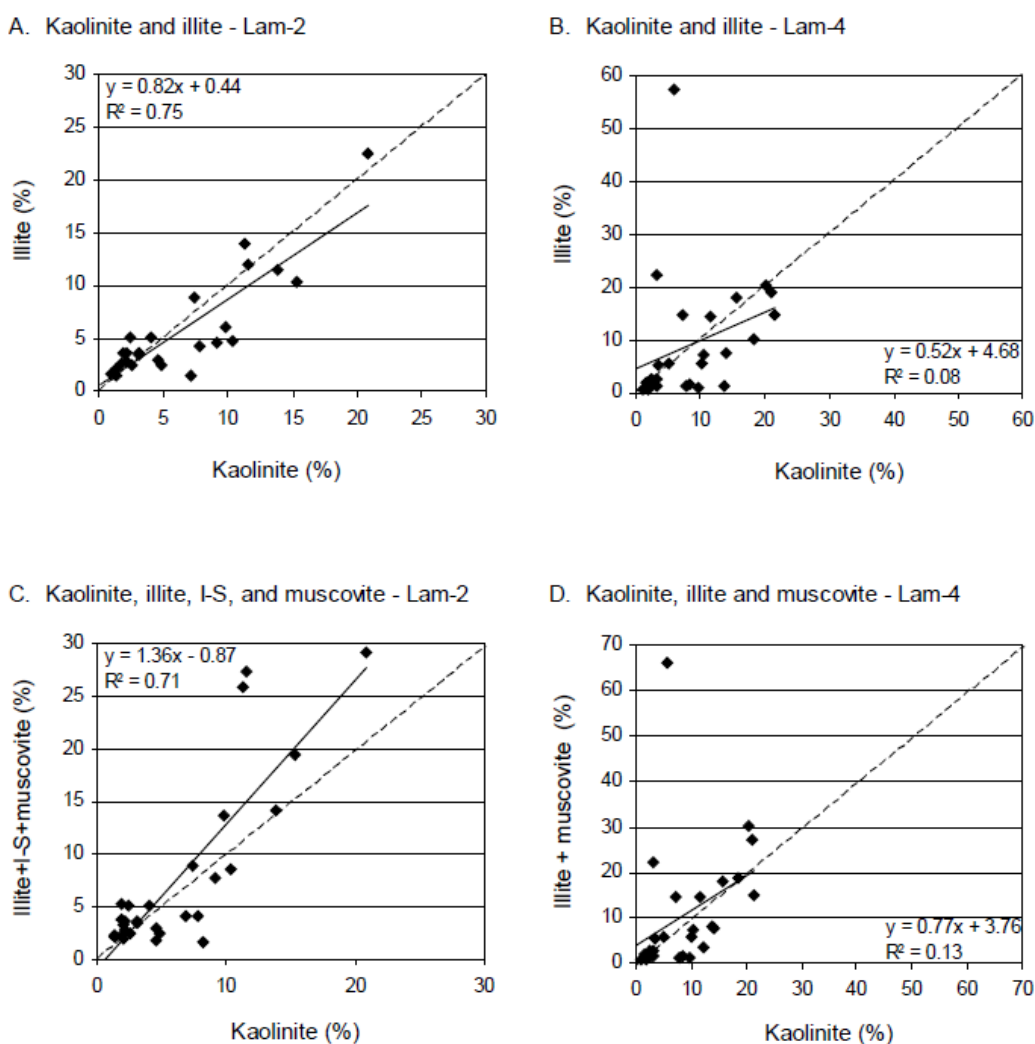


Рисунок 3.19 Порівняння пропорцій глинистих мінералів у зразках свердловини Ламінарія на основі аналізу рентгенівської дифракції цілої породи

РОЗДІЛ 5.

