

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

**Кваліфікаційна робота магістра  
спеціальність 103 – Науки про Землю  
освітня програма «Геологія»  
спеціалізація «Геофізика»**

ТЕМА: «Дослідження термофізичних параметрів кернових зразків Карбонової серії  
Басейну Лотарингії»

Виконав

студент 2-го курсу  
кафедри геофізики  
Артем КОРНІЄНКО

Науковий керівник

доктор геологічних наук  
Олександр ШАБАТУРА

Робота рекомендується до захисту (протокол №      від )

Завідувач кафедри

кандидат геологічних наук  
Віктор ОНИЩУК

Київ – 2022

## **Реферат**

магістерської кваліфікаційної роботи

**Корнієнка Артема Вікторовича**

на тему: «Дослідження термофізичних параметрів кернових зразків Карбонової серії Басейну Лотарингії»

Спеціальність **103 Науки про Землю**

Робота на 70 друкованих аркушів складається із 7 розділів і містить 2 таблиці, 4 графіки, 37 рисунків. При підготовці роботи використовувалися матеріали з 14 джерел та результати власних лабораторних вимірювань серії кернових зразків гірських порід.

### **Актуальність**

Перспективність видобування метану вугільних пластів (coal bed methane – CBM) на досліджуваній площі, а також розробка геотермальної моделі родовища обумовлює проведення детального петрофізичного дослідження.

### **Мета роботи**

Дослідження термофізичних параметрів кернових зразків Карбонової серії та їх кореляції з іншими петрофізичними параметрами для колекторських параметрів порід.

### **Розв'язувані в роботі задачі**

- аналіз вхідних геологічних та геофізичних даних;
- петрофізичні дослідження на кернових зразках
- петрофізичний аналіз даних;

- проведення множинного регресійного аналізу для подальшої оцінки петрофізичних параметрів

### **Основний зміст**

В роботі представлено результати лабораторних вимірювань та аналізу кернових зразків. Для цієї мети використовувалися сучасне лабораторне обладнання та програмне забезпечення. Окремий розділ кваліфікаційної роботи - продемонстровано приклад застосування множинного регресійного аналізу для моделювання та прогнозу петрофізичних параметрів.

### **Основні результати**

Результатом виконаної роботи є представлення методик роботи з сучасним петрофізичним лабораторним обладнанням, кількісний аналіз результатів та статистичний аналіз петрофізичних параметрів.

### **Оригінальність роботи**

Дана робота з застосуванням лабораторних досліджень кернового матеріалу вперше застосована в свердловині Фольшвіллер 1А (Folschviller 1(A)) та представляє собою алгоритм придатний для використання на інших геологічних об'єктах, у тому числі в Україні на схожих геологічних розрізах.

### **Практичне значення**

Практичним значенням результатів роботи є отримання петрофізичних рівнянь прогнозування пружних параметрів через аналіз розподілу і трендових залежностей вхідних даних, а також отримання набору петрофізичних характеристик товщ нижнього та верхнього карбону Басейну Лотарингії.

## **Анотація**

Використовуючи кернові зразки, було проведено лабораторні петрофізичні дослідження, обробка та їх інтерпретація отриманих результатів. Шляхом розрахунку в програмі Statistica та редакторі даних отримані регресійні залежності петрофізичних параметрів. Як результат виконаної роботи, було отримано рівняння множинного регресійного аналізу для параметрів проникності та термічної провідності. Автором було виконано лабораторні дослідження, розрахунок та аналіз петрофізичних параметрів та моделювання шляхом множинного регресійного аналізу.

## **Ключові слова**

Колектор, термічні параметри, петрофізика, Басейн Лотарингії, кернові зразки, множинний регресійний аналіз

## **Artem Korniienko**

Research of thermo-physical parameters of core samples of the Carbon series of the Lorraine Basin

## **Abstract**

Using core samples, laboratory petrophysical analyses, processing of data and the interpretation of the results were performed. Regression dependences of petrophysical parameters were obtained by calculation in the Statistica program and the data editor. As a result of this work, the equation of multiple regression analysis for permeability and thermal conductivity parameters was obtained. The author performed laboratory studies,

calculated and analyzed petrophysical parameters and modeled them by multiple regression analysis.

**Key words**

Reservoir, thermal parameters, petrophysics, Lorraine basin, core samples, multiple regression analysis

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень.....	9
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАЙОН РОБІТ .....	10
1.1 Економіко-географічні умови району робіт .....	10
1.2 Природно-кліматичні умови .....	11
2. ГЕОЛОГО-ГЕОФІЗИЧНА ВИВЧЕНІСТЬ РАЙОНУ РОБІТ .....	12
2.1 Історія відкриття і розвідки родовища.....	12
3. ГЕОЛОГІЧНА БУДОВА РАЙОНУ РОБІТ .....	15
3.1. Стратиграфія .....	15
4. ФІЗИКО-ГЕОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПОСТАНОВКИ .....	25
ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	25
4.1 Об'єкти дослідження .....	25
4.2 Результати лабораторних вимірювань .....	27
4.3 Результати петрофізичного аналізу .....	30
5. МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНИХ ПЕТРОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	39
6. ОБРОБКА ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ ПЕТРОФІЗИЧНИХ .....	43
ДОСЛІДЖЕНЬ.....	43
6.1 Збір та попередня обробка даних.....	43
6.2 Обрахунок петрофізичних параметрів.....	45
6.3 Апаратура .....	53
7. РЕЗУЛЬТАТИ РОБІТ .....	58
ВИСНОВКИ .....	60
Список використаних джерел .....	62
Додатки .....	64

## ВСТУП

Дипломна робота «Дослідження термофізичних параметрів кернових зразків Карбонової серії Басейну Лотарингії» була виконана на основі матеріалів моєї участі у стажуванні в проекті “REGALOR” в рамках програми ERASMUS+ в Університеті Лотарингії. Цей проект має на меті дослідити перспективність видобутку метану з вугільних пластів та впровадження геотермальних технологій у Басейні Лотарингії використовуючи різноманітні методи сейсмозв'язки, петрофізики, геологічного моделювання і тд. Завдяки цьому автор здобув вміння та навички роботи з різним петрофізичним обладнанням та програмним забезпеченням.

Актуальність теми полягає, в тому, що перспективність видобування метану вугільних пластів (coal bed methane – CBM) на досліджуваній площі, а також розробка геотермальної моделі родовища ґрунтується на базі детального і комплексного петрофізичного дослідження.

Вхідними даними досліджень кваліфікаційної роботи є:

- кернові зразки свердловини Фольшвіллер 1А – 212 зразків.
- Стратиграфічна розбивка свердловини
- Звіт методики та технології виконаних методів ГДС – гамма каротаж, гамма-гамма каротаж, питомий опір, кавернометрія,  $V_p$ ,  $V_s$  – 180-1300 м (код звіту - 14-45572)

Дослідження термофізичних параметрів кернових зразків Карбонової серії та їх кореляції з іншими петрофізичними параметрами для колекторських параметрів порід.

Виходячи з мети роботи були поставлені наступні задачі:

- Геолого-геофізичний аналіз досліджуваної площі
- Аналіз розподілу залежностей колекторських параметрів від фізичних параметрів порід за петрофізичними дослідженнями
- Проведення та створення моделей множинного регресійного аналізу
- Отримання фінальних графіків розподілу петрофізичних параметрів по отриманих моделях

Для вирішення поставлених задач було використано ряд програмних продуктів, а саме Excel від Microsoft Office, TCS, Pundit, Statistica та TechLog.

Також частина роботи, що представлена у дипломній роботі була використана та представлена як частина конференції Спілки Нафтогазових Інженерів (SPE).

**Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень**

$V_p$	Поздовжня хвиля – м/с
$V_s$	Поперечна хвиля – м/с
TC	Термічна провідність - ват на метр-кельвін (Вт/м*К)
TD	Термічна дифузійність - ват на метр-кельвін (Вт/м*К)
K	Проникність – мілі Дарсі – мД
Пн.Сх.	Північно-Східний
Пд.Зх.	Південно-Західний

# 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАЙОН РОБІТ

## 1.1 Економіко-географічні умови району робіт

Район досліджень приурочений до Фольшвіллер [fɔlʃvilɛv] — французька комуна, розташована в департаменті Мозель і житловому районі Мозель-Схід у регіоні Гранд Ест (Рис. 1.1).

Фольшвіллер — невелике містечко на північному сході Франції, розташоване в Мозелі. Місто розташоване в середньому на висоті 279 метрів над рівнем моря.

Місто розташоване приблизно в 50 кілометрах від Меца, префектури департаменту, з яким його з'єднує автомагістраль А4. Територія муніципалітету зрошується і осушується потоками Вельдерсбах, Фольшвіллер і Вальмонт. На південному сході його перетинає німецький Нід.

Клімат Фольшвіллера деградований океанічний з континентальним впливом. Пори року контрастні та добре виражені, але залежно від переважаючих вітрів періоди опадів (океанічний вплив) або високої теплової амплітуди (континентальний вплив) можуть змінюватися один за одним протягом ночі.

Рівнинні і деякі надземні території міста (зокрема в лісі Фюрст) зберегли наслідки видобутку вугілля в 19 і 20 століттях [10].

Фольшвіллер розташований менш ніж за двадцять кілометрів від регіонального природного парку Лотарингії.

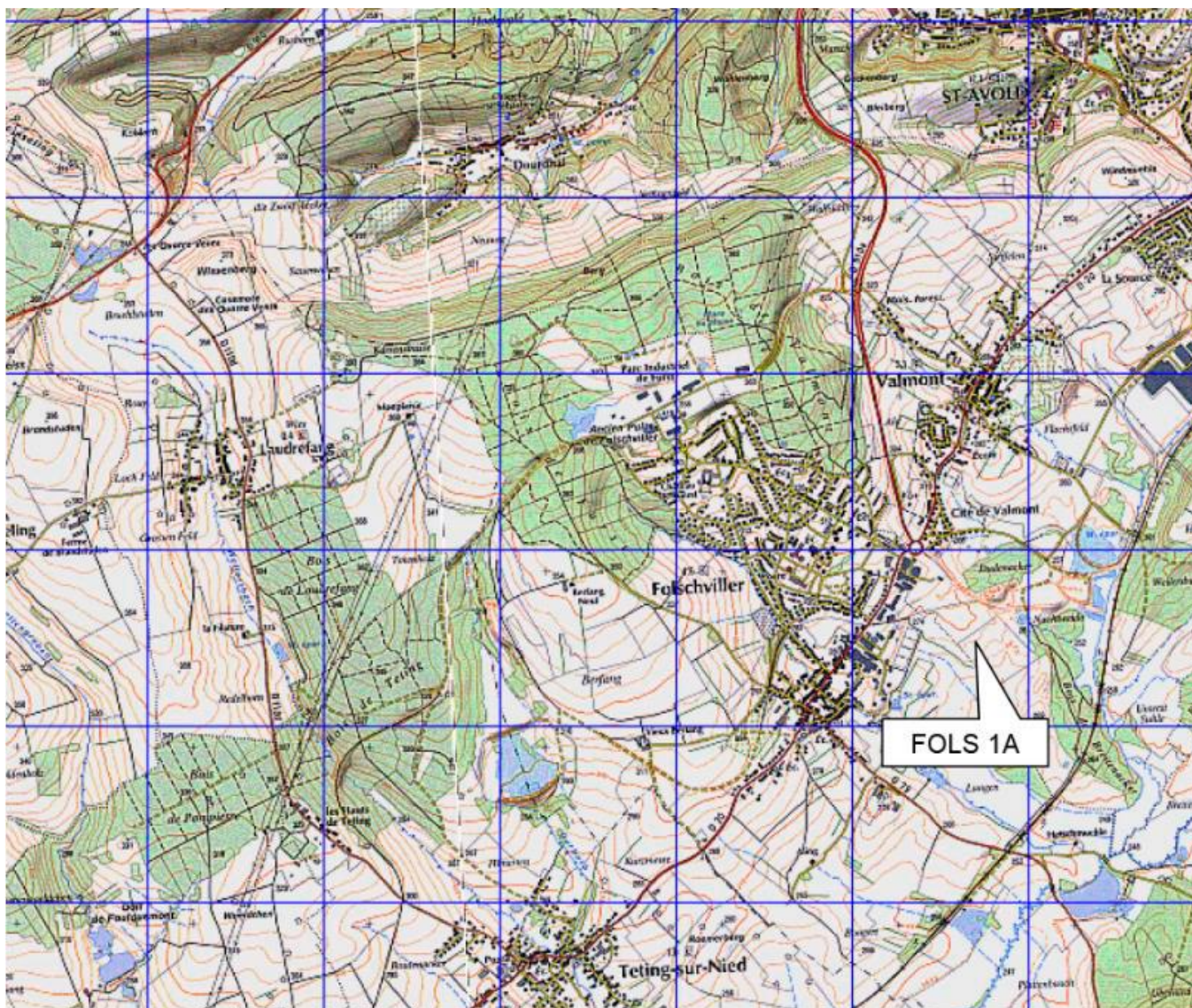


Рис. 1.1 – Оглядова карта району дослідження

## 1.2 Природно-кліматичні умови

В орографічному відношенні район дослідження являє собою рівнину. Максимальна відмітка місцевості не перевищує (+)387 м і відноситься до площинно-виражених водороздільних ділянок. Коливання абсолютних відміток рельєфу не перевищує 120 м.

Гідрографічна сітка представлена каналами Вельдерсбах, Фольшвіллер і Вальмонт та ускладнена водотоками, які в літній час пересихають.

## **2. ГЕОЛОГО-ГЕОФІЗИЧНА ВИВЧЕНІСТЬ РАЙОНУ РОБІТ**

### **2.1 Історія відкриття і розвідки родовища**

Східна частина Саар-Лотарингського вугільного басейну, яка містами виходить на денну поверхню у вигляді відслонень, відома ще з 15 століття від ручного видобутку в регіоні Саарбрюкен. З 19-го століття почалося дослідження басейну Саар (дослідники Messrs GUILLOT, DUHAMEL, BEAUNIER та CALMELET).

У 1853 році Е. Жако, головний інженер шахт у регіоні Мец, спостерігав деформації поверхні пересічної місцевості. Кілька років пошукових розвідок привели до відкриття і потім до експлуатації того, що сьогодні називають концесією Уйера Басейну Лотарингії.

У 1928 р. П'єр Сівіар проводив роботи на басейні, а потім П'єр ПАУВОСТ У 1934 р., який напише в 1934 році свої мемуари про геологію Саар-Лотарингського вугільного басейну, в яких було використано дані 318 свердловин.

Після Другої світової війни розвідка вугільних родовищ відновилася у Лотарингії, необхідність збільшення видобутку спонукала вугільні шахти до розвідки нових родовищ і розробки нових методик розвідки. Такий підхід привів, серед інших речей, до відкриття розширеної Мерлебахської антикліналі, що продемонструвало поглиблення Вестфальського розлому на північ від Лонжевіля та його поступового

підйому на північ. Зондування, проведені між 1946 р і 1956 р. привели до відкриття кількох вугільних родовищ [1].

У 1960-х роках франко-німецькі угоди про Варндт і проблеми реконверсії, яка послідувала за цим, призвела до значного збільшення обсягів розвідки вугільного басейну Лотарингії за сейсмічними дослідженнями, бурінням і дослідженнями на вже відомих родовищах. Ці дослідження привели до відкриття на глибині антикліналі Саймона, відкриття Вестфальського D у Фокмоні та відкриття родовища на схід від Фольшвіллера і на південь від Фолкемона.

У період з 1964 по 1967 рр. зосереджені пошуки вугільних пластів у Стефаніан призвів до відкриття родовища Фалька, а в 1967 році — до відкриття родовища Родовище Фольшвіллер.

З 1974 по 1979 роки було відкрито родовище Вернажу, Родовище Клерфонтен, родовища Маріно і Кошерен у Франції.

Кращі дані були отримані, зокрема завдяки сейсмічному аналізу з 1979 року, який дозволив краще зрозуміти складність басейну та тектоніку, яка впливає на нього.

У 1981 році Донсімоні здійснив синтез на басейні Лотарингії, де утворення басейну починається з насуву блоку зовнішньої герцинської кристалічної зоні на території Рено-Герцинської зони під час Судетської «вугільної фази» і утворює модель, яка характеризується розкриттям.

У 1993 році Хенк випустив нову модель в басейні Сарро-Лотарингії, де для нього басейн є структурованим у напівграбен і характеризується стисненням.

Пізніше було проведено кілька інших досліджень, наприклад, Fleck у 2001 «Співвідношення між органічною геохімією, седиментологією та сиквентною

стратиграфією для характеристики палеосередовища», Привалов Д. 2015, де було створено нову модель на основі тектоніки та седиментології.

У 2016 р. А. Ізарт провів дослідження «Моделювання теплової історії вугільного басейну Лотарингії кам'яновугільного періоду: наслідки для метану вугільних пластів». Проте наразі дослідники все ще працюють над створенням нових моделей для кращого розуміння геологічної обстановки.

## 3. ГЕОЛОГІЧНА БУДОВА РАЙОНУ РОБІТ

### 3.1. Стратиграфія

Стратиграфічна шкала басейну Лотарингії по суті (в основному) базується на трьох методах: палеоботаніці, палінології та тонштайнах.

#### Кам'яновугільний період

Вестфальська серія являє собою 4000 м моласових відкладів, ця серія містить сотню шарів вугілля різної товщини (від сантиметра до кількох метрів), пов'язаних з теригенними відкладами, що складаються з конгломератів, пісковиків і сланців, сірого кольору.

- Westphalian B в Лотарингії відповідає підшві Сен-Інгберта, яка містить відклади «Fais-ceau de Rothell».
- Westphalian C включає, з підшви до покринки, локально відомі шари «Зульцбах»

Відповідно, вестфальські стадії C і D складаються з трьох послідовностей третього порядку для вестфальського C і чотирьох послідовностей третього порядку для вестфальського D. Вестфальська серія складається з флювіальних конгломератів у нижній частині, потім йдуть послідовності високочастотних ланцюгів (потужність 10 м), що складаються з конгломератів і річкових пісковиків, палеозалишків, шарів вугілля та озерних аргілітів. Товщина вугільного шару вище (1 м до 10 м) від Вестфальського D у свердловині Фольшвіллер (рис. 3.1).

Серія Стефанієн відзначається конгломератами та нижньою частиною зони Готтерборн. Серія Стефанієн включає знизу вгору:

- Конгломерат Хольц.
- Область Готтерборна від червоного до зеленого.
- Сірий пласт Діллсбурга.
- Прошарок (пласт) Потцберга

Стефанієн бідний на вугілля - «0,5 %», включає грубі уламкові породи, які становлять понад 60 % родовищ - конгломерати, пісковики, дрібна фація представлена пелітами та псаммітами.

## **Перм**

Пермська серія представлена Autunian, який існує лише в Саарі (Saarland) в узгодженні зі Стефанієном червоних або сірих відкладів озерно-річкового походження потужністю 250 м, і Saxonian, який незгідно залягає на підстилаючих утвореннях.

Autunian та кам'яновугільний в Саарі і тільки кам'яновугільний у Лотарингії, включають дві серії осадових відкладів, що відмежовують/відділяють продукти інтенсивного вулканізму.

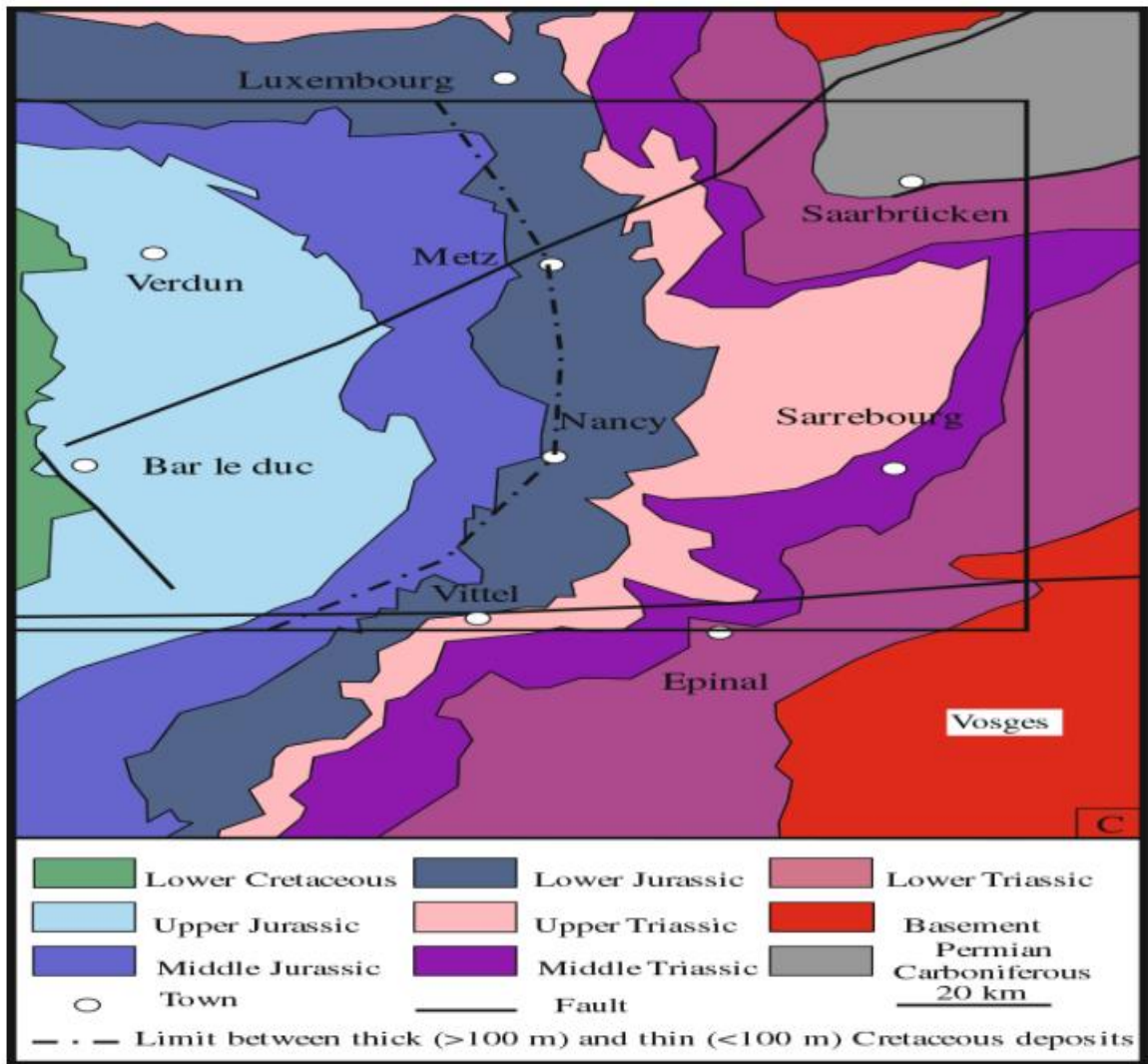


Рис. 3.1. Геологічна карта мезозойської ери (Izart et al 2016).

