

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*

**«Фільтраційно-ємнісні характеристики та метаноносність пісковиків  
формації Форт-Юніон (США)»**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**

**Виконав:**

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

**Пенкін Максим Віталійович**

**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

Робота містить 73 сторінки, включає 4 розділи, 51 ілюстрацію та 33 бібліографічних джерел.

*Об'єктом дослідження* є осадові товщі світу Tongue River (формація Fort Union) у межах Powder River Basin.

*Предметом дослідження* є поширення та характеристики пісковикових тіл, їхній зв'язок із вугільними пластами та роль у формуванні газонасичених стратиграфічних пасток.

*Метою* кваліфікаційної роботи є встановлення закономірностей поширення пісковикових тіл у світі Tongue River, реконструкція палеосередовища седиментації та визначення потенційних зон розвитку газонасичених пісковикових горизонтів за аналогією з продуктивним родовищем Oedekoven.

Для досягнення мети виконано інтерпретацію 597 геофізичних каротажних діаграм, проведено їх стратиграфічну кореляцію та побудовано 22 структурні розрізи у програмі PETRA. Розраховано карти загальної товщини, пісковикових тіл та коефіцієнта піскуватості для повного та скороченого інтервалів. Методи дослідження включають аналіз гамма-каротажу, стратиграфічну кореляцію, картографічні інтерполяції, літолого-стратиграфічне аналізування та зіставлення з відомими седиментаційними моделями.

Отримано нові дані щодо просторової структури пісковикових тіл світу Tongue River. Встановлено існування стійкого північ–південного пісковикового тренду, що формує «пісковикову опуклість» та відповідає флювіальному каналу зі стабільними меандрами. Доведено, що саме цей канал контролював локальне припинення формування вугільних пластів, що узгоджується з моделями Flores (1993) та частково McClurg (1988). Встановлено, що більшість товстих вугільних пластів не мають різкого

обриву, а розщеплюються та тоншають, що характерно для низинних болотних систем, а не для raised bog.

*Практичне значення роботи* полягає у визначенні перспективних зон для пошуків газонасичених пісковикових горизонтів, а також у наданні картографічних і стратиграфічних основ для подальших геолого-розвідувальних робіт на метан з вугілля. Виділено кілька ділянок, аналогічних за структурою до родовища Oedekoven, але потенційно більших за площею.

Економічна ефективність результату роботи полягає у можливості оптимізації розвідувального буріння, зниженні ризиків пошукових робіт і підвищенні обґрунтованості вибору перспективних об'єктів для освоєння газових ресурсів.

Значення роботи полягає в уточненні палеогеографічної моделі формування Tongue River Member та у створенні кількісної основи для оцінювання газонасиченості пісковикових тіл.

Прогнозні припущення передбачають, що подальше підвищення густоти мережі свердловин і залучення сейсмозвідки дозволять точніше окреслити стратиграфічні пастки газу та підвищити точність кореляційних моделей.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** TONGUE RIVER, FORT UNION, POWDER RIVER BASIN, ПІСКОВИКОВІ ТІЛА, ВУГІЛЬНІ ПЛАСТИ, ФЛЮВІАЛЬНА СИСТЕМА, STRATIGRAPHIC TRAPS, COALBED METHANE.