КІЛЬКІСНИЙ МІНЕРАЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ

Кількісне визначення мінеральних фаз за даними порошкової рентгенівської дифрактометрії (XRD) та програми Siroquant показало, що пісковики обох досліджених свердловин характеризуються високою кварцовістю. У більшості зразків вміст кварцу перевищує 90%, тоді як частка глинистих мінералів та піриту є незначною. У поодиноких зразках були виявлені мусковіт, польові шпати, рутил, анатаз та горазит у слідових (<1%) або незначних (>10%) кількостях. У пісковиках зі свердловини Laminaria-2 у декількох випадках фіксується підвищений вміст кальциту – до 21%.

У більш аргілітових горизонтах частка кварцу помітно зменшується, а кількість глинистих мінералів перевищує 10%. У повноцінних глинистих породах глинисті мінерали становлять до 70% складу, що відповідає їх домінуванню над уламковим матеріалом.

5.1. Розподіл основних глинистих мінералів

Рентгенофазовий аналіз усієї породи засвідчив, що головним типом глинистих мінералів у обох свердловинах є каолініт. У зразках Laminaria-2 вміст іліту, змішаношарових іліт-сметитів та мусковіту зростає пропорційно збільшенню кількості каолініту. Подібна тенденція простежується і в Laminaria-4, але кореляція є менш вираженою. Для Laminaria-4 типовим є вищий вміст каолініту порівняно з ілітом і мусковітом.

Детальне вивчення глинистих фракцій методом орієнтованих препаратів підтвердило, що головним розширюваним мінералом є іліт-сметит (I/C) зі змішаношаровою структурою. Його вміст у всіх зразках є незначним, що пояснює слабкість його дифракційних максимумів у цілопородних дифрактограмах, зокрема у зразках Laminaria-4.

Кількісне визначення глинистих мінералів методом Гріффіна (1971) показало незначну узгодженість із результатами Siroquant. Розбіжності

пов'язані з низьким загальним вмістом глин, слабкою інтенсивністю їх піків та високою похибкою під час моделювання порошкових дифрактограм.

5.2. Порівняння результатів XRD та хімічного аналізу

Результати кількісного мінералогічного аналізу Siroquant було зіставлено з даними хімічного складу тих самих зразків (XRF, LOI) для перевірки їх узгодженості. Порівняння показало високу кореляцію для SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Fe_2O_3 та CaO .

Для оксидів, пов'язаних із мінералами, що трапляються у слідових кількостях (TiO_2 , Na_2O , MgO), кореляція була низькою – через значну похибку при визначенні малих концентрацій Siroquant-методом.

Вміст H_2O та CO_2 , обчислений за Siroquant, виявився нижчим за результати LOI-аналізу. Це пояснюється наявністю у породі додаткових летких компонентів (органічна речовина, залишки вуглеводнів), які не враховуються в XRD-моделі.

У цілому, узгодженість XRD-даних із незалежними хімічними аналізами підтверджує коректність кількісного мінералогічного визначення та його придатність для подальшого петрофізичного інтерпретування.

5.3. Порівняння з результатами петрофаційного аналізу

Кількісні дані Siroquant загалом узгоджуються з результатами модального аналізу (пойнт-каунтинг тонких шліфів), хоча повної відповідності між методами не спостерігається. Найбільші розбіжності виникають у зразках, де кварц, глинисті мінерали та оксиди заліза присутні як у вигляді уламкового матеріалу, так і у вигляді цементу.

На результати точкового підрахунку також впливають:

- різна густина мінералів,
- їх оптичні властивості,
- суб'єктивність оператора.

Проте петрофакційний аналіз надає цінну інформацію про морфологію мінералів, текстурні особливості, діагенетичні перетворення та типи цементації (наприклад, вторинний кварцовий овергроуз).

5.4. Можливості рентгенівської томографії (X-ray CT)

Технологія рентгенівської комп'ютерної мікротомографії (micro-CT) дає можливість отримувати тривимірні зображення пісковиків та ідентифікувати окремі мінерали і поровий простір.