### Модель формування басейну Сарро-Лотарингії

Для пояснення еволюції басейну Сарро-Лотарингії дослідники запропонували кілька моделей. Майже всі ці моделі узгоджуються з намурсько-пермською еволюцією басейну, різниця між авторами полягає в інтерпретації певних тектонічних фаз, які присутні в басейні Лотарингії, але відсутні в басейні Сарра, а також в глобальному деформаційному режимі району.

Перша модель, запропонована Donsimoni (1981), узагальнює історію басейну за шістьма основними фазами, починаючи від нижнього карбону до верхньої пермі та тріасу.

Henk (1993) запропонував іншу модель басейну Саар-Нае, інтерпретуючи його як типову структуру напівграбена. Слід зазначити, що Donsimoni (1981) базувався у своєму дослідженні на французькій частині басейну, а Henk, (1993) — на німецькій частині басейну.

Привалов та ін., 2015 р. запропонували нову модель, враховуючи відмінності, які існують у попередніх моделях, і дуже чітко ґрунтується на тектонічному та осадовому аспекті. Далі представлено короткий виклад двох моделей, запропонованих Donsimoni (1981) і Henk, (1993), та моделлю Привалова та ін., 2015.

### **Модель Donsimoni та Henk**

Тектонічна модель басейну Лотарингії запропонована Donsimoni (1981) описується тим, що басейн Лотарингії утворився після надвигу блоку зовнішньої герцинської кристалічної зони на блок Рено-Герцинської зони під час судетської кам'яновугільної фази. Зовнішня кристалічна зона стала зоною депресії. Осідання пов'язується з взаємодією звичайних розломів у широкому контексті (Westphalian). В свою чергу осідання в басейні починається в період розширення в Намурі, а заповнення озерного середовища відбувається у Вестфальському регіоні, яке було поділено за «седиментологією, палінологією та палеоботанікою». Також модель має основні ідеї:

- Westphalian: басейн Лотарингії розширений, з не дуже активним тектонічним середовищем озерних відкладів; родовище важливих вугільних пластів.
- Вестфальське підняття басейну D (астурійська фаза).
- Вестфальський частковий вихід на поверхню та ерозія дають(призводять до утворення) конгломератів Хольца
- Диференціальне просідання відновлюється і впливає на басейн.
- Стефанієн незгідно залягає в Westphalian D, глибше озерне середовище, відсутність вугільних пластів, потім нижньопермські відклади.

В свою чергу тектонічна модель басейну Саар-Нахе запропонована Henk (1993) пояснюється тим, що структура басейну в напівграбені, розмежована зоною розломів зі складними рухами; Геометрія є результатом суперпозиції асиметричного рифтового басейну, утвореного в результаті обвалу підвісної стіни та виключає зсуви вздовж

розлому в Метці. Проте Синкінематичні утворення Variscan були утворені за допомогою правого ковзання (зсув). Також модель має основні ідеї:

- Зміщення по простяганню, що виникло під час Намурії, знаменує собою перехід між син-орогенним стисненням і пізнім орогенним розширенням.

- Під час Вестфальського періоду (А і В) осідання низьке, на улоговину впливає розширення на схід.

- Вестфальський (С і D) басейн контролюється гравітаційним колапсом ланцюга Варіскан (Variscan chain).

- Вестфальський D - ранній Стефаніанський басейн зафіксований фазою ерозії.

- З Стефаніану, на розпад орогену накладалася переорієнтація сил граничних плит, що пов'язана з правим переміщенням Північної Африки щодо Європи.

- Висяче крило деформується на системі розломів тенденції Пн.Зх.-Пд.Сх. та ортогональних нормальних розломів

- Обвал підвісного крила що, утворили нинішню конструкцію басейну [9].

### **Модель геодинамічної еволюції басейну Лотарингії за Приваловим**

Розвиток басейну він розглядає як асиметричний розведений ромбоподібної форми (рис. 3.2). Його нижній шар розглядається як мегаблок, облямований сегментами двох основних розломів, які ковзають (розривний рух).

Східна межа мегаблоку проведена вздовж підземної частини лістричного розлому Мец. Привалов зосередив увагу на басейноутворюючих процесах з особливим акцентом на розміщенні відкладів та деяких відмінних рисах складчастості та розломів, а також формування основних (головних) систем. Вугільний басейн Лотарингії містить потужну серію (5000 м) пісковиків, вугілля та глин, відкладених від міссісіпського: верхньовізейського і намурського (серпуховського) до пенсільванського: вестфальського та Стефанського. За Donsimoni (1981) седиментація почалася після судетської (намурійської) фази у вугільному басейні Лотарингії під час періоду розширення (рис. 3.3).

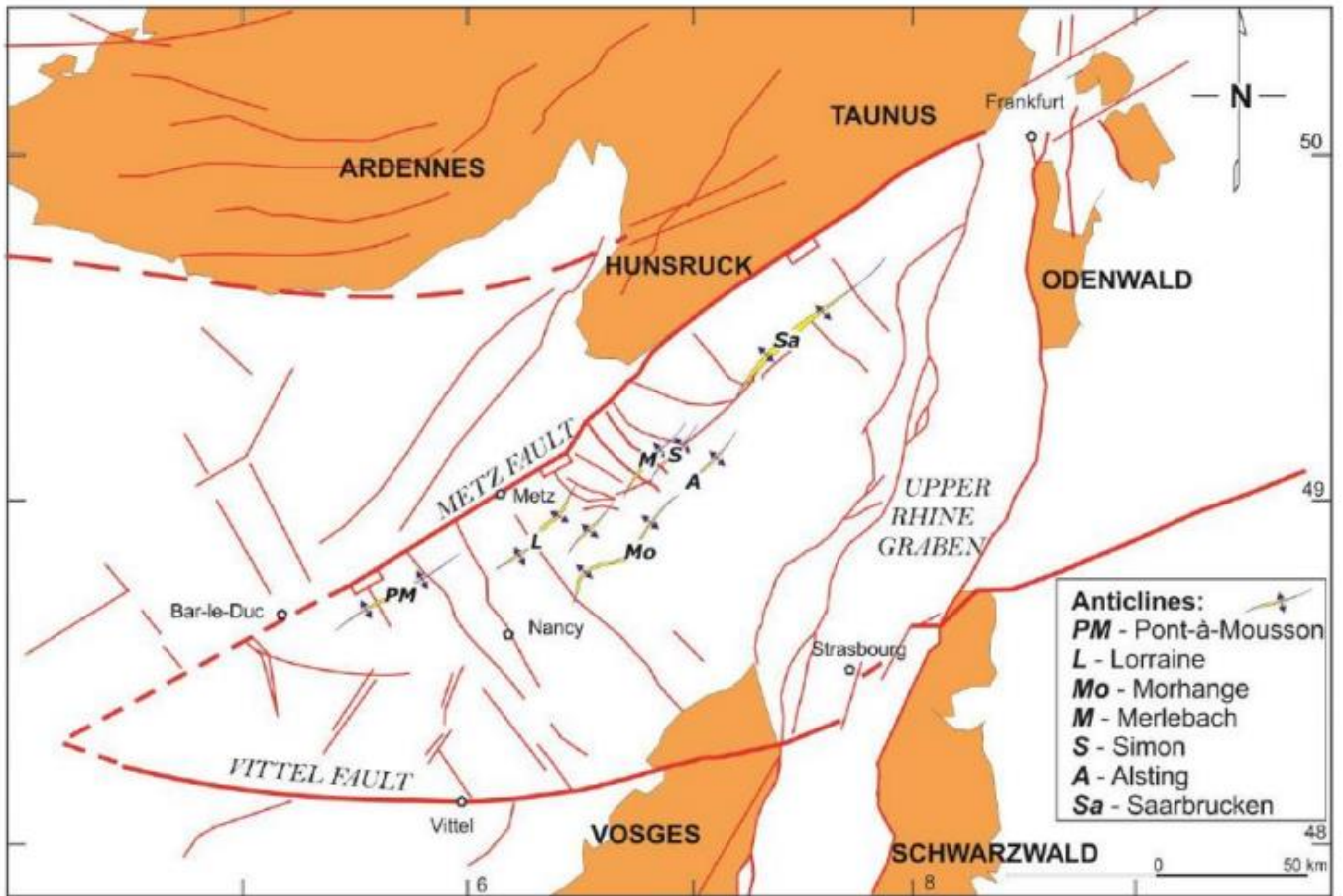


Рис.І. 3.2. Структурний каркас і тектонічні елементи басейну Лотарингія-Сар-Нає (Привалов Д. 2015)

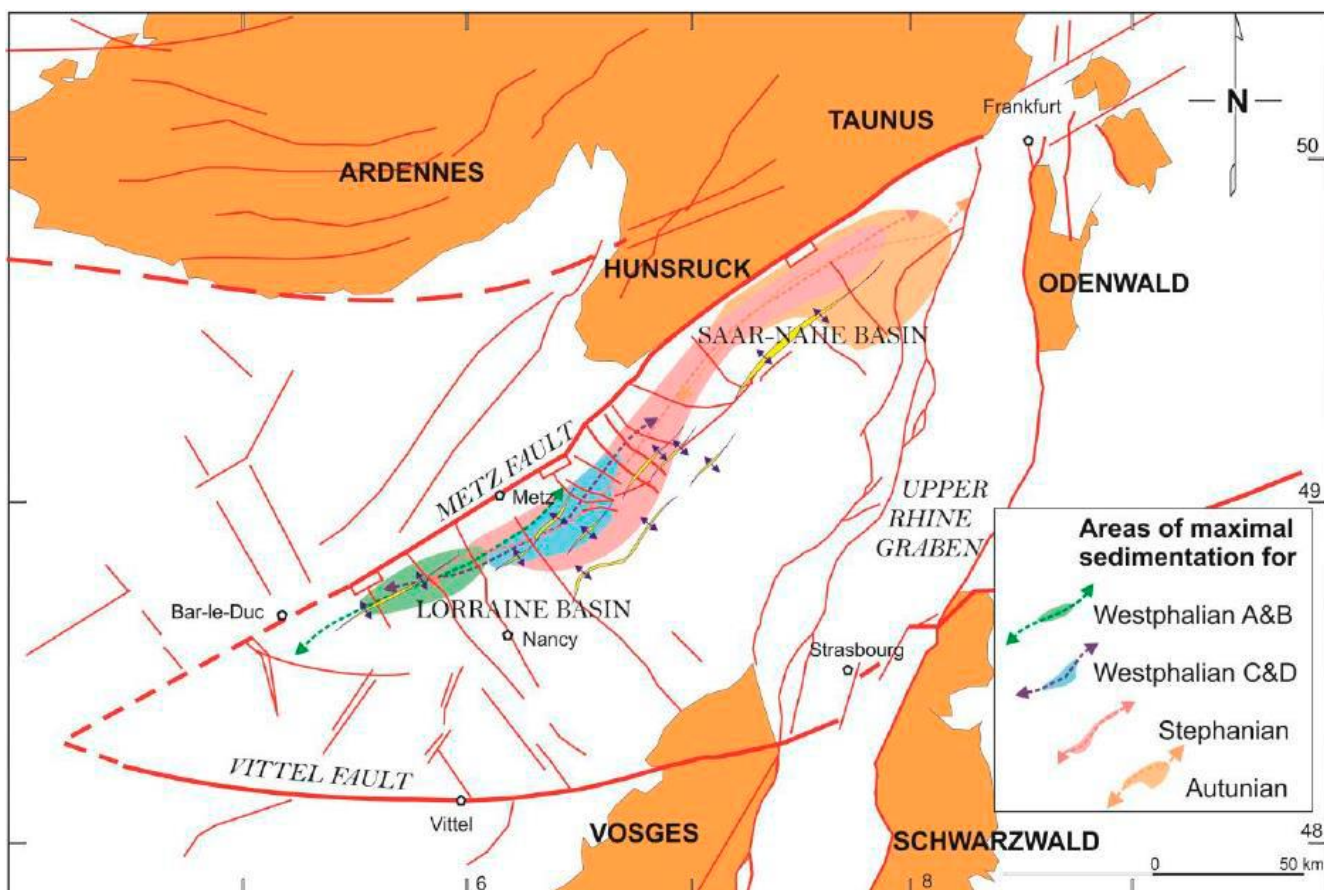


Рис. 3.3. Розподіл ділянок максимального осадконакопичення в басейні. (Привалов Д. 2015).

### Пізній візейський:

Перед-рифтова стадія, передрифтові відкладення відомі мілководними морськими карбонатами і силікокластикою. Відбулася поява ділянок правого зсуву. Наприкінці візейського періоду, транспресійна реактивація розломів мала місце, і в цьому випадку розширення було зосереджено в мегаблоці, в якому вісь стиснення стала вертикальною (Додаток А).

### Намурський:

Характеризується стадією син-рифту. За рахунок обертання проти годинникової стрілки осі стиснення у субширотному положенні в транспресійному режимі за межами басейну, було розпочато реактивацію розлому Мец. Це викликало

ініціювання обертання мегаблоку за годинниковою стрілкою під басейном Лотарингії-Саар з осіданням базальтового конгломерату вище залягаючих пластів (Додаток Б).

### **Вестфальський А, В і С (За Приваловим Д. 2016)**

Подальше обертання за годинниковою стрілкою мегаблоку під усім басейном і формування локальних середовищ, стиснення в басейні Лотарингії та розширення у басейні Саар був типовим для син-вестфальського рифту А, В і С.

- Обертання спричиняє відкладення за режимом розширення в Саарі
- Режим стиснення в Лотарингії
- Збільшення кута повороту, що спричиняє міграцію центральних відкладень на північний схід від розлому Мец (Додаток В).

### **Вестфальський Д (Привалов Д. 2016)**

Син-рифтова стадія, щогодинна ротація мегаблоку призвела до:

- Події згинання та зсуву
- Пов'язане формування первинної системи напруженості Пн.Зх.-Пд.Сх., ортогональної до осі згину та зсуву аналогічні Пн.Сх.-Пд.Зх.
- Підняття та ерозія, що спричинили утворення Мерлебахських конгломератів і пізніше гольцівські (стефанівські) конгломерати, які незгідно перекривають Вестфальський горизонт.
- Розширення та звичайні розломи відбулися у північно-східній частині Басейну Саар (Додаток Г).

### **Стефаніан-Автуніан (Привалов Д. 2016)**

Стадія син-рифту характеризується поновленням скачкових рухів уздовж основних широтних розломів. Це викликало:

- Розширення з дедалі ширшою тенденцією Пн.Сх. від басейну Лотарингії до

басейн Саар.

➤ Син-осадові нормальні розломи утворюються в основному при річковому Осадконакопиченні (Додаток Д)

### **Рання перм:**

Ранньопермський вулканічний син-рифтовий етап (Додаток Е) був започаткований транстенсійними переміщеннями уздовж великих широтних розломів. Це викликало поворот мегаблоку проти годинникової стрілки з новим спалахом локального стиснення в басейні Саар-Нахе.

Розлом Мец знову активується як звичайний розлом, при якому виникла низка нових нормальних розломів занурюючись на Пн.З. і проникаючи в до-Карбоновий інтервал, який виник неподалік (Додаток Е).

### **Рання - пізня перм:**

Стадія інверсії та великої ерозії, синістральні транспресійні рухи вздовж основних широтних розломів спричинили перетворення розриву мегаблоків в структуру з домінуючим режимом рухів вгору.

Розкриття тріщин пов'язане з вторинним зсувом системи паралельно розлому Мец. Інтенсивне підняття зосереджено переважно в районі, що прилягає до загону Меца з ерозією призвело до руйнування незаповнених конструкцій (Додаток Є).

### **Еволюція басейну Лотарингії від середньої пермі до сьогодення**

Вестфальські, Стефанські та Аутунські відклади зазнають деформації на протязі Саальської фази, що характеризується герцинською складчастістю, яка призведе до утворення Пн.Сх.-Пд.Зх. антиклінорій (середня перм). Ця фаза Сааліанської компресії менш виражена в Лотарингії або просто немає прямих доказів причетності стефанівських шарів до перекриття або складчасті конструкції.

За фазою складчастості слідує дві ерозійні фази, перша у верхній пермі і остання фаза в тріасі. Після епізоду ерозії після варисканського орогенезу, протягом тріасу, ця територія була характеризована континентальними відкладами пісковиків з

Бунцандштайна, потім морським вапняком з Мушелкалка і, нарешті, лагунні відклади з солі «Кеупера».

Для юрського періоду характерна морська седиментація. Протягом верхнього Берріасу та верхнього Апту виділяють дві фази: фаза спливу та фаза ерозії; вони пов'язані з евстатичним падінням рівня моря що відбулися в басейні.

У кайнозої остаточно виникла східна окраїна басейну і зазнала вивітрювання та ерозії, що дозволило поступово ексгумувати Юрський і Тріасові відклади [1].

## 4. ФІЗИКО-ГЕОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПОСТАНОВКИ ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Об'єкти дослідження

Основною передумовою постановки дослідження петрофізичних властивостей цільових пластів свердловини Фольшвіллер 1А була наявність геофізичних аномалій на каротажних діаграмах свердловини. Найбільш контрастні аномалії представлені в теплових, радіоактивних, пружних та механічних властивостях. Тому об'єктами цільового дослідження були породи (Табл. 4.1) , які мали характерні геофізичні властивості.

Саме вугільні пласти і створюють геофізичні аномалії на кривих ГДС (Рис. 4.1 ). Таким чином вугільний пласт в інтервалі глибин 1190-1180 м чітко виражає зменшення на кривій ГК – до 60 GAPI, що дійсно відповідає традиційним значенням вугілля. Також на кривих опору вугільні інтервали мають аномальне зростання до 400 – 450 Ом, що пояснюється високим вмістом органічної речовини. Традиційно, швидкість поздовжніх хвиль в таких інтервалах є меншою ніж в сусідніх інтервалах глини та сланців, для вугілля вона змінюється в межах 2000-2400 м/с.

Також на кривих чітко прослідковується інтервал 1169-1151 м, який також відповідає інтервалу вугілля. Крива гамма-каротажу має аномально низькі значення в 30-40 GAPI, аномально високий опір – 550 Ом та швидкість поздовжніх хвиль до 2000-2200 м/с. Все це пояснюється високим вмістом органічної речовини, яка впливає на значення радіоактивності та опору. Поровий простір у вугільних зразках представлений в основі тріщинами, що знижує швидкість проходження акустичних хвиль. Також варто зауважити, що значення кавернометрії в інтервалі глибин 1155-

1150 збільшуються від 100 до 130 мм, що може свідчити про наявність сильно тріщинуватих вугільних пластів.

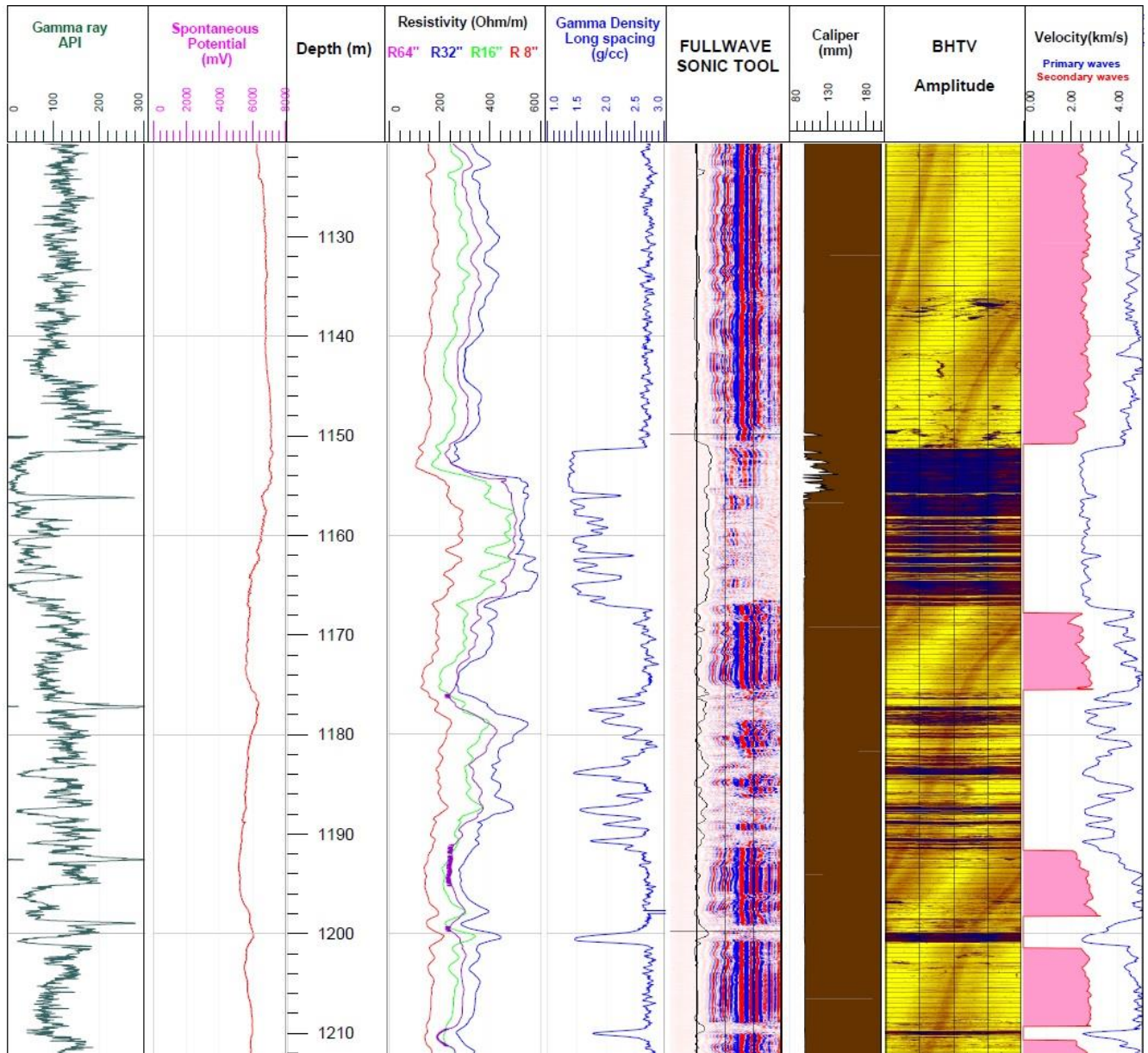


Рис. 4.1 Фрагмент планшету кривих ГДС інтервалу петрофізичних досліджень (1200-1140 м)

## 4.2 Результати лабораторних вимірювань

Результати серії лабораторних вимірювань агреговані у таблиці 4.1

Кожен зразок був відразу описаний по літологічним ознакам та віднесений до відповідної групи. На протязі дослідження використовувалося 5 типів: конгломерати, пісковики, глини, сланці, вугілля (Табл 4.1).

Обсяг всієї вибірки – 212 зразків. Конгломерати – 8 зразків, пісковики – 36 зразків, глини – 53, сланці – 90, вугілля - 25

Таблиця 4.1. Основні петрофізичні характеристики досліджених інтервалів на території дослідження

№	Глибина (нижня частина), м	Глибина (верхня частина), м	Довжина, м	Глибина вимірювань, м	Діаметр, м	Vp (м/с)	Час (μs)	Vs (м/с)	Час(μs)	Vp/Vs	Проникність, mD	Замітки (проникність)	TC (термічна провідність)	TD (термічна дифузійність)	Літологія	Опис
F122_1	1200.8	1200.44	0.36	1200.78	0.063	5207	12.1	2490	25.3	2.09116	0.032		3.672	1.574	Claystone	1 Cl with minor OM layers
				1200.62		5122	12.3	2520	25	2.03254	0.061		3.402	1.888	Claystone	2 Cl measur point is on OM layer
				1200.46		5294	11.9	2603	24.2	2.03381	0.013		4.104	2.102	Claystone	3 layers with ciderite incl
F122_2	1200.44	1200.18	0.26	1200.41	0.063	5207	12.1	2490	25.3	2.09116			3.215	2.078	Claystone	1 Cl OM-ciderite layers
				1200.32		5207	12.1	2471	25.5	2.10724	0.024		3.214	2.573	Claystone	Cl Om-ciderite layers
				1200.23		5207	12.1	2510	25.1	2.0745			3.003	2.106	Claystone	Cl Om-ciderite layers
F122_3	1200.18	1200.15	0.03	1200.16	0.063	5250	12	2520	25	2.08333	0.081	rough sur	3.518	1.448	Claystone	Cl with plants inclusions
F122_4	1199.8	1198.92	0.88													Crushed coal
F122_5	1198.92	1198.8	0.12	1198.85	0.063	952	66.2	502	125.5	1.89641	13.9		0.384	0.492	Coal	1 C pretty fractured
F122_6	1198.77	1198.66	0.11	1198.71	0.063	560	112.5				11.1		0.284	0.439	Coal	1 C-S with vertical fractures of ciderite and big open (empty) fractures
F122_7	1198.66	1198.55	0.11	1198.6	0.063	182	346.9				37.7		0.322	0.389	Coal	1 C-S with bunch of fractures and ciderite layers
F122_8	1198.55	1198.48	0.07	1198.5	0.063	767	82.1				29.2		0.335	0.375	Coal	1 C-S notable S layers and vertical ciderite layers
F122_9	1198.39	1198.36	0.03	1198.38	0.063	692	91								Shale	1 S-C very fractured
F122_10	1198.31	1198.18	0.13	1198.29	0.063	5294	11.9	2775	22.7	1.90775	8.2		3.075	2.321	Shale	1 S with light layers (cid)
				1198.23		5207	12.1	2772	23.1	1.87843	0.037		2.141	1.523	Shale	2 S with darker layers (OM) and very thin coal layers
F122_11	1198.18	1198.12	0.06	1198.13	0.063	5122	12.3	2625	24	1.95124	0.043	coal layer	1.898	1.168	Shale	1 S with light-dark layers
F122_12	1198.12	1197.93	0.19	1198.05	0.063	4315	14.6	2480	25.4	1.73992	3	Coal-cide	2.873	2.064	Shale	1 S meas point is straight on coal-ciderite layer
				1197.94		5081	12.4	2625	24	1.93562	0.519		2.823	2.218	Shale	2 S very solid interval on the side of sample is coal layer
F122_13	1197.93	1197.89	0.04	1197.91	0.063	4846	13	2510	25.1	1.93068	0.014		2.667	1.305	Shale	1 S very solid with dark layers
F122_14	1197.72	1197.68	0.04	1197.69	0.063	4315	14.6	-			0.387		1.844	0.924	Shale	1 S solid with minor coal layers

№	Глибина (нижня частина), м	Глибина (верхня частина), м	Довжина, м	Глибина вимірювань, м	Діаметр, м	Vp (м/с)	Час (μs)	Vs (м/с)	Час(μs)	Vp/Vs	Проникність, мD	Замітки (проникність)	ТС (термічна провідність)	TD (термічна дифузійність)	Літологія	Опис
F107_6	1144.68	1144.58	0.1	1144.65							0.044				Sandston	sequence of OM layers
F107_7	1144.58	1144.25	0.33	1144.52		4846	13	2490	25.3	1.94618	0.034		3.884	2.174	Sandston	almost homo int
				1144.4		4884	12.9	2669	23.6	1.8299	0.025		3.646	2.061	Sandston	"transition zone", meshed bedding
				1144.34		5250	12	2551	24.7	2.05802	0.08		3.497	2.013	Sandston	Om int, point is on coal layer, very good remaining of plants at top
F107_8	1144.25	1143.86	0.39	1144.18		4884	12.9	2571	24.5	1.89965	0.05		3.302	1.577	Sandston	very good plant remainings at bot, sequenced int with OM-SS
				1143.98		4884	12.9	2490	25.3	1.96145	0.03		3.541	1.814	Sandston	almost homo OM layer
F107_9	1143.6	1143.42	0.18	1143.54		4846	13	2520	25	1.92302	0.05		3.712	1.689	Sandston	dark layered OM int
				1143.46		4599	13.7	2461	25.6	1.86875	0.065		3.89	2.09	Sandston	homo SS int
F107_10	1143.42	1143.25	0.17	1143.33							0.097				Sandston	net of OM layers
F106_1	1141.4	1141	0.4	1141.25	0.063	4532	13.9	2423	26	1.87041	0.148		4.211	2.726	Sandston	gs homo int
			0	1141.07		4375	14.4	2480	25.4	1.76411	0.088		3.924	2.687	Sandston	ms homo
F106_2	1141	1140.85	0.15	1140.94							0.04				Sandston	ms homo
F106_3	1140.85	1140.72	0.13	1140.79							0.052				Sandston	ss, homo
F106_4	1140.25	1140	0.25	1140.12							0.062				Sandston	ss, homo
F106_5	1140	1139.89	0.11	1139.94							0.059				Sandston	ms homo
F106_6	1139.79	1139.59	0.2	1139.7		4737	13.3	2351	26.8	2.01489	0.274		3.573	2.374	Sandston	om layer
				1139.63		3938	16	2211	28.5	1.78109	0.066		3.699	2.364	Sandston	ss, homo
F106_7	1139.66	1139.14	0.52	1139.55							0.089				Sandston	ss, homo
				1139.36							0.139				Sandston	ss, om layer
				1139.19							0.102				Sandston	om int
F106_8	1139.14	1138.72	0.42	1139.02		4375	14.4	2432	25.9	1.79893	0.09		4.256	2.142	Sandston	ms homo
			0	1138.85		4884	12.9	2636	23.9	1.85281	0.07		4.019	1.518	Sandston	ss

### 4.3 Результати петрофізичного аналізу

Після обробки отриманих результатів наступним етапом був їх аналіз шляхом візуалізації через побудову крос-плотів, розподілу точок по літологіям і тд. Таким чином на Рис. 4.2 наведено один з прикладів загального розподілу параметру швидкості поздовжніх хвиль ( $V_p$ ) та коефіцієнту проникності. В даному випадку чітко виділяються зразки вугілля з швидкостями до 1000 м/с та проникністю більше 10 мД (Рис. 4.2).

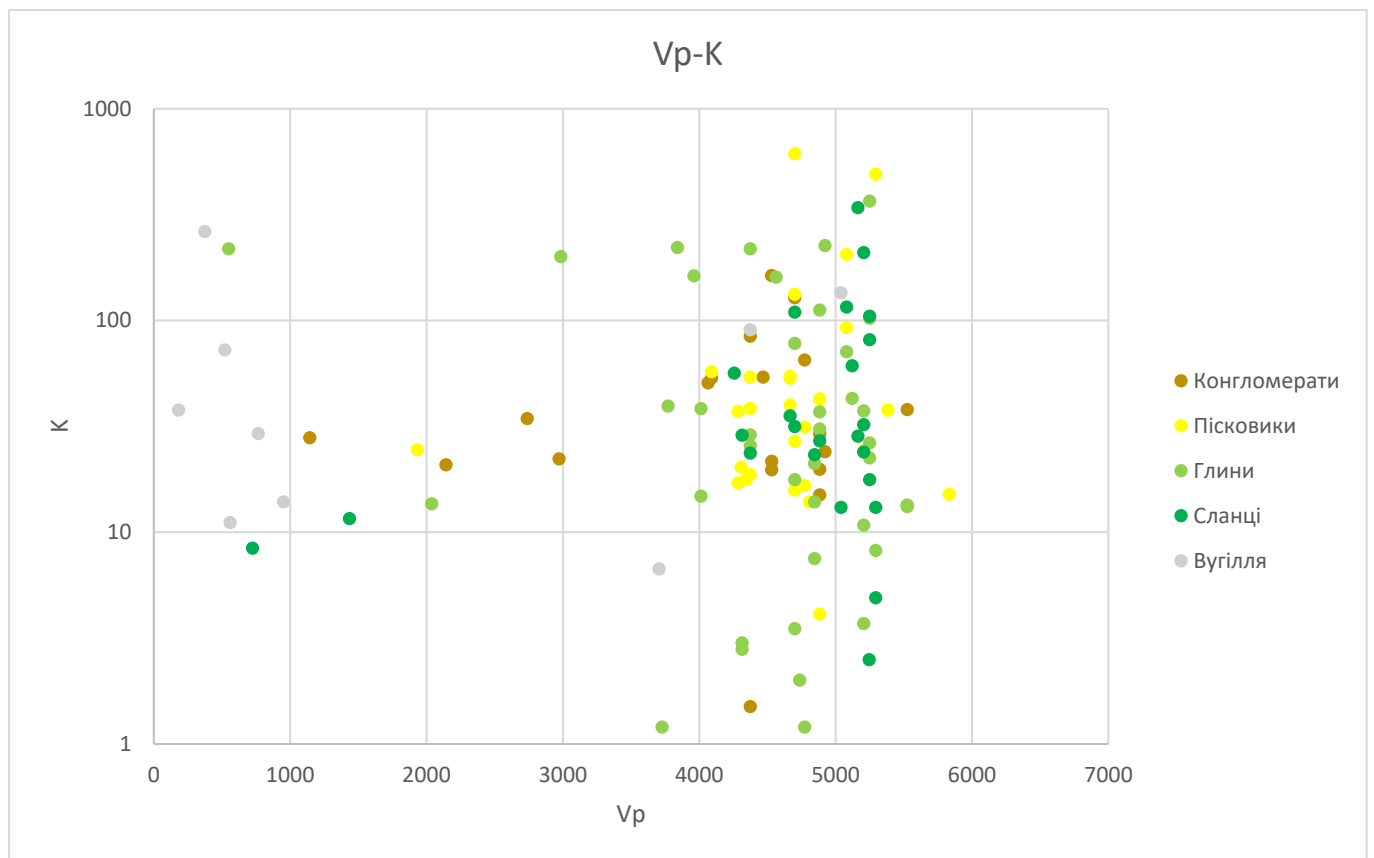


Рис. 4.2. Точковий графік розподілу значень поздовжніх хвиль ( $V_p$ ) та проникності ( $K$ ) відповідно до описаних літологічних груп

На рис. 4.3 пояснюється залежність швидкості поздовжніх хвиль ( $V_p$ ) та швидкості поперечних хвиль ( $V_s$ ). У конгломератах середнє значення  $V_p$  становить 4100 м/с та 2300 м/с для  $V_s$ . Коефіцієнт детермінації – 0,85 показує високу залежність між параметрами. Зразки конгломератів було сильно зцементовані та місцями розмір зерен досягав 2 см у діаметрі. Природних тріщин не спостерігалось, що позитивно вплинуло на сильний акустичний сигнал при вимірюваннях.

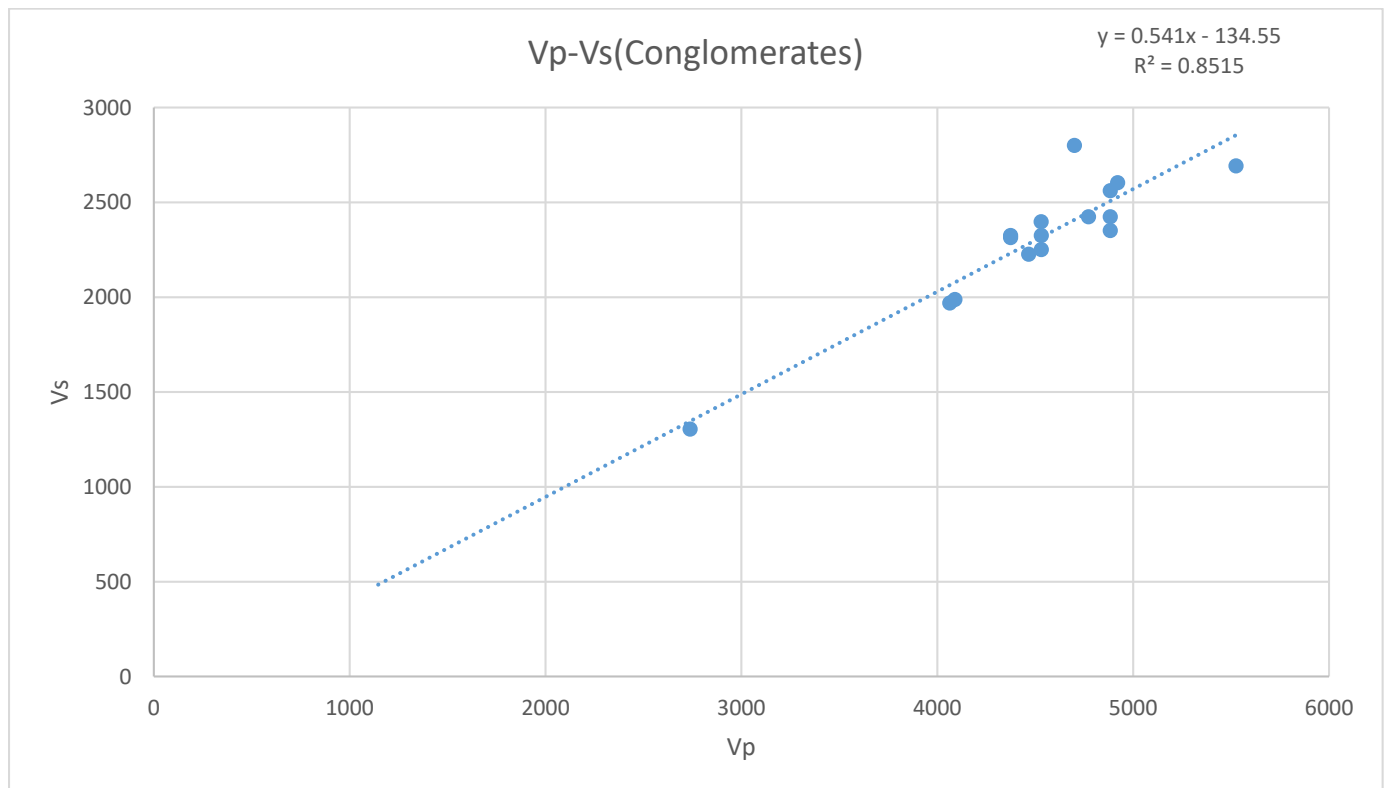


Рис. 4.3 Графік залежності значень швидкості поздовжніх хвиль ( $V_p$ ) та швидкості поперечних хвиль ( $V_s$ ) у зразках конгломератів

У пісковиках середнє значення  $V_p$  становить 4680 м/с та 2500 м/с для  $V_s$  (Рис. 4.4). Коефіцієнт детермінації – 0,51 показує не високу залежність між параметрами через те, що зразки пісковиків часто вміщували включення вугільних пропластків, які місцям

сягали товщини в 5 мм, що негативно впливало на акустичні швидкості та сигнал в цілому.

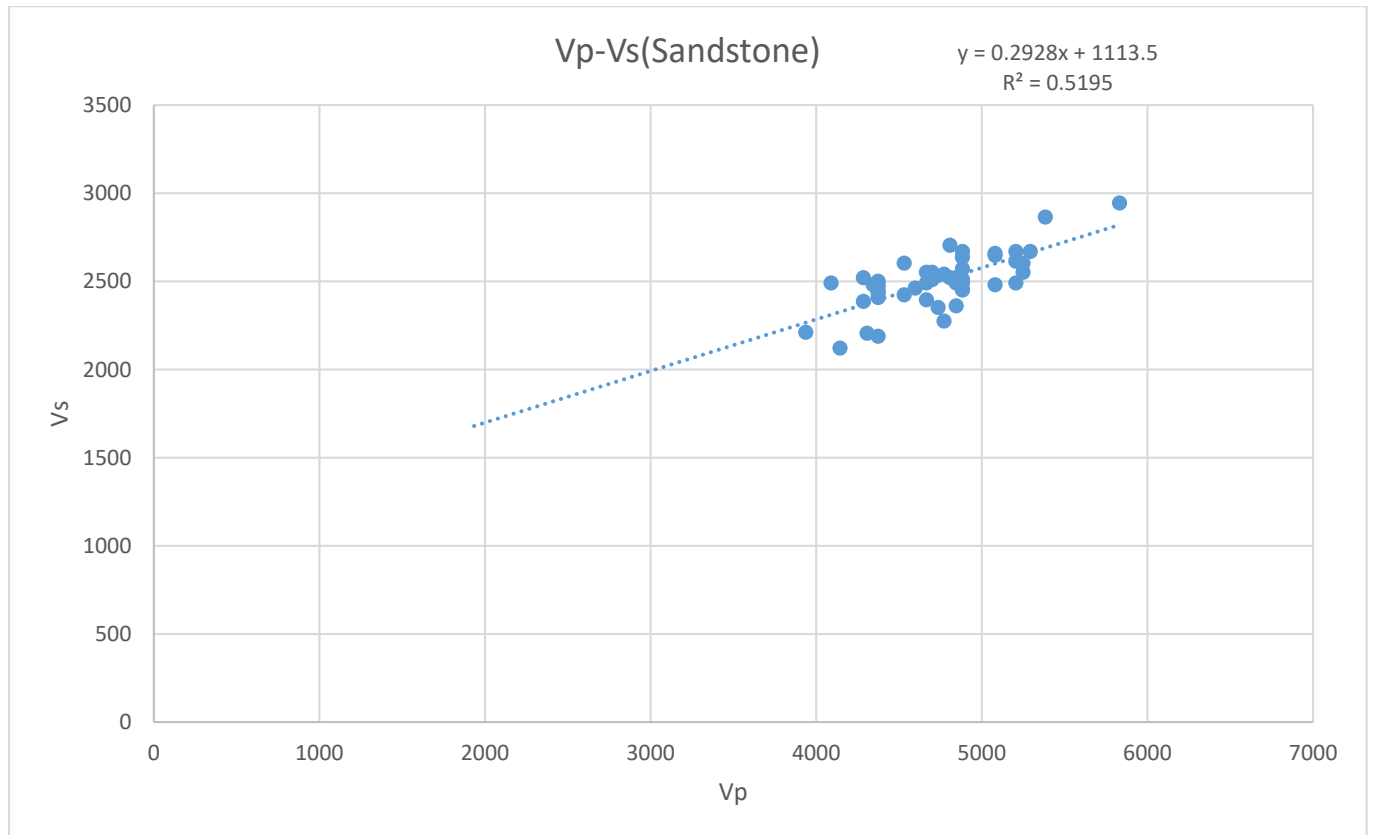


Рис. 4.4 Графік залежності значень швидкості поздовжніх хвиль ( $V_p$ ) та швидкості поперечних хвиль ( $V_s$ ) у зразках пісковиків

У глинах середнє значення  $V_p$  становить 4580 м/с та 2500 м/с для  $V_s$  (Рис. 4.5). Коефіцієнт детермінації становить 0,89 показує на високу залежність між параметрами через те, що зразки глин часто демонстрували сильний сигнал, що дало можливість отримати максимальну точність вимірювань. Певні зразки мають включення вугільних пропластків, які місцям сягали товщини в 1 см та інколи палеонтологічні рештки рослин та організмів.