У досліджених зразках різні рівні сірого кольору на реконструйованих зображеннях відповідають:

- кварцу,
- піриту / залізистим мінералам,
- кальциту,
- порам.

Оцінка об'ємного вмісту кварцу та кальциту за мікротомографією добре корелює з даними Siroquant та модального аналізу. Також високу точність отримано для залізистих мінералів завдяки їх високій контрастності.

Порівняння пористості, визначеної micro-CT, з пористістю кернових проб показало загальну відповідність, хоча пряма кореляція з даними шліфів відсутня. Це пояснюється:

- наявністю глинистих мінералів у порах,
- обмеженою роздільною здатністю томографа,
- близькими значеннями густини глинистих мінералів і кварцу.

РОЗДІЛ 6.

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІНЕРАЛОГІЧНОГО СКЛАДУ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ КЕРНОВИХ ЗРАЗКІВ

Вплив мінерального складу на фізичні властивості порід чітко простежується при порівнянні результатів кількісної мінералогії з даними лабораторного аналізу кернових «плагів». Значення густини зерна, визначені за результатами вимірювань на керні, у більшості випадків виявилися вищими, ніж можна було б очікувати для пісковиків, збагачених кварцом. Таке збільшення зумовлене присутністю більш густих мінералів – кальциту та піриту. Хоча вони трапляються у незначних кількостях, їх вплив на загальну щільність породи є суттєвим.

Розрахункові значення густини зерна, отримані за кількісним мінералогічним аналізом, добре корелюють із безпосередньо виміряними значеннями для відповідних «плагів». Підвищені значення густини у кернових пробах часто фіксуються там, де пірит або інші залізисті мінерали концентруються у вигляді нодулів у керні, але не потрапляють у невеликі фрагменти, відібрані для XRD-аналізу. Натомість понижені значення густини, зафіксовані у частині зразків, можуть бути спричинені наявністю не повністю сполучених (закритих) пор, які під час вимірювання додатково враховуються як частина зернового об'єму.

Таким чином, розрахунок густини зерна за даними мінералогічного складу може виступати альтернативним методом оцінки щільності порід, дозволяючи уникнути впливу вторинних факторів і ґрунтуючись виключно на пропорціях та фізичних властивостях мінералів.

6.1. Вплив глинистих мінералів на радіоактивні властивості порід

Зміни радіоактивності по розрізу тісно пов'язані з варіаціями у мінералогії, насамперед – у вмісті глинистих мінералів. Відгуки гамма-каротажу як у керні, так і у свердловині чітко корелюють зі збільшенням

загальної кількості глини. Аргіліти та глинисті пісковики дають підвищені значення гамма-активності порівняно з кварцовими пісковиками.

У Laminaria-2 вплив глинистих мінералів на гамма-випромінювання фіксується особливо чітко – насамперед у тих інтервалах, де вміст каолініту зростає пропорційно до вмісту іліту, мусковіту та змішаношарових структур іліт-сметкиту. Для Laminaria-4 така кореляція менш виражена й характеризується більшою варіабельністю.

Ці спостереження є важливими для оцінки об'єму глини (V_{sh}) за даними гамма-каротажу. Якщо домінуючим типом глинистого мінералу є нерadioактивний каолініт або якщо співвідношення між radioактивними (іліт, I/C) та нерadioактивними глинами не є стабільним, гамма-каротаж може недооцінювати глинистість товщі.

Отже, незалежне визначення глинистої фракції за XRD є доцільним як допоміжний метод уточнення V_{sh} у продуктивних інтервалах.

6.2. Вплив мінерального складу на пористість

Пористість кернових зразків демонструє тісний взаємозв'язок із мінеральним складом. Встановлено:

- при вмісті кварцу **менше 70%** пористість зазвичай **не перевищує 5%**;
- із зростанням вмісту кварцу збільшується й мінімальна пористість;
- висококварцові пісковики (>90% кварцу) мають щонайменше **10%** пористості, а подекуди **до 25%**.

Проте навіть у кварцових пісковиках подібні за мінеральним складом зразки можуть мати різну пористість через:

- вторинний ріст кварцу (кварцові овергроузи),
- наявність кварцу у матриці.

Ці фактори зменшують міжзерновий простір і призводять до значного діагенетичного зменшення пористості.

Пористість зменшується зі збільшенням вмісту глинистих мінералів. Зокрема:

- при **30% глини** максимальна пористість становить лише близько **5%**,
- при **<5% глини** пористість сягає **10–25%**.

Пірит і кальцит, хоча присутні в невеликих кількостях, виступають цементуючими фазами й суттєво знижують пористість у порівнянні з породами, що складаються лише з кварцу та глини.

Таким чином, кількісні мінералогічні дані можуть бути використані для прогнозування діапазону пористостей у межах продуктивної товщі.

6.3. Мінералогія та проникність

Породи зі схожим мінеральним складом можуть мати суттєво відмінні значення проникності – залежно від напрямку фільтрації та ступеня зцементованості порового простору. Проте загальні тенденції однакові для обох орієнтацій кернових плагів:

- високі значення проникності відповідають **високому вмісту кварцу та низькому вмісту глинистих мінералів**;
- у висококварцових пісковиках спостерігається значна варіація проникності, зумовлена вторинними кварцовими овергроузами.

РОЗДІЛ 7.

ВПЛИВ МІНЕРАЛОГІЇ НА ДАНІ ГЕОФІЗИЧНИХ КАРОТАЖІВ ТА ВИКОРИСТАННЯ МІНЕРАЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В ОЦІНЦІ КОЛЕКТОРСЬКИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Мінеральний склад порід суттєво впливає на інтерпретацію їхніх колекторських властивостей за даними геофізичних свердловинних досліджень, оскільки визначає характер відгуку різних типів каротажних кривих. У досліджених розрізах спостерігається низка закономірностей між мінералогією та значеннями параметрів, отриманих зі звукового, нейтронного, гамма- та щільнісного каротажів.

Інтервальна швидкість та дані звукового каротажу

Інтервальний час пробігу хвилі, зафіксований на кривій sonic log, збільшується зі зростанням частки глинистих мінералів. Порівняння пористості, розрахованої за звуковим каротажем, із лабораторними даними показало їхню відповідність у кварцитистих пісковиках. Однак із підвищенням вмісту глинистої фракції пористість, оцінена за sonic log, стає завищеною щодо даних по керну, і ця різниця зростає пропорційно кількості глини.

Взаємозв'язок глинистих мінералів і нейтронного каротажу

Між глинистими мінералами та нейтронним каротажем спостерігається загальне корелювання, хоча значна дисперсія даних може бути зумовлена високим вмістом водню в структурі глин. Це призводить до заниження нейтронного рахунку, що інтерпретується як підвищена пористість навіть у випадках, коли реального відкритого порового простору немає. У кварцовмісних пісковиках значення нейтронної пористості добре узгоджуються з даними по керну. Пропорції кальциту також корелюють із кривою нейтронного каротажу: кальцитовий цемент заповнює практично весь поровий простір, зменшуючи кількість рідини в породі та підвищуючи

нейтронний сигнал. Кварц, навпаки, виявляє обернену залежність з нейтронним логом.

Вплив мінерального складу на щільнісний каротаж

Об'ємна густина порід (bulk density) демонструє кореляцію, передусім, з вмістом піриту та кальциту, а меншою мірою – окремих типів глинистих мінералів. Висока густина цих мінералів, а також їхня роль у цементації порового простору, сприяють збільшенню загальної щільності породи. Аналогічно, наявність глинистого матеріалу у порах підвищує bulk density. Застосування стандартних рівнянь для оцінки пористості за даними density log у таких умовах часто призводить до недооцінки реальної пористості, особливо в інтервалах, де спостерігаються підвищені концентрації піриту та кальциту.