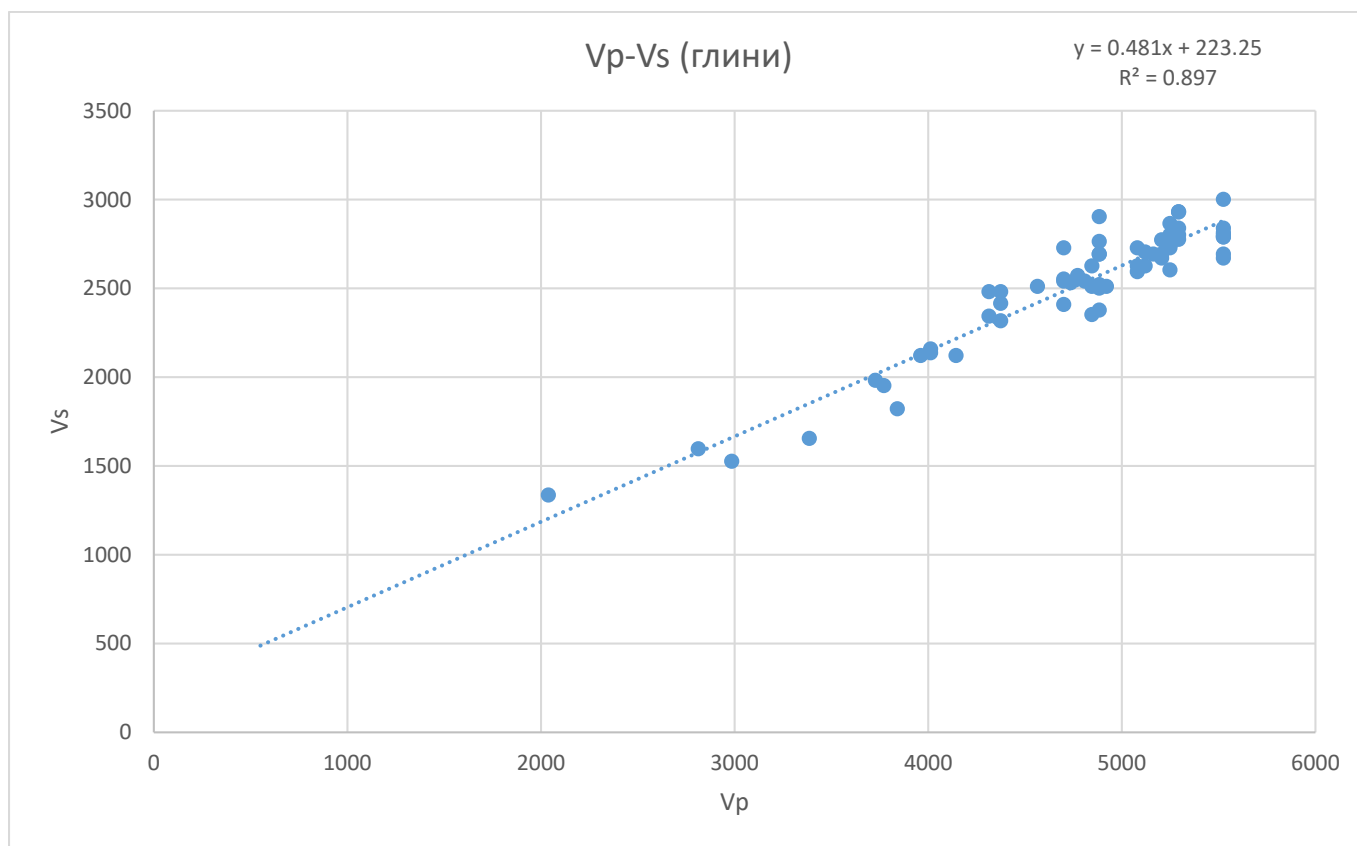


Рис. 4.5. Графік залежності значень швидкості поздовжніх хвиль ( $V_p$ ) та швидкості поперечних хвиль ( $V_s$ ) у зразках глини

У сланцях середнє значення  $V_p$  становить 4640 м/с та 2419 м/с для  $V_s$  (рис. 4.6). Коефіцієнт детермінації становить 0,88 та показує на високу залежність між параметрами. Зразки сланців часто вміщували органічні рештки, вугільні пропластки (товщиною до 2 см) та сидеритові шари, що місцями зцементувало тріщинуваті інтервали вугілля та сланців.

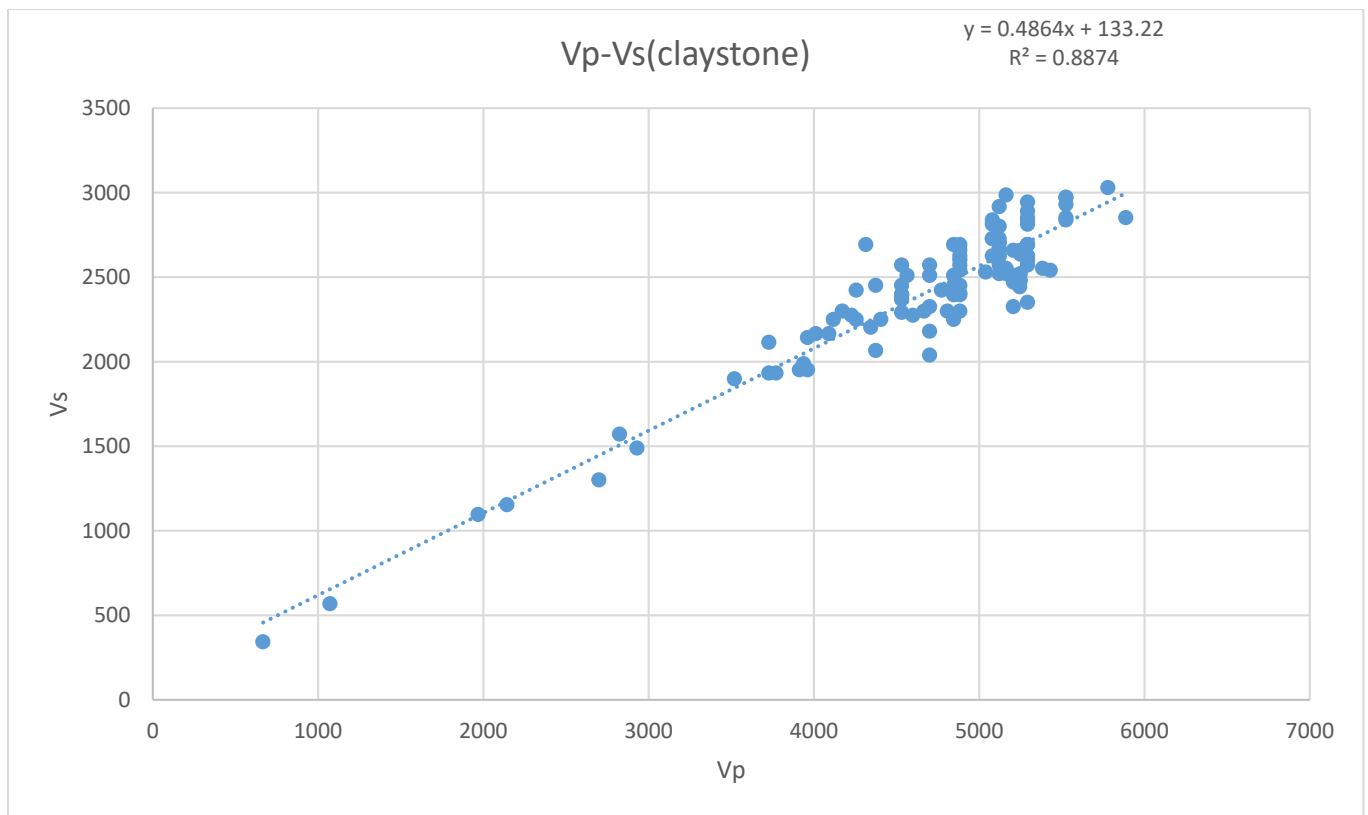


Рис. 4.6. Графік залежності значень швидкості поздовжніх хвиль ( $V_p$ ) та швидкості поперечних хвиль ( $V_s$ ) у зразках сланців

У вугільних зразках середнє значення  $V_p$  становить 2135 м/с та 1568 м/с для  $V_s$  (Рис. 4.7). Коефіцієнт детермінації становить 0,99 та показує на максимальну залежність між параметрами. Зразки вугілля дуже сильно коливаються від ступеня тріщинуватості, густини та наявності включень сланцевих пропластків. Часто включення сланців і вплинули на підвищення швидкостей акустичних хвиль [7].

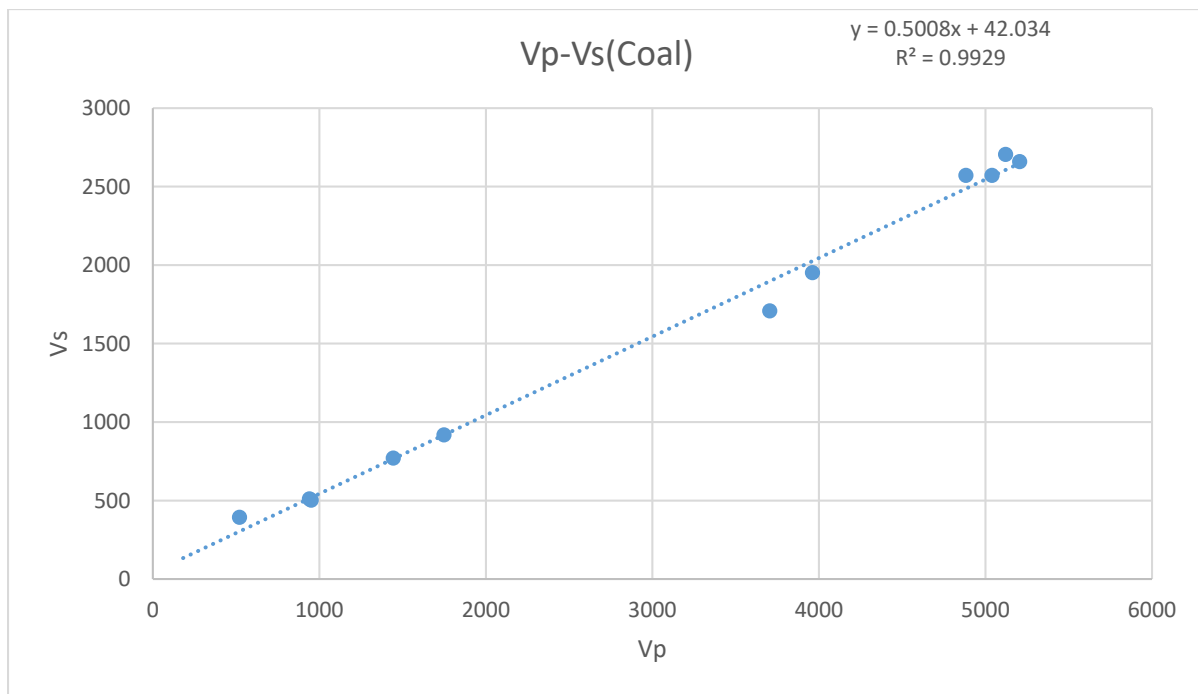


Рис. 4.7. Графік залежності значень швидкості поздовжніх хвиль ( $V_p$ ) та швидкості поперечних хвиль ( $V_s$ ) у зразках вугілля

На Рис. 4.8 залежності значень термічної дифузійності ( $TD$ ) та швидкості поздовжніх хвиль ( $V_p$ ) у зразках сланців. Тільки на зразках сланців та вугілля спостерігалася певна залежність на графіках такого роду. У сланцевих зразках середнє значення термічної дифузійності становить  $1,70 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$ . Коефіцієнт детермінації становить  $0,31$  та вказує на слабку залежність між параметрами. В даному випадку мінімальні значення  $TD$  та  $V_p$  пояснюються присутністю вугільних пропластків та включень в зразках сланців. Вугільні включення часто є тріщинуватими, що сповільнює проходження акустичних хвиль.

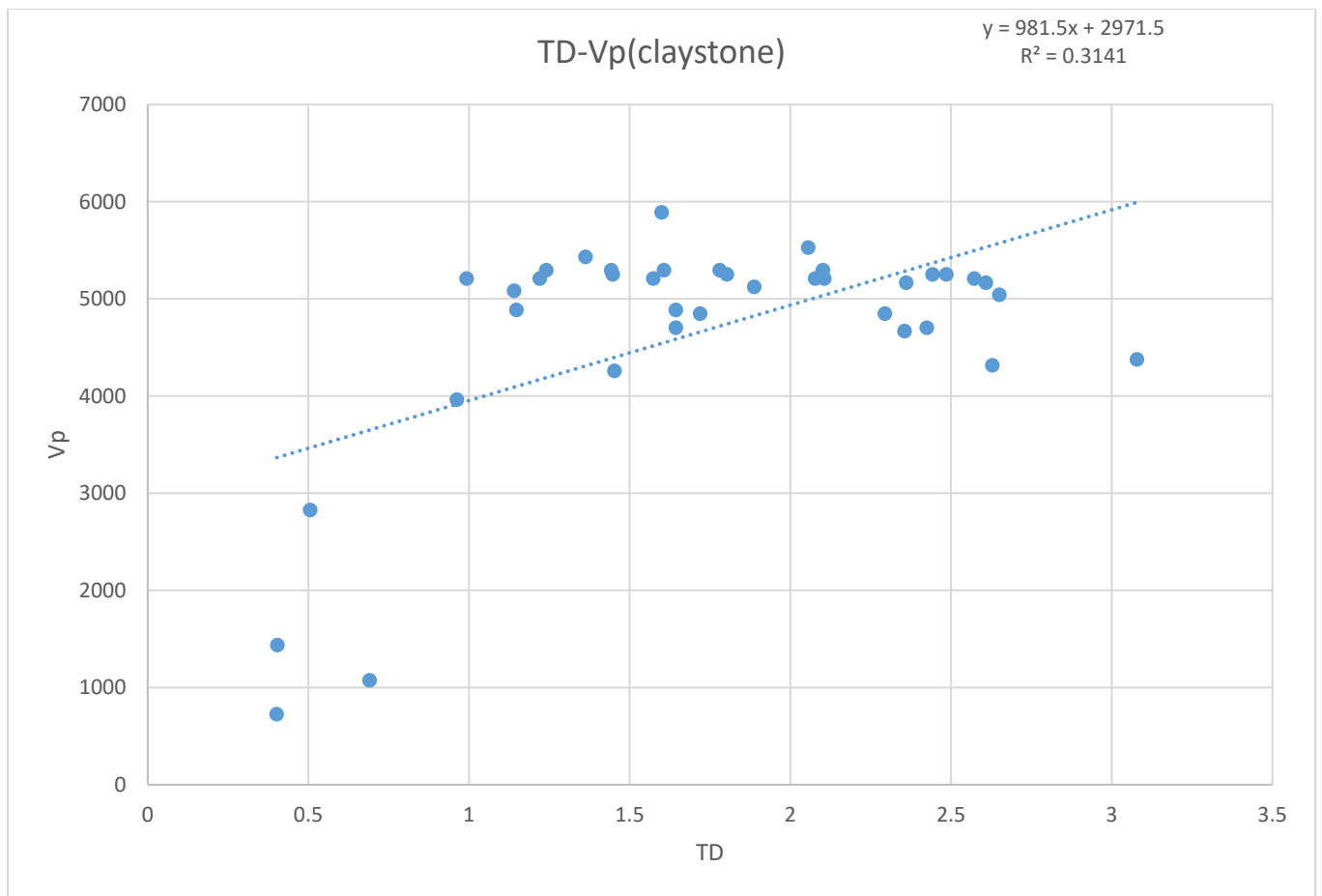


Рис. 4.8. Графік залежності значень термічної дифузійності (TD) та швидкості п хвиль (Vp) у зразках сланців

На Рис. 4.9 залежності значень термічної провідності (TC) та швидкості поздовжніх хвиль (Vp) у вугільних зразках. У зразках середнє значення термічної провідності становить 0,659 Вт/м\*К. Коефіцієнт детермінації становить 0,59 та вказує на присутність певної залежності між параметрами. Це пояснюється тим, що у вугільних пластах часто зустрічаються пропластки сланців, які мають більші значення швидкостей акустичних хвиль та більші значення термічної провідності. В даному випадку мінімальні значення TC та Vp окреслюють зразки з максимальним вмістом чистого вугілля, тобто швидкості до 1500 м/с та TC близько 0,5 Вт/м\*К. Вугільні зразки,

які вміщують включення сланців збільшують швидкості максимум до 5200 м/с та значення термічної провідності до 3 Вт/м\*К.

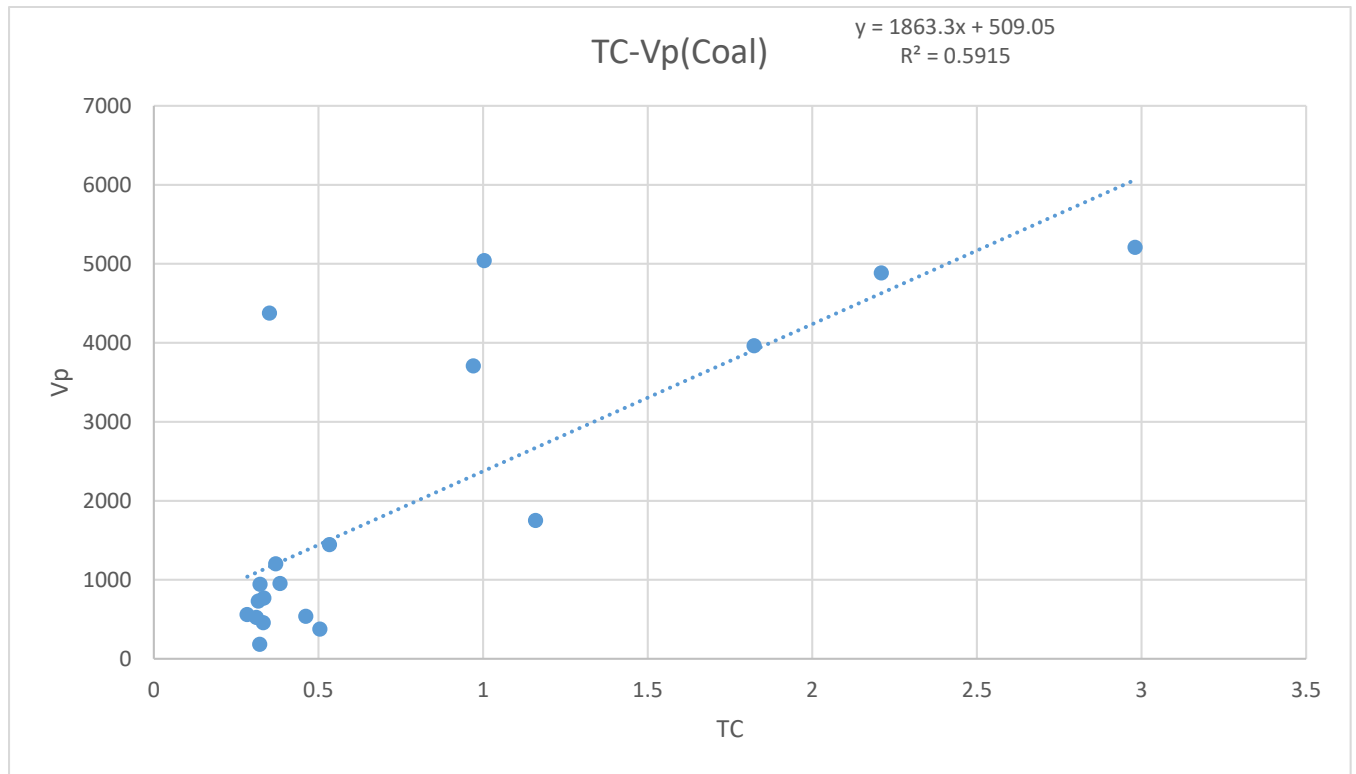


Рис. 4.9. Графік залежності значень термічної провідності (TC) та швидкості поздовжніх хвиль (Vp) у зразках вугілля

На Рис. 4.10 залежності значень термічної дифузійності (TD) та швидкості поздовжніх хвиль (Vp) у вугільних зразках. У зразках середнє значення термічної дифузійності становить 0,611 Вт/м\*К. Коефіцієнт детермінації становить 0,64 та вказує на присутність залежності між параметрами. Це пояснюється, як і у попередніх випадках, тим, що у вугільних пластах часто зустрічаються пропластки сланців, які мають більші значення швидкостей акустичних хвиль та більші значення термічної дифузійності. В даному випадку мінімальні значення TD та Vp окреслюють зразки з

максимальним вмістом чистого вугілля, тобто швидкості до 1500 м/с та TD близько 0,5 Вт/м\*К. Вугільні зразки, які вміщують включення сланців збільшують швидкості максимум до 5200 м/с та значення термічної дифузійності до 2 Вт/м\*К.

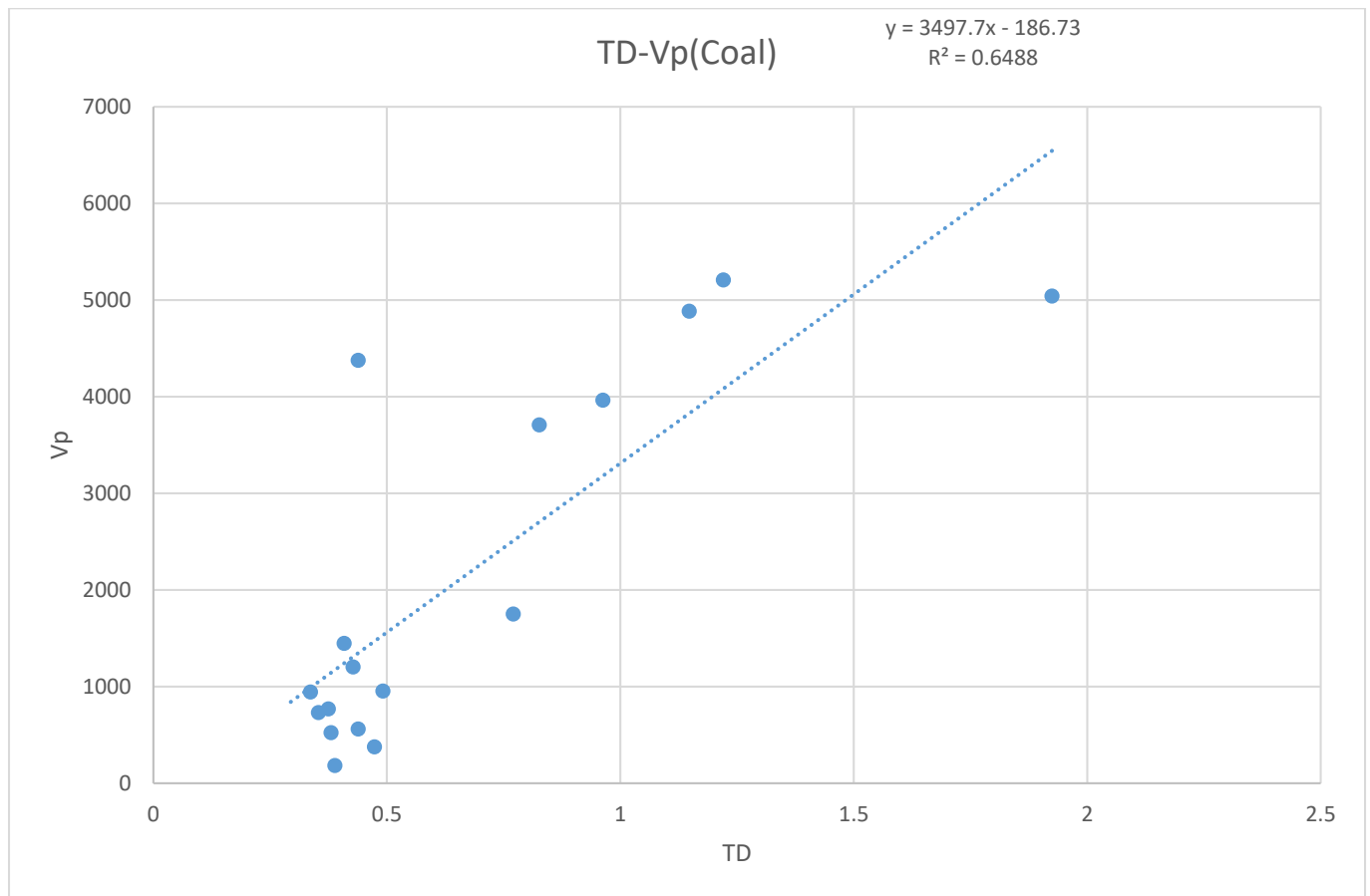


Рис. 4.10 Графік залежності значень термічної дифузійності (TD) та швидкості поздовжніх хвиль (Vp) у зразках вугілля

## 5. МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНИХ ПЕТРОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

До комплексу петрофізичних досліджень входили наступні методи:

1. Поздовжні акустичні хвилі
2. Поперечні акустичні хвилі
3. Термічна провідність
4. Термічна дифузійність
5. Проникність

Всього досліджено 212 зразків.

Відомості про виконаний обсяг петрофізичних досліджень наведені в таблиці 5.1.

**Таблиця 5.1** – Вивченість зразків петрофізичними методами

№ п/п	Вид дослідження
1	Поздовжні акустичні хвилі
2	Поперечні акустичні хвилі
3	Термічна провідність
4	Термічна дифузійність
5	Проникність

1. Метод визначення швидкості поздовжніх акустичних хвиль виконувався на апаратурі Pundit (Рис. 5.1). За акустичними даними проводилось уточнення літології,

гомогенності або гетерогенності зразка, розчленування та кореляція розрізу по площі, виділялись породи-колектори за якісними ознаками.

2. Вимірвальна схема проведення акустичних параметрів (рис. 5.1)

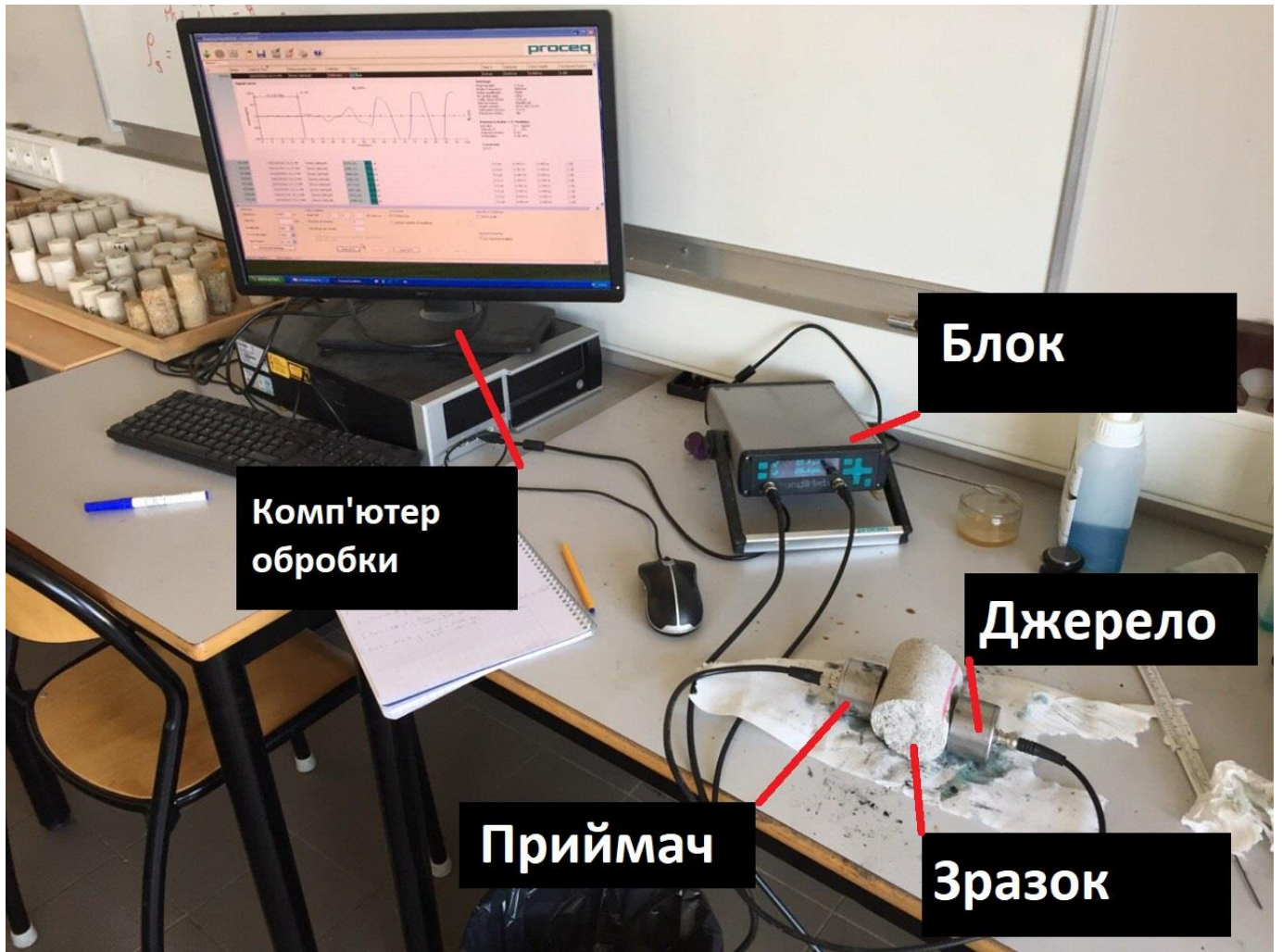


Рис. 5.1 Апаратура для проведення акустичних досліджень

3. Метод визначення швидкості поперечних акустичних хвиль виконувався на тій самій апаратурі Pundit, але з використанням різних частот та амплітуд. За результатами досліджень проводилась побудова графіків розподілу параметрів по літологічним групам, розрахунок відношення  $V_p/V_s$ .

4. Вимірювання термічної провідності виконувалися на установці TCS (Рис. 5.2). Роздільна здатність установки дозволяє робити виміри на кожен 1 мм зразка.



Рис. 5.2. Установка Thermal Conductivity Scanner (TCS) для вимірювання термічних параметрів зразків

4. Термічна дифузійність вимірювалася на тій же апаратурі TCS, яка може працювати у трьох режимах – Термічна провідність (TC), термічна дифузійність (TD), термічна провідність + термічна дифузійність (TC+TD)

5. Дослідження параметру проникності проводилися на установці TinyPerm 3 (Рис. 5.3), яка дозволяє робити вимірювання прямо на поверхні кернового зразка використовуючи принцип прикладання тиску (повітря) в трубці та вимірюванням дебіту за одиницю обраного часу – зазвичай 1 хв. Результати представляються в одиницях мікро Дарсі, мілі Дарсі або Дарсі.



Рис. 5.3. Установка TinyPerm3 для вимірювання проникності на зразках

## **6. ОБРОБКА ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ ПЕТРОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **6.1 Збір та попередня обробка даних**

Першою стадією роботи була обробка отриманих кернових матеріалів. Самі матеріали представляли собою коробки з керновими зразками, кожна з якої має 4 секції по 1 м, тобто в ідеальному варіанті виходу керну кожна коробка може вміщувати 4 м керну (Рис. 6.1). Сумарно, деякі коробки вже мають описові звіти, які включають опис літології зразків та певні технічні характеристики при процесі забору керну. Основною проблемою була відсутність певних інтервалів або зруйнованість певних зразків, що може свідчити про проблеми при відборі керну або слабкій зцементованості певних інтервалів порід.



Рис. 6.1. Кернові зразки досліджуваного інтервалу свердловини Фольшвіллер 1А

## 6.2 Обрахунок петрофізичних параметрів

Після отримання результатів лабораторних вимірювань проводився аналіз та побудова бокс-плотів для описової статистики розподілу петрофізичних параметрів в літологічних групах. Перше, що потрібно зауважити, що статистика Фішера вказує на статистичну значимість ( $F$  завжди більше  $p$ .) результатів порівняння петрофізичних параметрів у всіх літологічних групах.

Наприклад, графік розподілу поздовжніх хвиль –  $V_p$  (Рис. 6.2) чітку доводить, що вугілля за  $V_p$  від інших літотипів чітко відокремлене – 500 – 1700 м/с, натомість інші літологічні одиниці між собою майже не відрізняються. Тобто враховуючи значення швидкостей  $V_p$  можна чітко відрізнити вугільні горизонти та срази.

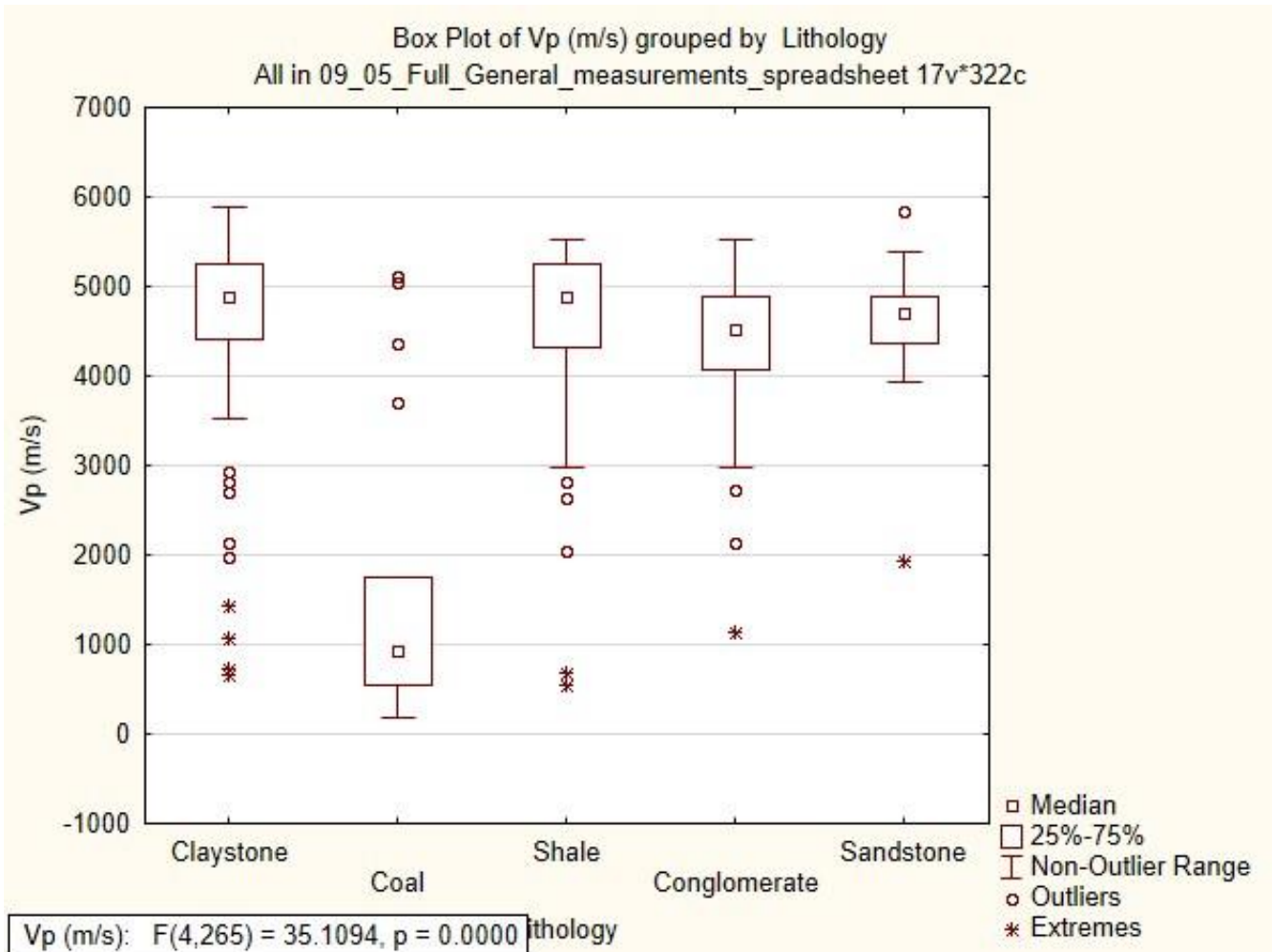


Рис. 6.2. Бокс-плот розподілу поздовжніх швидкостей

Схожа ситуація і для поперечних хвиль – Vs (Рис. 6.3), але присутня більша кількість вильотів, що може погіршувати результати. За Vs можна також розрізнити групу конгломератів, але, теоретично, з певною похибкою.

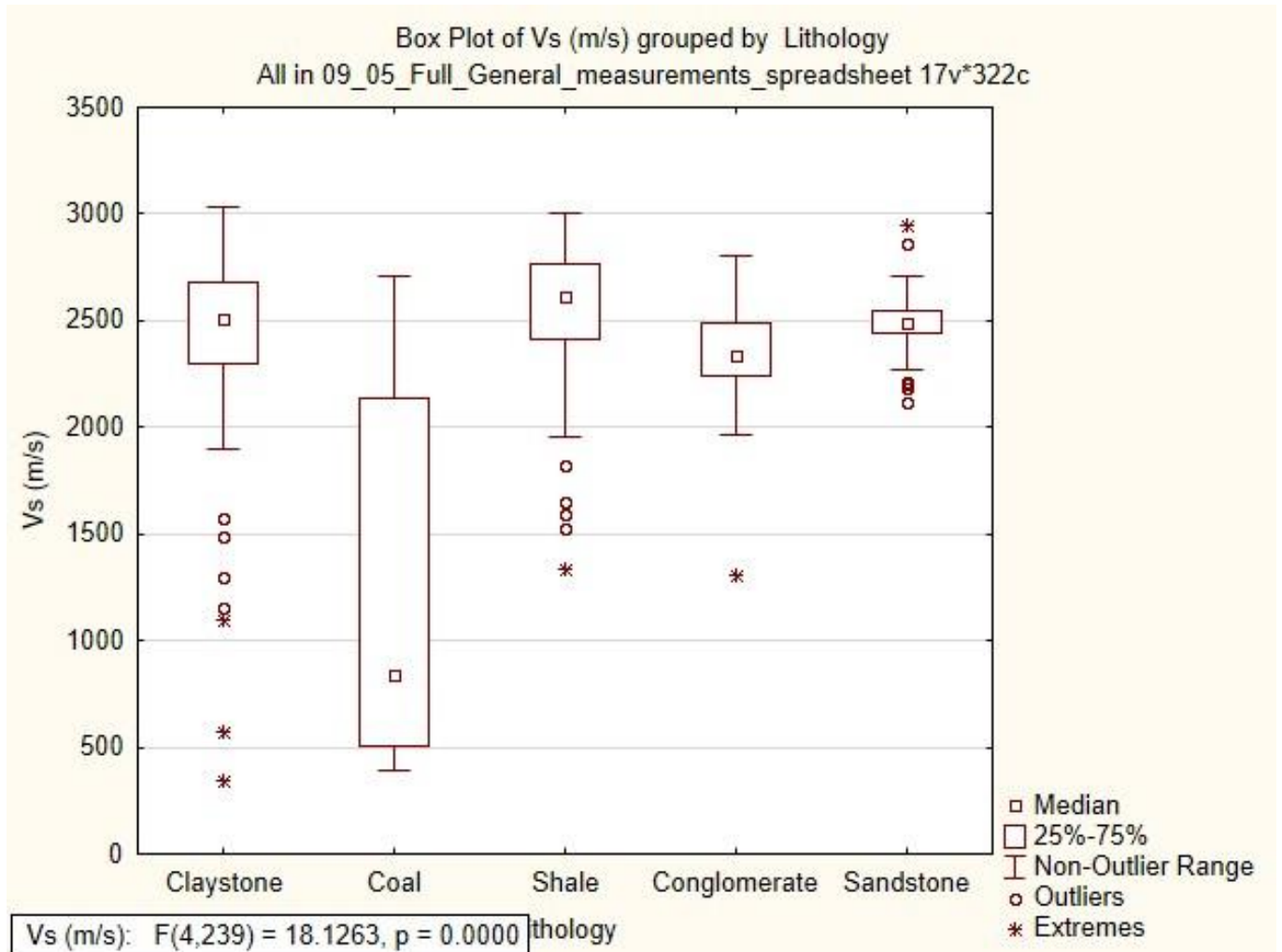


Рис. 6.3. Бокс-плот розподілу поперечних швидкостей

У випадку термічної провідності вугілля теж виступає окремо (Рис. 6.4). Група конгломератів і піщаників окремо від групи сланців і глин.

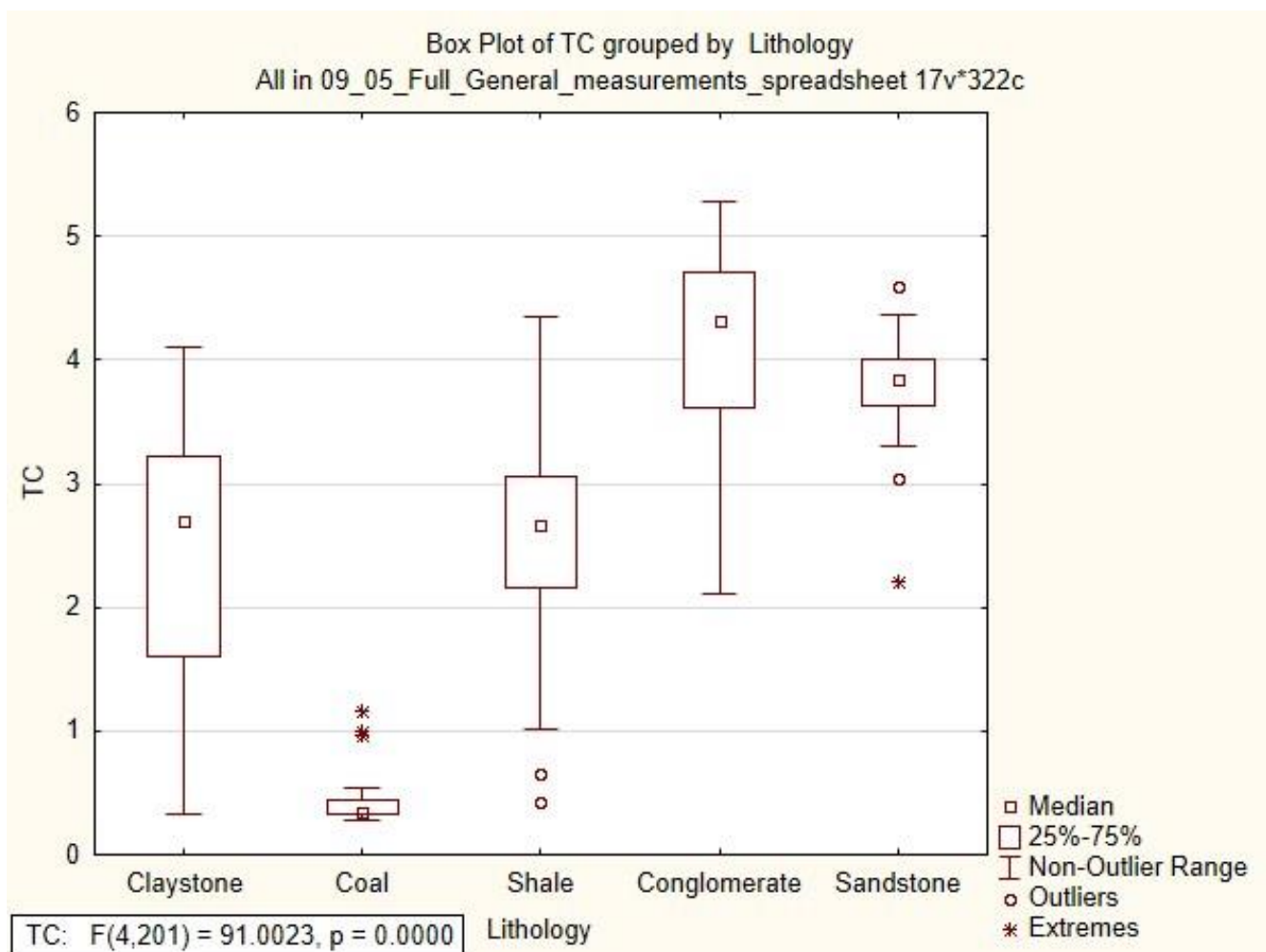


Рис. 6.4. Бокс-плот розподілу термічної провідності

Результати досліджень термічної дифузійності демонструють, що вугілля також відрізняється (Рис. 6.5). З певною похибкою можна виокремити сланці.