Уточнення параметрів моделі колектора

Точність визначення пористості за каротажними даними істотно залежить від коректного вибору параметрів матриці та флюїдів. Використання лабораторно вимірних значень густини зерен дозволило отримати інтерпретації, які краще узгоджуються з пористістю керна. Густина зерен, розрахована за даними кількісної мінералогії, також показала добру відповідність лабораторним вимірюванням, що дозволяє застосовувати її для корекції well-log моделей.

Оцінка об'єму глини за гамма-каротажом

У розрахунках пористості за sonic і density log застосовується поправка на об'єм глини (V_{sh}), визначений за даними гамма-каротажу. Проте оцінка V_{sh} за гамма-кривою не завжди повністю відображає реальний вміст глинистої складової, особливо якщо основним типом глини є радіоактивно-нейтральні мінерали (наприклад, каолінит), або якщо співвідношення радіоактивних та нердіоактивних глин у пластах неконстантне.

У таких випадках гамма-каротаж може давати занижені значення об'єму глини, що призводить до завищення пористості, розрахованої за sonic та density log. Тому дані гамма-каротажу повинні верифікуватися кількісною мінералогією, щоб підвищити точність оцінки колекторських властивостей.

Використання мінералогічних досліджень в оцінці колекторських властивостей

Застосування кількісних рентгеноструктурних (XRD) методів у даному дослідженні дозволяє простежити вплив окремих мінеральних компонентів на петрофізичні параметри порід-колекторів. Кількісні мінералогічні дані, отримані методом рентгенодифракції, можуть бути використані у кількох напрямках інтерпретації та моделювання властивостей резервуарів.

Мінералогія як основа для інтерпретації геофізичних каротажів

Відомо, що на покази різних типів геофізичних каротажів значно впливають мінерали, присутні у породі. Тому кількісний XRD-аналіз може бути використаний як база для оцінки достовірності петрофізичних параметрів, отриманих за даними каротажу.

Мінералогічний (на відміну від чисто петрографічного) підхід дозволяє:

- прогнозувати діапазон очікуваних значень пористості для різних стратиграфічних інтервалів;
- пояснювати невідповідності між даними керн та геофізичних методів;
- встановлювати причини аномалій на нейтронних, гамма-каротажних і щільнісних кривих.

У випадку відсутності керн кількісний XRD може бути застосований до шламів, що дозволяє уточнити петрофізичні параметри порід шляхом корекції інтерпретацій геофізичних каротажів.

Визначення глинистих та інших інтервалів за мінералогічними даними

Рентгеноструктурний аналіз ефективний для:

- виділення глинистих інтервалів;
- підтвердження даних гамма-каротажу;
- діагностики різних типів глинистих мінералів, що по-різному впливають на проникність, пористість та електричні властивості.

Кількісна мінералогія дозволяє інтегрувати інформацію про склад глинистої фракції у моделі фільтраційних та ємнісних властивостей колектора.

Переваги порошкової мінералогії для інтерпретації складних літологій

Порошкова підготовка зразків забезпечує репрезентативність аналізу, оскільки вміщує більший об'єм породи та враховує природну неоднорідність.

Це особливо важливо для:

- інтерламінованих пісковиків та алевролітів,
- чергування пісковик–глина,
- стратиграфічних інтервалів зі значною літологічною варіабельністю.

У таких випадках XRD-аналіз дозволяє отримати результати, які можуть бути більш релевантними для порівняння з кривими каротажу, ніж дані тонких шліфів.

Кількісна мінералогія також може виконуватися на серії зразків уздовж значної частини розрізу, що полегшує прив'язку певних типів мінеральних асоціацій до конкретних профілів геофізичних каротажів.

Застосування мінералогії у складних та вулканогенних товщах

Метод XRD забезпечує прямий зв'язок між мінеральним складом і хімією порід, що особливо важливо у складних літологіях, включаючи:

- осадові товщі з вулканогенними включеннями;
- породи з матриксом, збагаченим вторинними мінералами;
- колектори, що знаходяться у зонах впливу гідротермальних або діагенетичних процесів.

Мінералогічний аналіз вулканічних включень допомагає оцінити їхній вплив на покази каротажу, а відповідно – на розрахунок ефективної пористості та проникності.

Такі дослідження є також корисними для реконструкції джерела матеріалу та етапів діагенезу, а отже – мають значення для прогнозу колекторських властивостей у вулканогенних районах.

Переваги XRD у резервуарних дослідженнях

Кількісний рентгеноструктурний аналіз:

- забезпечує швидке отримання даних;

- є економічно вигіднішим порівняно з тонкошліфовою петрографією чи складною геохімією;
- може бути оперативно застосований у процесі буріння та завершення свердловини;
- дозволяє інтегрувати мінералогічні характеристики в комплексну оцінку колектора.

Роль рентгенівської мікротомографії (X-ray MicroCT)

У даному дослідженні також застосовано рентгенівську мікротомографію, що дає змогу:

- візуалізувати поровий простір у тривимірному форматі;
- інтегрувати мікроскопічні дані з інформацією геофізичних каротажів;
- використовувати MicroCT як інструмент для апскейлінгу – перенесення мікомасштабних параметрів на рівень кореляції зі свердловинними даними.

Таким чином, XRD та MicroCT виступають взаємодоповнювальними методами, що дозволяють комплексно оцінити мінеральний склад, структуру порового простору та їхній вплив на петрофізичні властивості колектора.

ВИСНОВКИ

У межах виконаної роботи було досліджено вплив мінералогічного складу на петрофізичні властивості пісковикових колекторів та особливості їх відображення на геофізичних каротажах. Реалізація поставлених завдань дала змогу комплексно застосувати методи кількісної мінералогії, петрографії, лабораторних петрофізичних досліджень і геофізичної інтерпретації. На основі отриманих результатів сформульовано такі висновки:

1. Проаналізовано сучасні наукові підходи до вивчення петрофізичних властивостей та методи кількісної мінералогії.

Виявлено, що найбільш ефективними методами оцінки мінерального складу пісковиків є рентгеноструктурний аналіз у поєднанні з Rietveld-методом, мікроскопічні дослідження та елементний аналіз. Їх інтеграція забезпечує високу точність визначення частки глинистих і неглинистих компонентів та дозволяє простежити діагенетичні перетворення, що формують поровий простір.

2. Надано геологічну характеристику досліджуваного нафтогазового об'єкта та пісковикової товщі.

Встановлено стратиграфічне положення, літологічну будову та генезис порід-колекторів. Пісковики характеризуються значною літологічною неоднорідністю: змінами у співвідношенні кварцу, польових шпатів, карбонатів і глинистих мінералів.

3. Виконано кількісний мінералогічний аналіз керну за допомогою XRD та Rietveld-методу.

Ідентифіковано основні мінерали та визначено їх частки у кожному інтервалі. Отримані результати корегуються з петрографічними та геохімічними даними, що підтверджує їх високу достовірність. Встановлено, що зміна кількості глинистих мінералів є ключовим фактором варіації пористості та проникності.

4. Визначено основні петрофізичні параметри порід.

Лабораторними методами та за даними каротажу оцінено пористість, проникність, густину, акустичні властивості та радіоактивність. Показано, що пісковики зі збільшеним вмістом глинистої фракції характеризуються зменшенням проникності та ефективної пористості, а також підвищеними значеннями природної радіоактивності.

5. Встановлено кореляції між мінералогічним складом і петрофізичними властивостями.

Найбільш суттєві зв'язки виявлено між:

- вмістом глинистих мінералів і зменшенням пористості/проникності;
- кількістю карбонатів і зниженням ефективної пористості;
- зростанням частки кварцу і покращенням колекторських властивостей.

Побудовані регресійні залежності можуть бути використані для прогнозу петрофізичних параметрів у відсутності кернових даних.