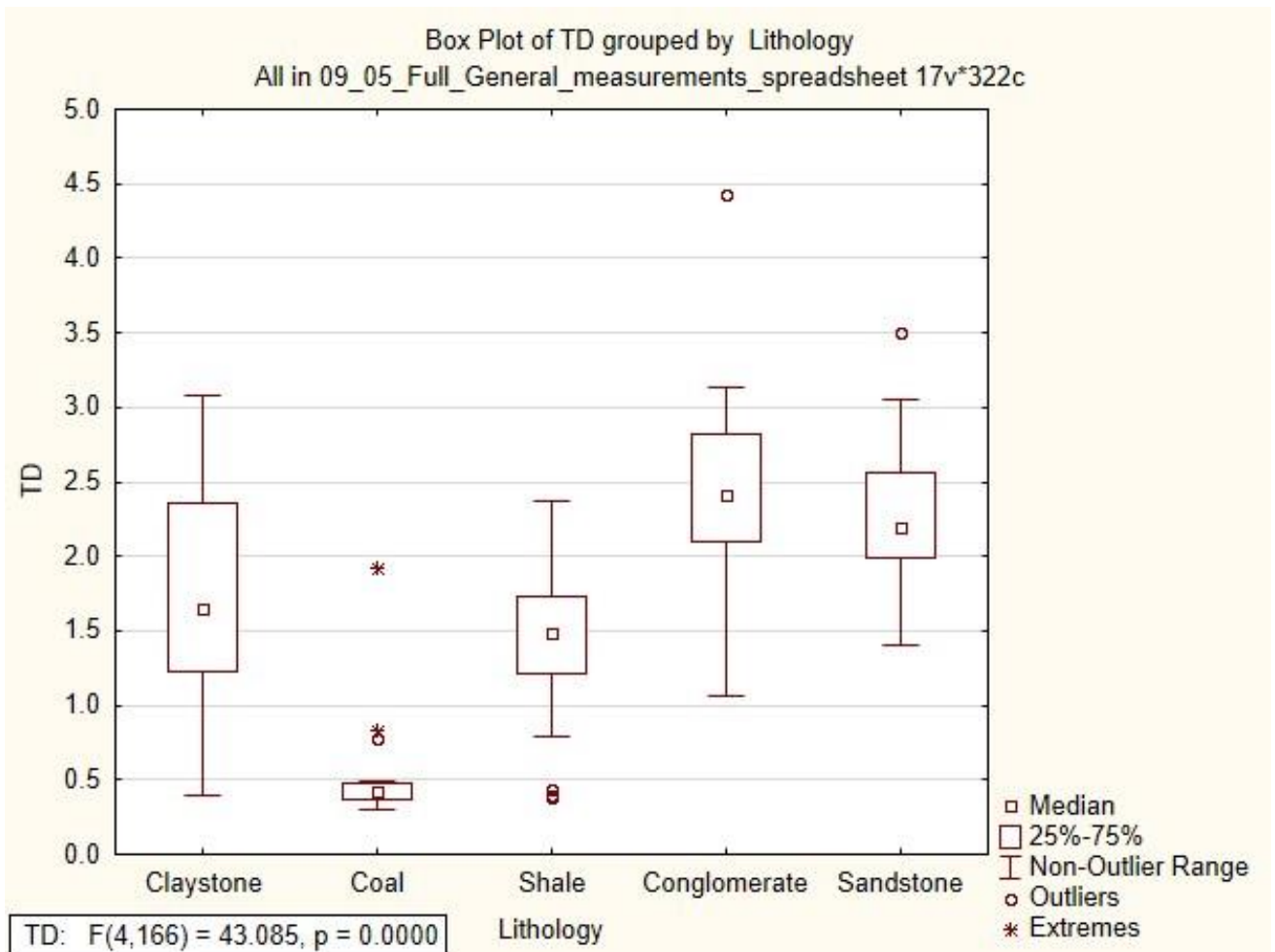


Рис. 6.5. Бокс-плот розподілу термічної дифузійності

Результати дослідження проникності також демонструють чітке виокремлення вугільних інтервалів (Рис. 6.6). Надзвичайно великий діапазон змін в вугільних горизонтах.

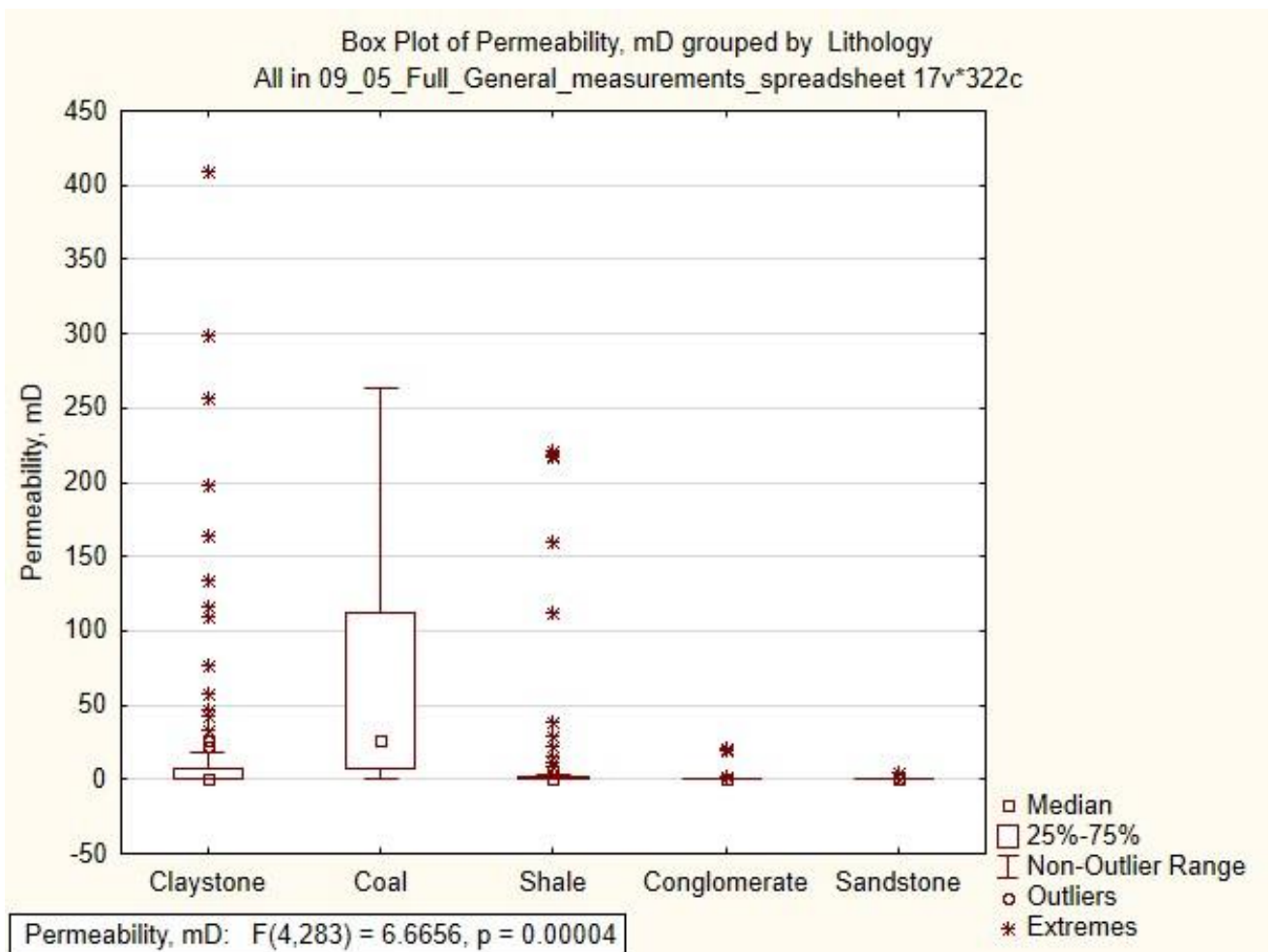


Рис. 6.6. Бокс-плот розподілу проникності

Наступним кроком був множинний регресійний аналіз. Його мета, як за допомогою пружних і термофізичних параметрів, які можна отримати з каротажних даних, отримати величину проникності, яку, у свою чергу, з каротажних даних отримують дуже рідко і з великими труднощами і похибками.

Великий обсяг лабораторного петрофізичного матеріалу дозволяє побудувати таку регресійну модель. Отже в першій моделі для вугільних зразків незалежні ознаки (регресори):  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $T_c$ , предикат - проникність (Табл. 6.1).

Табл. 6.1 Результати моделювання через множинну кореляцію для визначення проникності у вугільних зразках

N=8	Regression Summary for Dependent Variable: Permeability, mD (Coal in Full_coal) R= .95660107 R2= .91508561 Adjusted R?= .85139981 F(3,4)=14.369 p<.01313 Std.Error of estimate: 18.497					
	b*	Std.Err.	b	Std.Err.	t(4)	p-value
Intercept			-6.7115	15.51365	-0.43262	0.687596
Vp (m/s)	-6.81651	1.767898	-0.1930	0.05006	-3.85571	0.018214
Vs (m/s)	7.75428	1.738554	0.4605	0.10324	4.46019	0.011159
TC	-0.75759	0.216942	-68.7528	19.68801	-3.49212	0.025075

Таким чином, коефіцієнт множинної кореляції (R) доволі високий 0,95 - тобто ця модель статистично є працездатною. Коефіцієнт детермінації R<sup>2</sup>, показує частку дисперсії, яку модель пояснює. Це приблизно 91%. Перевірка на статистику Фішера також пройдена - результат статистично значимий, оскільки F (чотири ознаки, три ступені свободи) більша за p. Стандартизована похибка (Std.Error of estimate) застосування моделі 18,497% для вугільних пластів. Тобто маємо наступне рівняння множинної регресії

$$\text{Проникність} = -6,7 - 0,1930 * V_p + 0,4605 * V_s - 68,7528 * TC \quad (1)$$

Отже для того, щоб ми могли прогнозувати величини проникності у вугільних зразках, нам потрібно отримати дані по термопровідності та дані швидкостей поперечних та поздовжніх хвиль. Для перевірки дієвості моделі та отриманої формули було зроблено тестовий автоматизований розрахунок (Рис. 6.7), які показують задовільні результати.

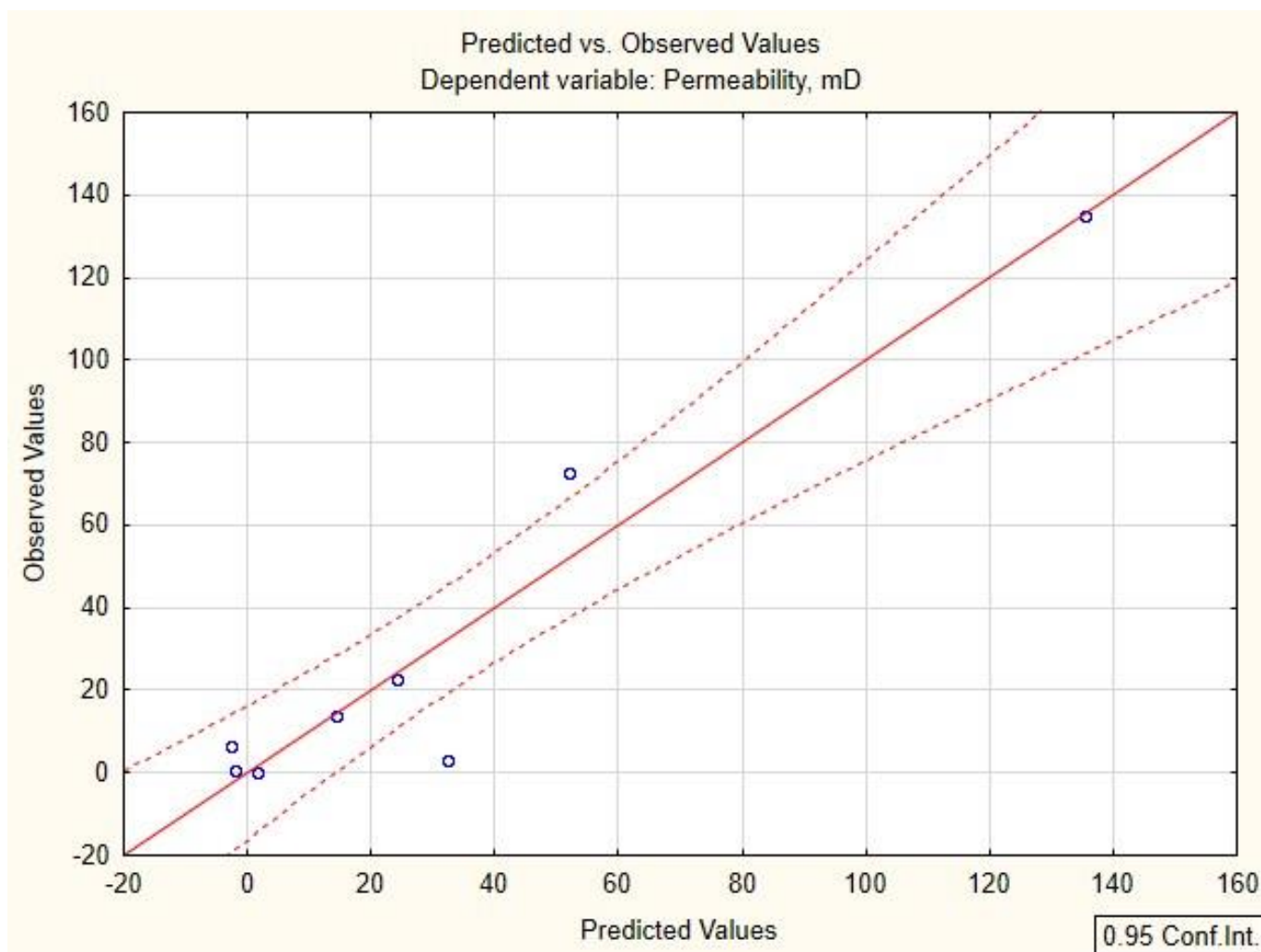


Рис. 6.7. Графік розподілу виміряних та розрахованих за отриманою моделлю параметру проникності

Також було проведено моделювання параметру термічної провідності (TC) для пісковиків на 30 репрезентативних зразках за схожим принципом (Табл 6.2)

Табл. 6.2. Результати моделювання через множинну кореляцію для визначення термічної провідності (TC) на зразках пісковиків

N=30	Regression Summary for Dependent Variable: TC (Sandstone in Sandstone)					
	R= .73592721 R2= .54158886 Adjusted R?= .50763248 F(2,27)=15.950 p<.00003 Std.Error of estimate: .14845					
	b*	Std.Err.	b	Std.Err.	t(27)	p-value
Intercept			4.318894	0.200590	21.53095	0.000000
Vp (m/s)	-0.346225	0.130549	-0.000113	0.000043	-2.65207	0.013229

Permeability, mD	-0.628406	0.130549	-0.178534	0.037090	-4.81357	0.000050
------------------	-----------	----------	-----------	----------	----------	----------

В даному випадку коефіцієнт множинної кореляції (R) доволі високий 0,73 – дана модель також має бути працездатною. Коефіцієнт детермінації (R<sup>2</sup>), показує частку дисперсії, яку модель пояснює. Це приблизно 54%.

Перевірка на статистику Фішера є задовільною - результат статистично значимий, оскільки F (чотири ознаки, три ступені свободи) більша за p. Стандартизована похибка застосування моделі складає 0,14845%.

Тобто маємо наступне рівняння множинної регресії

$$\text{Термічна провідність} = 4,3 - 0,000113 * V_p - 0,178534 * K \quad (2)$$

Тобто для того, щоб ми могли прогнозувати величини теплової провідності у пісковиках, нам потрібно отримати каротажні дані по швидкостям поздовжніх хвиль та проникності. Також провівши тестовий розрахунок за отриманою моделлю можна побачити, що розраховані значення за формулою добре корелюють із вимірними значеннями проникності (Рис. 6.8)

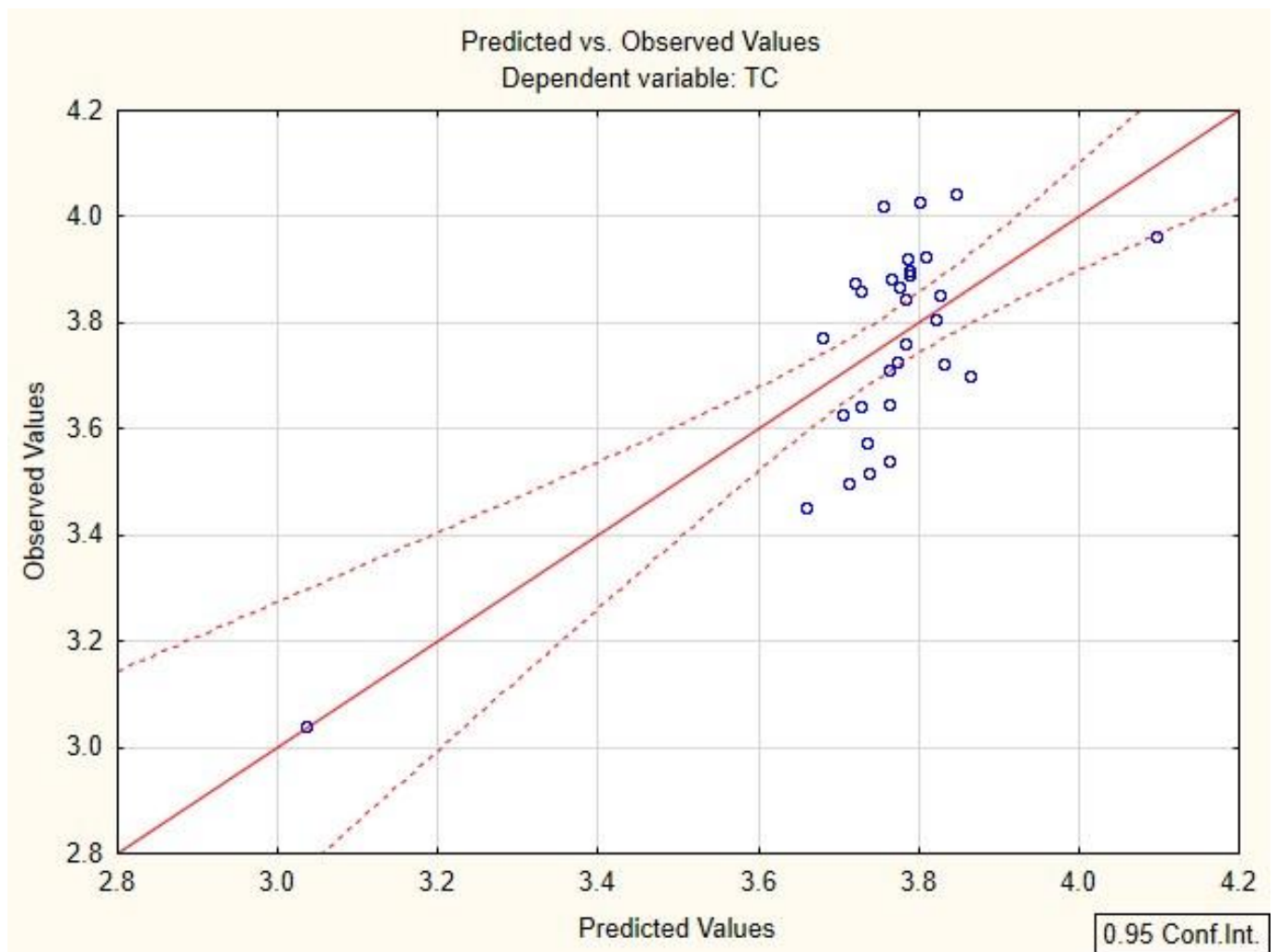


Рис. 6.8. Графік розподілу виміряних та розрахованих за отриманою моделлю параметру термічної провідності

### 6.3 Апаратура

Теоретична модель заснована на скануванні поверхні зразка за допомогою фокусованого, мобільного та безперервно працюючого джерела тепла в поєднанні з інфрачервоними датчиками температури. Використання двоканального датчика в поєднанні з передовими методами обробки дозволяє одночасно вимірювати термічну провідність і термічну дифузійність. Спосіб реалізовано в апараті TCS, який являє собою напівавтоматичний прилад для вимірювання термічної провідності і термічної дифузійності.

Апаратура дозволяє отримати результати:

1. вимірювання повних теплових властивостей зразків породи та матеріалу:
  - термічна провідність і термічна дифузійність
  - профілі теплових властивостей вздовж зразків
  - неоднорідність теплових властивостей
2. анізотропія:
  - складові тензори теплових властивостей для анізотропних твердих тіл

Робота приладу “Thermal Conductivity Scanner (TCS)” заснована на оптичному методі сканування, принцип якого засновано на нагріванні досліджуваних зразків гірських порід оптичним випромінюванням, зосередженим у невеликому сканері, який переміщається вздовж плоскої або циліндричної поверхні зразків керна з постійною швидкістю, як і джерело нагрівання (Рис. 6.3.1).

В одну серію з досліджуваними зразками поміщалися два стандартні зразки (еталони) (1 та 2) з відомими значеннями термічної провідності та термічної дифузійності. Вимірювання проводилися на циліндричній поверхні керну (при сканування зразків уздовж осі керна) або на плоскій поверхні зразків. У деяких випадках поєднувалися вимірювання на циліндричній поверхні керна та на його торцях. Перевагою TCS є висока швидкість та точність вимірювань, можливість проводити їх на зразках довільної форми та розміру.