6. Проаналізовано вплив мінералів на геофізичні відповіді GR, NPHI, RHOB, DT та інших каротажів.

Показано, що глинисті мінерали формують характерні аномалії на гамма-каротажі, знижують швидкість пружних хвиль (DT), підвищують нейтронну пористість (NPHI) та збільшують густину (RHOB) за рахунок високої поглинальної здатності. Кварц, навпаки, забезпечує більш стабільні та прогнозовані значення каротажних параметрів.

7. Розроблено практичні рекомендації для удосконалення інтерпретації каротажних діаграм.

Запропоновано враховувати кількісні мінералогічні дані при побудові петрофізичних моделей; використовувати XRD-аналіз як коригувальний інструмент для уточнення типів колекторів; застосовувати мінералогічно-орієнтовані пористісно-насичувальні моделі; проводити калібрування каротажів за результатами лабораторних мінералогічних та петрофізичних досліджень.

Узагальнюючи, дослідження підтвердило, що комплексне використання мінералогічних методів (XRD, Rietveld, мікроскопія) та петрофізичних даних дозволяє значно підвищити точність оцінки колекторських властивостей пісковиків. Інтеграція цих підходів з даними геофізичного каротажу є ефективним шляхом удосконалення інтерпретації свердловинної інформації та прогнозу продуктивних інтервалів у нафтогазоносних товщах.

Список використаних джерел

1. Al-Ramadan K.A., Hussain M., Imam B., Saner S. Lithologic Characteristics and Diagenesis of the Devonian Jauf Sandstones at Ghawar Field, Eastern Saudi Arabia // *Marine and Petroleum Geology*. 2004. Vol. 21. P. 1221–1234.
2. Asquith G. Basic Well Log Analysis for Geologist. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists, 1982. 216 p.
3. Baker J.C., Havord P.J., Martin K.R., Ghori A.R. Diagenesis and Petrophysics of the Early Permian Moogooloo Sandstone, Southern Carnarvon Basin, Western Australia // *AAPG Bulletin*. 2002. Vol. 84. P. 250–265.
4. Bateman R. Open-Hole Log Analysis and Formation Evaluation. Boston: International Human Resources Development Corporation, 1985. 647 p.
5. Bish D.L., Post J.E. Quantitative Mineralogical Analysis Using the Rietveld Full-Pattern Fitting Method // *American Mineralogist*. 1993. Vol. 78. P. 932–940.
6. Bjørlykke K. Clay Mineral Diagenesis in Sedimentary Basins – a Key to Prediction of Rock Properties // *Clay Minerals*. 1998. Vol. 33. P. 15–34.
7. Bjørlykke K., Egeberg P.K. Quartz Cementation in Sedimentary Basins // *AAPG Bulletin*. 1993. Vol. 77. P. 1538–1548.
8. Bloch S., Lader R.H., Bonnell L. Anomalously High Porosity and Permeability in Deeply Buried Sandstone Reservoirs: Origin and Predictability // *AAPG Bulletin*. 2002. Vol. 86. P. 301–328.
9. Dresser Atlas. Log Interpretation Charts. Houston: Dresser Industries, Inc., 1979. 107 p.
10. Dulu O.G. Computer Axial Tomography in Geosciences: An Overview // *Earth-Science Reviews*. 1999. Vol. 48. P. 265–281.
11. Ehrenberg S.N. Preservation of Anomalously High Porosity in Deeply Buried Sandstones by Grain-coating Chlorite: Examples from the Norwegian Continental Shelf // *AAPG Bulletin*. 1993. Vol. 77. P. 1260–1286.
12. Ehrenberg S.N. Influence of Depositional Sand Quality and Diagenesis on Porosity and Permeability: Examples from Brent Group Reservoirs, Northern North Sea // *Journal of Sedimentary Research*. 1997. Vol. 67. P. 197–211.

13. Frost E.J., Fertl W.H. Integrated Core and Log Analysis Concepts in Shaly Clastic Reservoirs // *The Log Analyst*. 1981. Vol. 22. P. 3–16.
14. Gunn P.J. Bonaparte Basin: Evolution and Structural Framework // *The Northwest Shelf Australia* / Eds. P.G. Purcell, R.R. Purcell. PESA, 1988. P. 275–256.
15. Hurst A., Archer J.S. Sandstone Reservoir Description: An Overview of the Role of Geology and Mineralogy // *Clay Minerals*. 1986. Vol. 21. P. 791–809.
16. Hurst A., Nadeau P.H. Clay Microporosity in Reservoir Sandstones: An Application of Quantitative Electron Microscopy in Petrophysical Evaluation // *AAPG Bulletin*. 1995. Vol. 79. P. 563–573.
17. Klein C., Hurlbut C.J. *Manual of Mineralogy*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1993. 532 p.
18. Mumme W.G., Tsambourakis I.C., Madsen I.C., Hill R.J. Improved Petrological Modal Analysis from X-ray Powder Diffraction Data by Use of the Rietveld Method Part 3. Selected Sedimentary Rocks // *Journal of Sedimentary Research*. 1996. Vol. 66. P. 132–138.
19. Norrish K., Hutton J.T. An Accurate X-ray Spectrographic Method for the Analysis of a Wide Range of Geological Samples // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1969. Vol. 33. P. 431–453.
20. Orsi T.H., Edwards C.M., Anderson A.L. X-ray Computed Tomography: A Non-destructive Method for Quantitative Analysis of Sediment Cores // *Journal of Sedimentary Research*. 1994. Vol. A64. P. 690–693.
21. Penney R.K., Looi S.Y. Understanding Effective and Total Porosity: the Key to Optimising Mineralogical Evaluations // *APPEA Journal*. 1996. Vol. 36. P. 284–292.
22. Pittman E.D. Porosity, Diagenesis and Productive Capacity of Sandstone Reservoirs // *SEPM Special Publication*. 1979. Vol. 26. P. 159–173.
23. Ramm M. Reservoir Quality and its Relationship to Facies and Provenance in Middle to Upper Jurassic Sequences, Northeastern North Sea // *Clay Minerals*. 2000. Vol. 35. P. 77–94.

24. Rider M. The Geological Interpretation of Well Logs. Caithness: Whittles Publishing, 1996. 280 p.
25. Rossi C., Kalin O., Arribas A., Tortosa A. Diagenesis, Provenance and Reservoir Quality of Triassic TAGI Sandstones from Ourhoud Field, Berkine (Ghadames) Basin, Algeria // Marine and Petroleum Geology. 2002. Vol. 19. P. 117–142.
26. Ruan C.D., Ward C.R. Quantitative X-ray Powder Diffraction Analysis of Clay Minerals in Australian Coals Using Rietveld Methods // Applied Clay Science. 2001. Vol. 21. P. 227–240.
27. Schmid S., Worden R.H., Fisher Q.J. Diagenesis and Reservoir Quality of the Sherwood Sandstone (Triassic), Corrib Field, Slyne Basin, West of Ireland // Marine and Petroleum Geology. 2004. Vol. 21. P. 299–315.
28. Swanson J., Ward C.R., Franklin B.J. Mineralogy of Sydney Building Sandstones in Relation to Geotechnical Properties - 1: Relation of Quantitative X-ray Diffraction Data to Other Chemical and Petrographic Indicators // Australian Geomechanics. 2002. Vol. 37. P. 53–69.
29. Van Geet M., Swennen R., Wevers M. Quantitative Analysis of Reservoir Rocks by Microfocus X-ray Computerised Tomography // Sedimentary Geology. 2000. Vol. 132. P. 25–36.
30. Wilson M.D., Pittman E.D. Authigenic Clays in Sandstone: Recognition and Influence on Reservoir Properties and Paleoenvironmental Analysis // Journal of Sedimentary Petrology. 1977. Vol. 47. P. 3–31.