Технічні характеристики TCS:

- Діапазон вимірювання термічної провідності: Від 0,2 до 25 Вт/м\*К
- Точність вимірювань термічної провідності: 3 %
- Діапазон вимірювання термічної дифузійності: 0,6 до 3,0 \* 10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup> с<sup>-1</sup>
- Точність термічної дифузійності: 5 %
- Продуктивність: до 60 зразків на годину (залежно від довжини зразка)
- Розміри зразка: довжиною не менше 30 мм з будь-якою заданою формою. Максимальна довжина рядка сканування залежить від запиту користувача, напр. 500 мм
- Підготовка зразка: полірування чи вирізання не потрібні, прийнятні плоскі та циліндричні поверхні, напр. кернові зразки
- Контроль: Ноутбук або настільний ПК з операційною системою Windows XP, 8, 10. Програмне забезпечення для вимірювання TCS з функціями онлайн-довідки та інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом користувача. TCS працює з усіма версіями Windows (мін. WIN95).

У порівнянні з загальновідомими вимірюваннями з розділеною смугою (стаціонарними) або вимірюваннями від джерела лінії, принцип оптичного сканування пропонує деякі переваги. Загалом, прилад TCS простий у використанні - вимірювання контролюються портативним комп'ютером (ноутбуком). Програмне забезпечення з функціями онлайн-довідки та інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом користувача спрощують операцію. Також робота TCS майже не потребує підготовки зразків:

- безконтактне вимірювання
- без розпилювання, щоб отримати спеціальні розміри зразка.
- без полірування, працює на різних типах поверхонь.
- TCS працює на поверхнях мантиї бурових кернів, а також на розпиляних (відрізаних) торцях.

Єдине, що потрібно – це фарбування чорною лінією уздовж ліній сканування.

TCS вимірює не тільки теплопровідність:

- дрібномасштабні профілі теплових властивостей вздовж ліній сканування.
- спостереження та кількісна оцінка: середніх і місцевих значень теплових властивостей і факторів неоднорідності.
- автоматичний розрахунок середніх значень і коефіцієнтів якості.
- про анізотропні тверді тіла: спостереження за складовими тензора теплових властивостей.

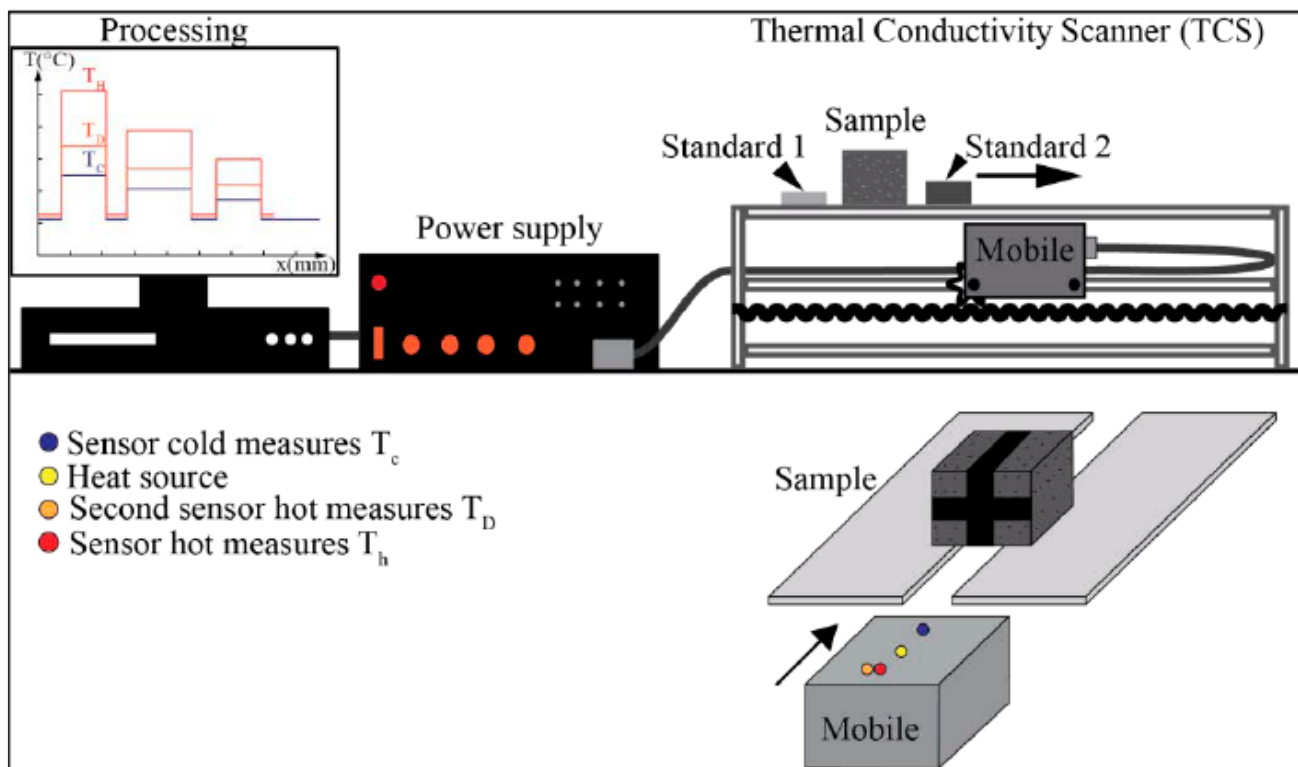


Рис. 6.3.1. Структура установки вимірювання термічної провідності та термічної дифузійності

Вимірювання  $V_p$  і  $V_s$  проводили за допомогою збуджувача та приймального сенсорів на частотах 250 і 500 кГц. В більшості вимірюваннях використовувався спеціальний гель-купланти для покращення сигналу та для поліпшення контактів на поверхні зразків. Для вимірювання акустичних хвиль використовувався портативний польовий прилад Proseq Pundit Lab (рис. 6.3.2). Установка складається з приймача та збуджувача («Transducers»), самого блоку («Pundit Lab») та комп'ютера, на якому встановлено однойменну програму для обробки сигналу.

Прилад дозволяє автоматично вибирати момент приходу хвилі P і вручну обирати для хвилі S. Зразки, що використовуються для вимірювань P-хвилі та S-хвилі, такі ж, що і використовуються для вимірювання термічної провідності.

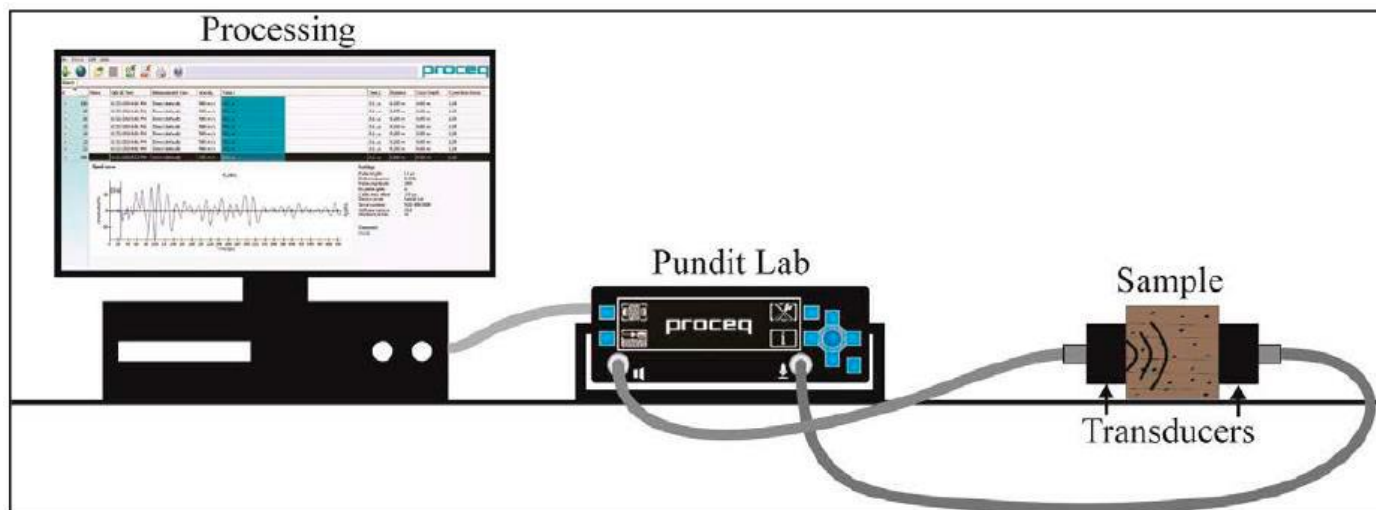


Рис. 6.3.2. Структура установки для вимірювання акустичних характеристик

## 7. РЕЗУЛЬТАТИ РОБІТ

В ході виконання роботи були використані дані, які були отримані в ході проходження стажування 2022 року в Університеті Лотарингії та лабораторії Георесурсів (Laboratory of Georesources) та дані, які були отримані в ході участі в проекті “REGALOR” від лабораторії Георесурсів .

За допомогою описаної методики були успішно вирішені поставлені задачі. В результаті було описано 5 літо-фацій кернових зразків, які представляли собою конгломерати, пісковики, глини, сланці та вугілля.

Кількісними результатами характеристик зразків є значення швидкостей поздовжніх та поперечних хвиль ( $V_p$  та  $V_s$ ), проникності, термічної провідності та термічної дифузійності ( $TC$  та  $TD$ ).

На основі цих параметрів шляхом множинного регресійного аналізу було досліджено їхню залежність в різних літологічних групах.

Більшість термічних та акустичних вимірювань показали взаємну залежність саме у вугільних зразках, які відповідають середньому карбону.

Кожен параметр обраховувався статистично у ПЗ Statistica з використанням статистичної візуалізації шляхом побудови бокс-плотів.

Після виконання розрахунків було отримано два рівняння (1) та (2) для прогнозування проникності у вугільних зразках та термічної провідності у пісковиках.

Також експериментальним шляхом було зроблено порівняння отриманих лабораторним шляхом та шляхом обрахунком модельованих параметрів, що відіграла роль допоміжного параметра при перевірці дієвості отриманих регресійних

моделей. Дані формули потребують подальшого вивчення та застосування на різних родовищах та різних стратиграфічних та тектонічних умовах.

Застосування методики, яка продемонстрована на Рис. 7.1, може бути використана при роботі з іншими вітчизняними даними родовищ, які мають керновий матеріал або результати петрофізичних досліджень.

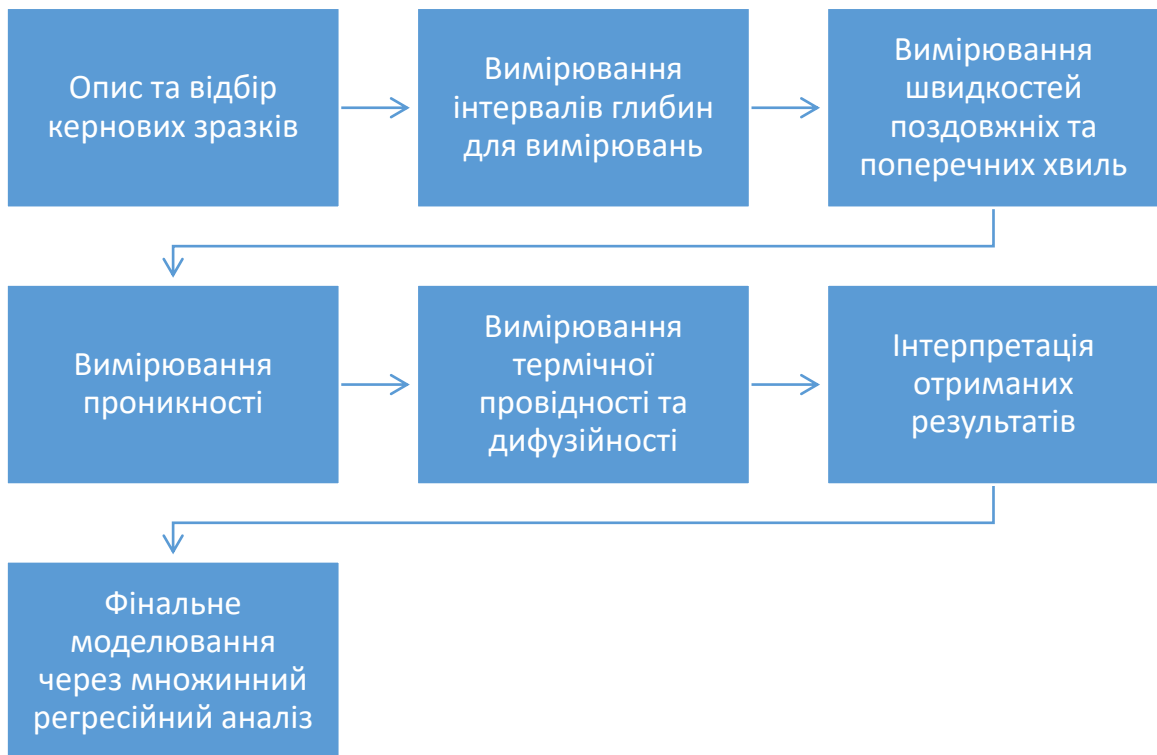


Рис. 7.1. Блок-діаграма ходу роботи при петрофізичних дослідженнях

## ВИСНОВКИ

В результаті роботи з керновими зразками Басейну Лотарингії були вирішені наступні задачі:

- аналіз вхідних геологічних та геофізичних даних;
- петрофізичні дослідження швидкостей поздовжніх та поперечних хвиль, термічної провідності та термічної дифузійності, проникності на кернових зразках середнього відділу кам'яновугільної системи басейну Лотарингії.
- петрофізичний аналіз даних, який включав кількісний аналіз бокс-плотів, графіків розподілу параметрів по літологічним групам;
- проведення множинного регресійного аналізу для подальшої оцінки петрофізичних параметрів - проникності та термічної провідності в різних літологічних групах.

В результаті отримано 2 регресійні моделі для оцінки проникності у вугільних зразках на основі даних термічної провідності, швидкостей поздовжніх та поперечних хвиль; модель для оцінки термічної провідності для зразків пісковиків на основі даних швидкостей поздовжніх хвиль та проникності.

Найбільш перспективними виявилися моделі для оцінки проникності вугільних зразків, які можуть виступати колекторами метанового газу та для оцінки термічної провідності у пісковиках, які у перспективі розглядаються як резервуари для геотермальної моделі свердловин.

Найефективнішими при моделюванні параметрів виявилися акустичний метод та методи термічної провідності та термічної дифузійності, які виконувались на всіх літологічних групах.

Основним характером проявлення метанових колекторів були аномалії мінімальних акустичних та термічних значень для вугільних зразків. В ході використання інших методів (проникність) – колектори підтверджувалися.

## Список використаних джерел

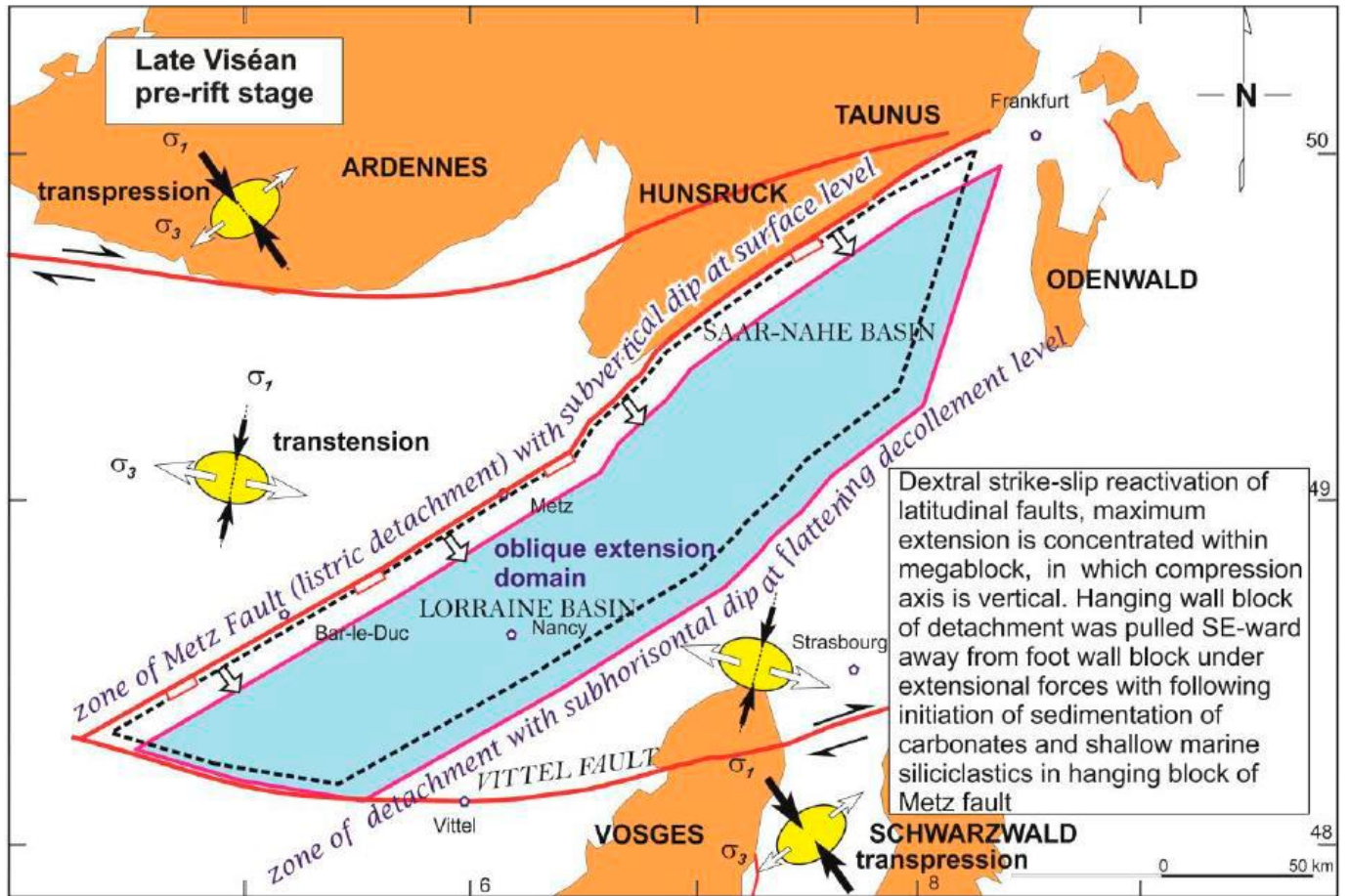
Книги
1. Pryvalov, V., Pironon, J., IZART, A., Michels, R., and Panova, O., 2015, A new tectonic model for the late paleozoic evolution of the lorraine-saar coal-bearing basin (france/germany): Tectonics and Stratigraphy.
2. Jordan JR, Campbell FL (1986) Well logging II – electric and acoustic logging. SPE Monograph Series, SPE, Dallas, TX – 93 - 96
3. Benimeli D, Levesque C, Rouault G, Dubourg I, Pehlivan H, McKeon D, Faivre O (2002) A new technique for faster resistivity measurements in cased holes.
4. Luthi S (2001) Geological well logs: their use in reservoir modeling. Springer, Berlin
5. Schlumberger (1989) Log interpretation principles/applications. Schlumberger, Houston, TX – 113 - 119
6. Schlumberger (2005) Log interpretation charts. Schlumberger, Houston, TX
7. Serra O (1984) Fundamentals of well-log interpretation. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands
8. Well Logging for Earth Scientists, Darwin V. Ellis, Julian M. Singer, Springer
9. Schäfer, A., 1989, Variscan molasse in the Saar-Nahe Basin (W-Germany), Upper Carboniferous and Lower Permian: Geologische Rundschau, c. 78, p. 499–524, doi:10.1007/BF01776188. Schäfer, F., Oncken, O., Kemnitz, H., and Romer, RL, 2000, Upper-plate deformation during collisional orogeny: a case study from the German Variscides (Saxo-Thuringian Zone): Geological Society, London, Special Publications.

**Звіти**

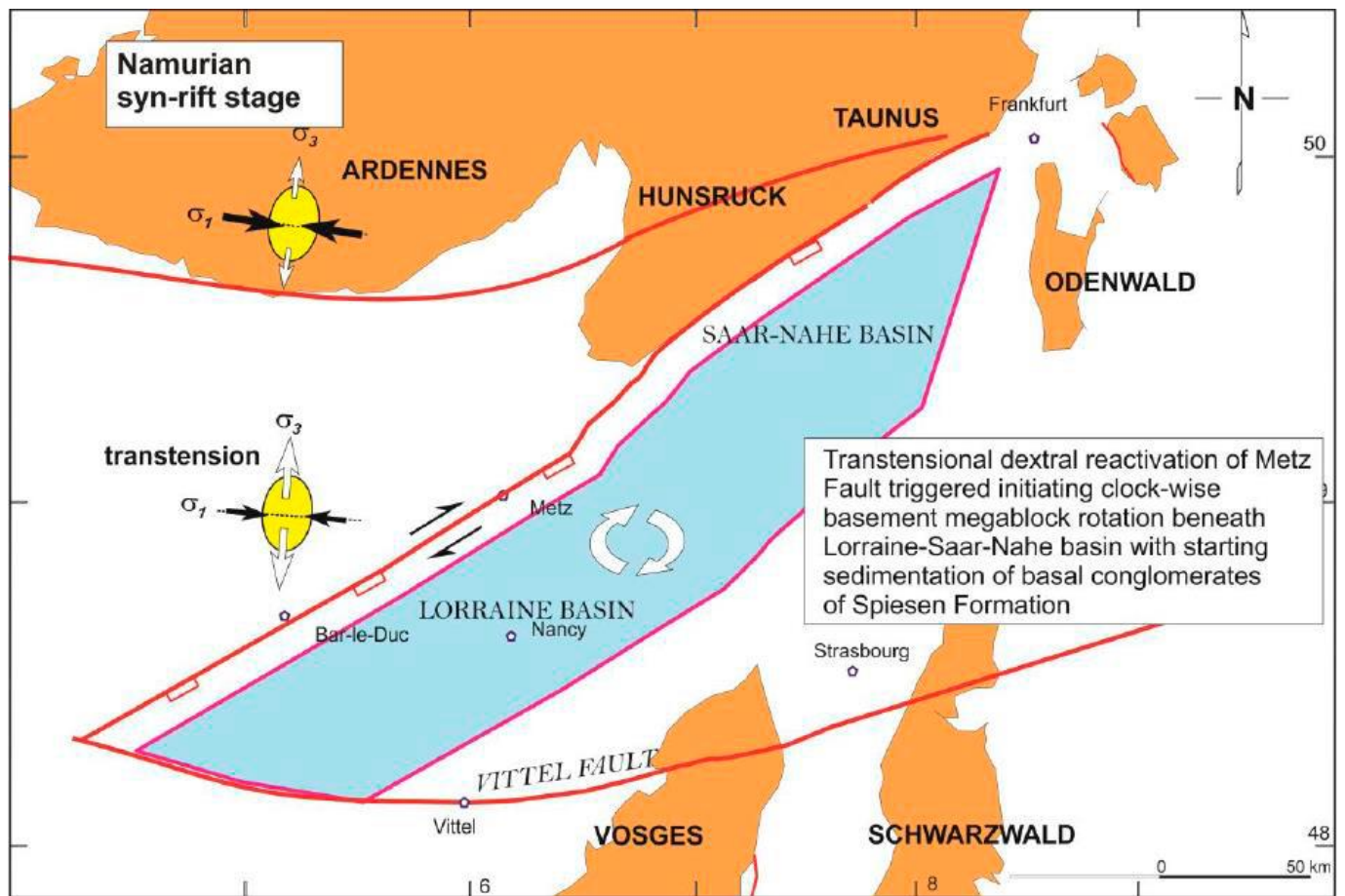
10. Rapport de fin de puits: Sondage de FOLSCHVILLER 1(A) N° archive : 14-45572

Partie Géologique et pétrolière A destination

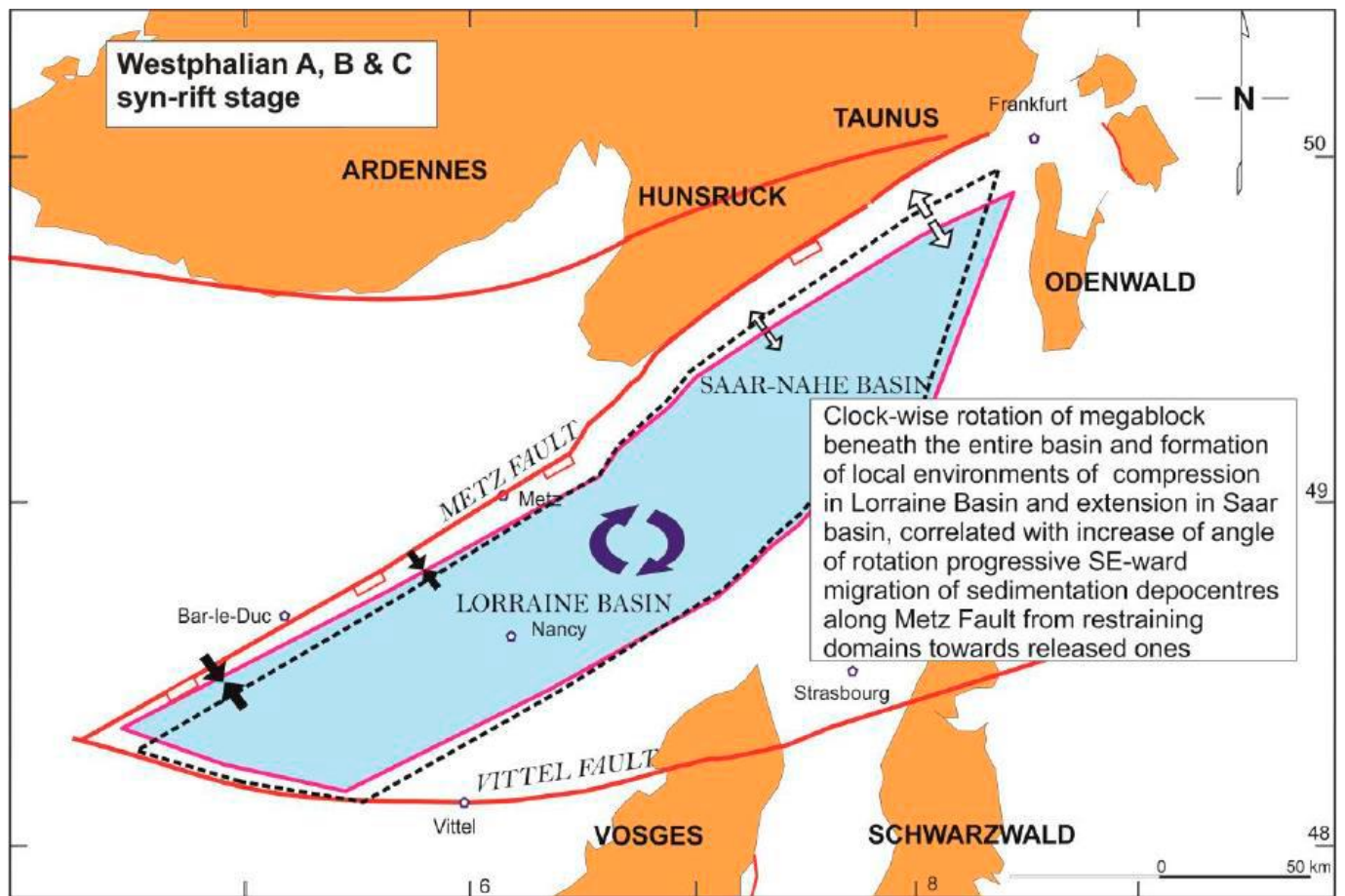
## Додатки



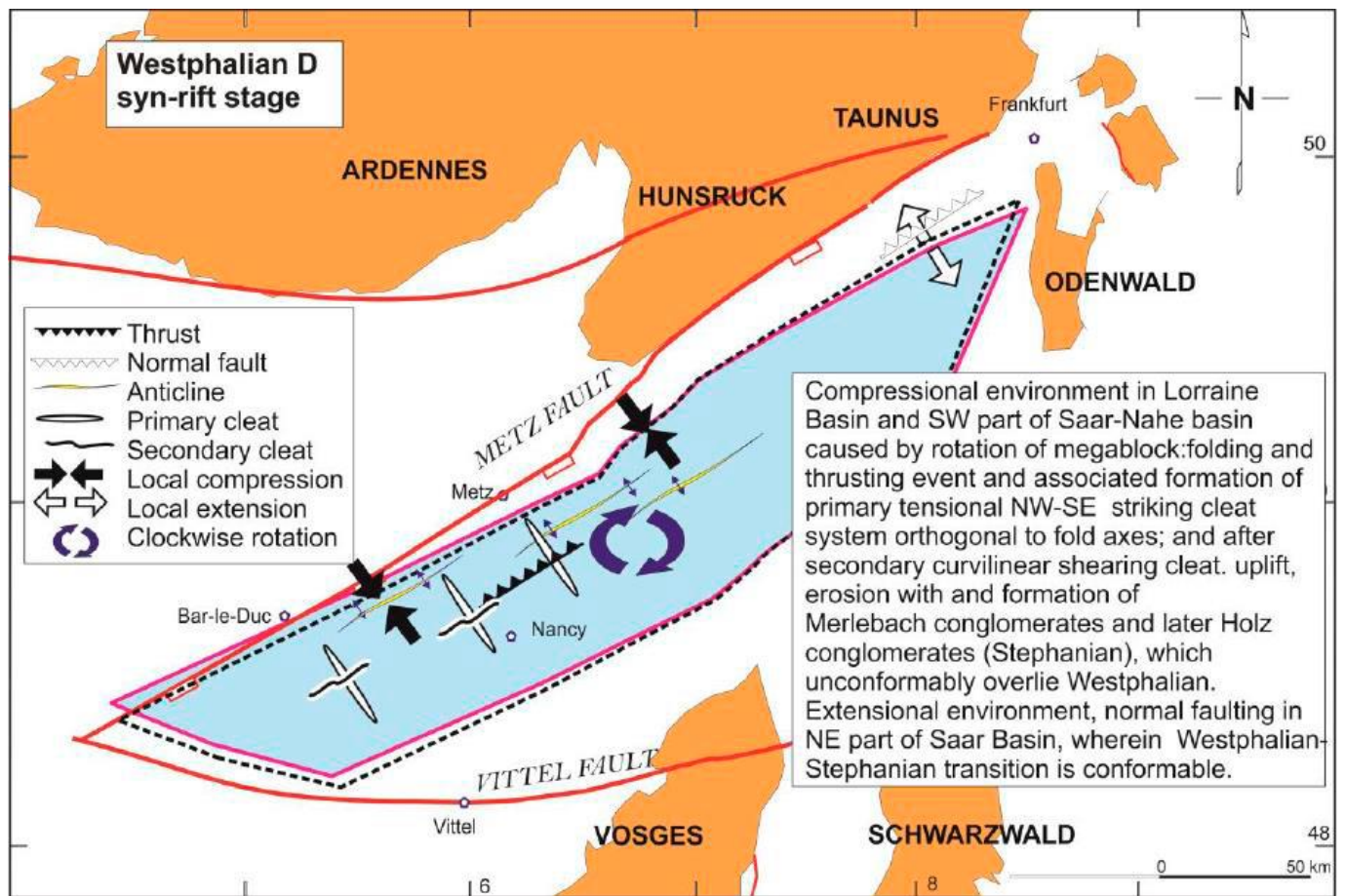
Додаток А. Геологічна будова басейну в період пізньовізейського передрифтового етапу або початкового етапу формування басейну.



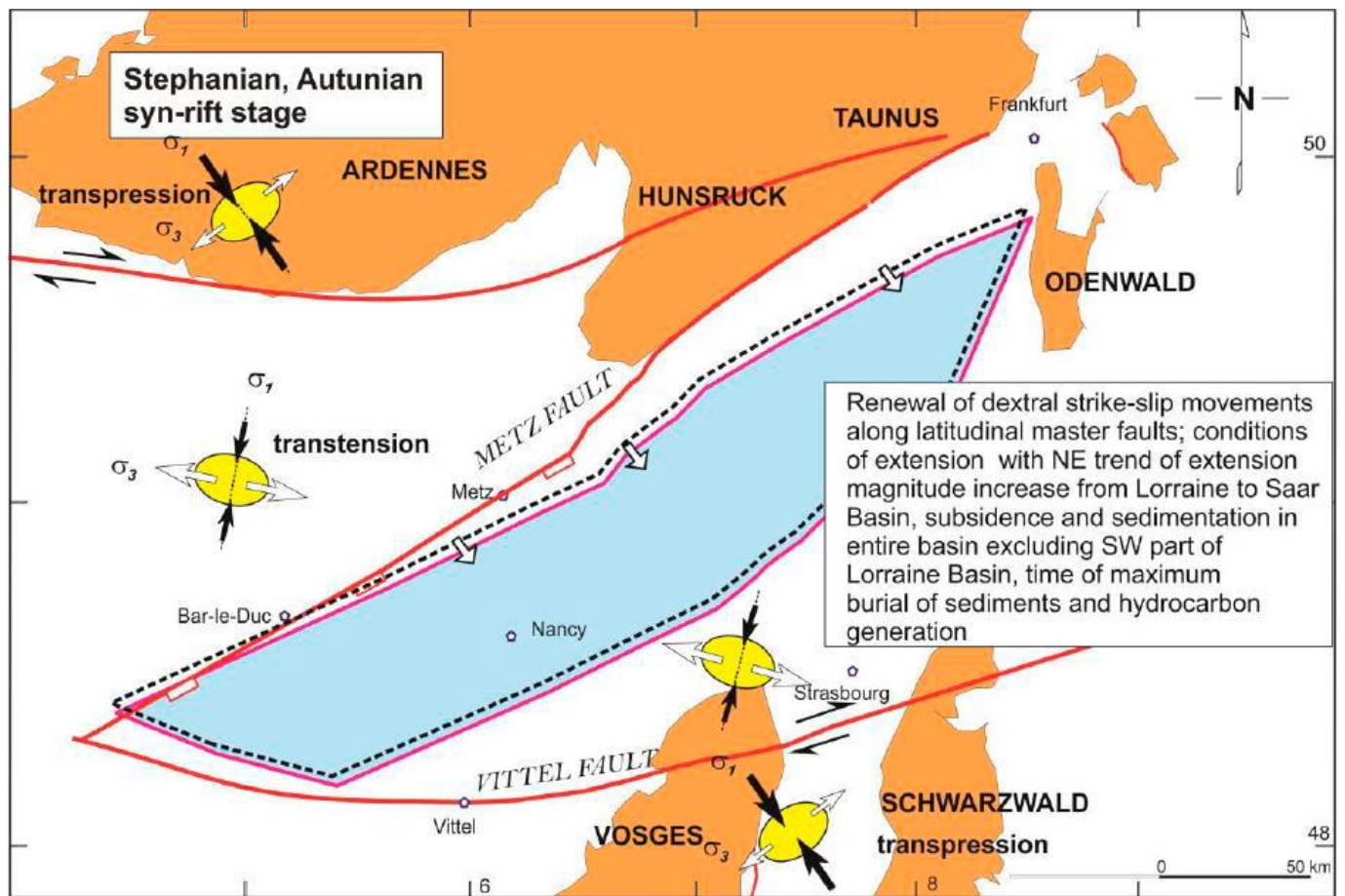
Додаток Б. Геологічна будова басейну та кінематичні закономірності для Намурського синрифту



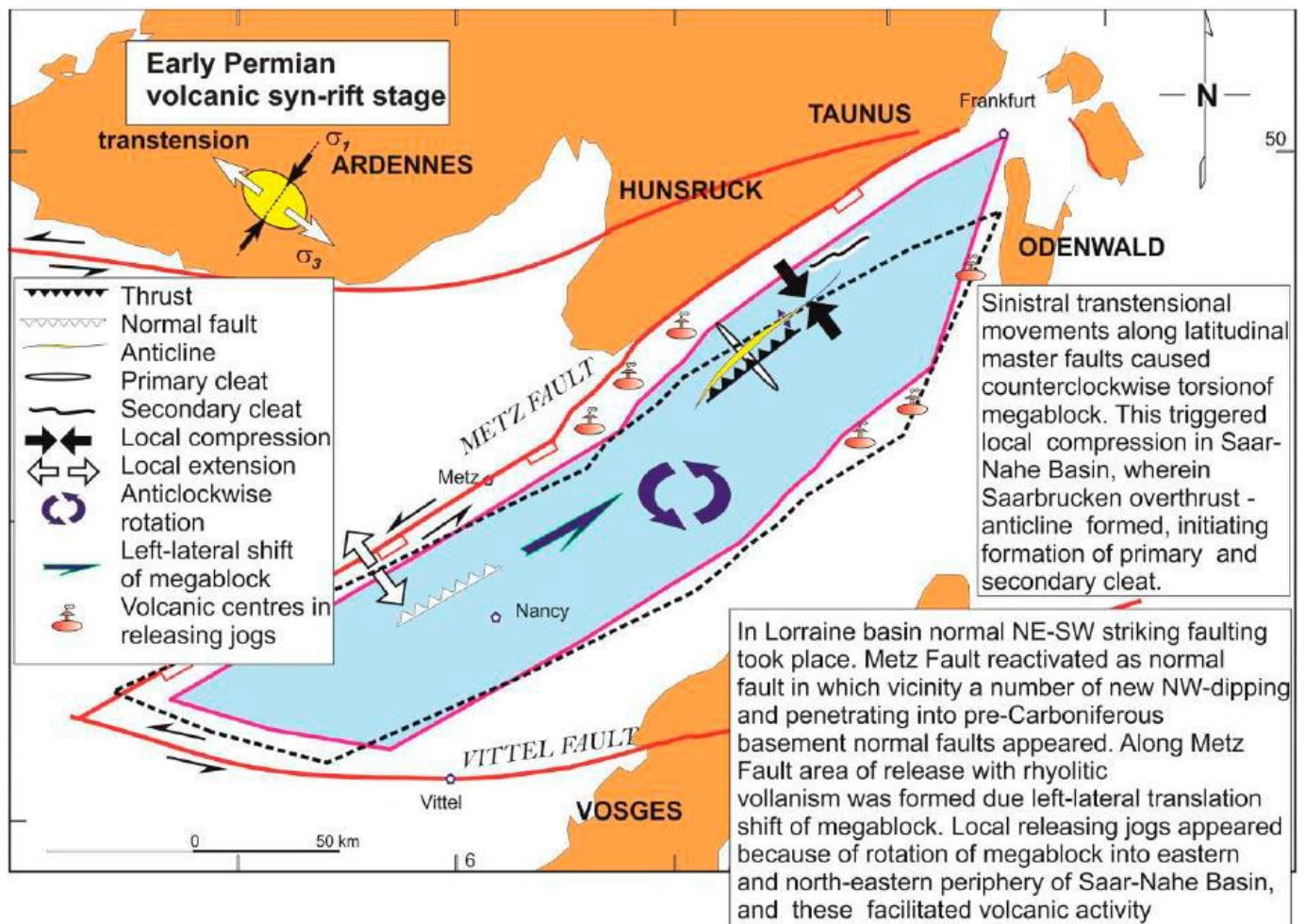
Додаток В. Геологічна будова басейну та кінематичні закономірності для Вестфальського А, В та С стадій син-рифту.



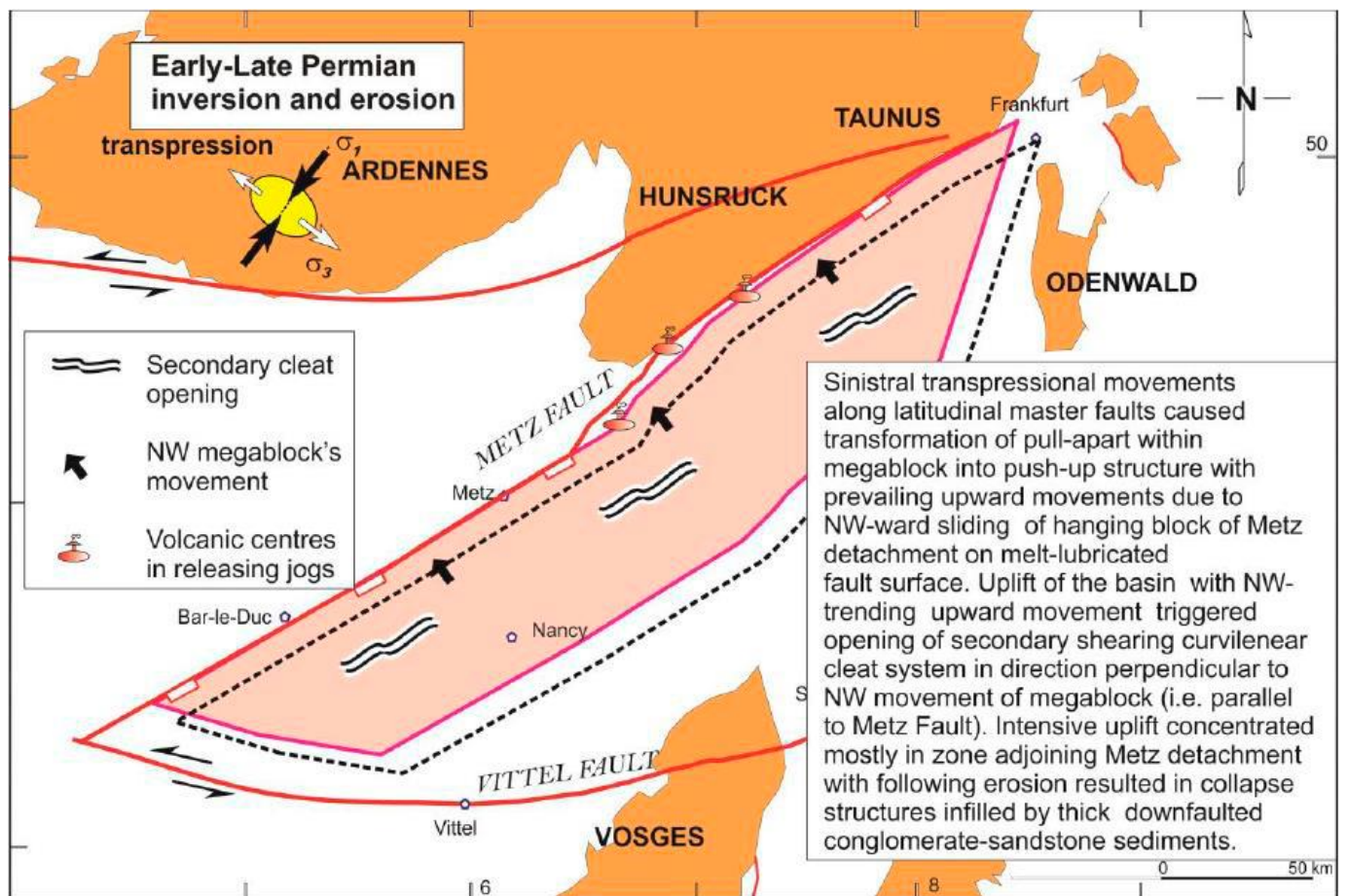
Додаток Г. Геологічна будова басейну та кінематичні закономірності Вестфальського D-синрифтового етапу.



Додаток Д Геологічна будова басейну та кінематичні закономірності для Стефаніан-Автунської стадії син-рифту.



Додаток Е. Геологічна будова басейну та кінематичні закономірності для ранньої пермської вулканічної стадії син-рифту.



Додаток Є. Геологічна будова басейну та кінематичні закономірності переходу від Ранньо-пізньо пермського часу до завершення палеозойської еволюції басейну.