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	11
1.1. Геологічна історія району .....	11
1.2. Ларамійська орогенія .....	12
1.3. Газопродуктивні пісковики .....	13
1.4. Палеообстановка накопичення товщ Tongue River.....	16
1.4.1. Флювіальна модель (Flores, 1993) .....	16
1.4.2. Лакустична модель (Ayers, 1986) .....	16
1.4.3. Модель низинного заболоченого басейну (McClurg, 1988).....	18
1.4.4. Дослідження Goolsby & Finley (2000).....	19
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	22
2.1. Вихідні дані та їх характеристика.....	24
2.1.1. Геофізичні матеріали свердловин.....	24
2.2. Стратиграфічні межі досліджуваного інтервалу .....	25
2.3. Побудова кореляційних розрізів .....	25
2.4. Нумерація свердловин.....	26
2.5. Побудова ізопахових карт.....	26
1. Ізопахи загальної товщі інтервалу Smith–Pawnee.....	26
2. Ізопахи сумарної товщини пісковиків .....	26
3. Карта піскуватості (sandstone ratio map) .....	27
2.6. Узгодження результатів із попередніми моделями.....	27
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ТА ЕТАПИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	28
3.1. Програма та етапи дослідження .....	28
3.2. Опис застосованих методів.....	36
3.2.1. Аналіз геофізичних каротажів .....	36
3.2.2. Картографічний аналіз та побудова кореляційних розрізів.....	36
3.2.3. Розрахункові методи .....	56
3.2.4. Порівняльний аналіз із літературними даними.....	60
3.3. Узагальнення результатів методичного етапу.....	60

РОЗДІЛ 4. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ.....	61
4.1. Роль Ларамійської орогенії у формуванні басейну.....	61
4.2. Середовище осадонакопичення світу Tongue River.....	62
4.2.1. Пісковикові аномалії та їхня інтерпретація.....	62
4.2.2. Флювіальна модель Flores (1993) .....	63
4.2.3. Оцінка моделі raised bog (Flores, 1993) .....	63
4.2.4. Модель McClurg (1988): низинні болота (low-lying swamp).....	64
4.3. Узагальнена модель осадонакопичення Tongue River Member .....	64
4.4. Значення флювіальної системи для формування газонасичених пісковиків.....	65
Висновки .....	68
Список використаних джерел .....	71

## ВСТУП

Вуглеводнева система верхньої частини формації Форт-Юніон у басейні Паудер-Рівер протягом багатьох десятиліть була важливим об'єктом видобування метану з вугільних пластів. Вугільні пласти, що входять до складу підрозділу Tongue River Member, характеризуються значними потужностями та високою газонасиченістю, що зумовлено тривалими періодами торфоутворення та стабільними умовами седиментації. Однак поряд із добре дослідженими вугільними пластами значний науковий та прикладний інтерес становлять також пов'язані із ними пісковики, які, як засвідчено свердловинними даними, також можуть містити вільний газ. Незважаючи на це, газonosні пісковики Tongue River Member залишаються порівняно мало вивченими, а їхнє поширення та генезис – недостатньо визначеними.

Вибрана для дослідження територія охоплює ділянку розміром приблизно 30 миль у ширину та 90 миль у довжину в межах округу Кемпбелл, штат Вайомінг. Ця територія була обрана через характерне поєднання потужних вугільних горизонтів з їх раптовим зменшенням потужності, розщепленням або повною відсутністю в центральній частині району. Додатковим фактором вибору є розташування тут газового родовища Oedekoven, продуктивність якого пов'язана з окремим пісковиковим тілом у межах Tongue River Member.

Формація Форт-Юніон, згідно з регіональною стратиграфією, включає три підрозділи: нижній Tullock Member, середній Lebo Shale та верхній Tongue River Member. Саме Tongue River Member містить численні вугільні пласти малої зольності та низького вмісту сірки, що формувалися за умов тривалого накопичення торфу в болотних середовищах. Між вугільними горизонтами простежуються пласти пісковиків, алевролітів і аргілітів, які відображають зміни палеогеографічної обстановки та періодичну активність флювіальних систем.

Для аналізу структурних та седиментаційних особливостей досліджуваного розрізу використано гамма-каротажні діаграми 22

свердловин, на основі яких у програмному середовищі IHS PETRA побудовано стратиграфічні кореляції, ізопахітові карти та карти пісковикового коефіцієнта. Ці матеріали дали змогу простежити закономірності поширення пісковикових тіл та зон різкої зміни потужності вугільних пластів, що дозволило уточнити палеообстановки седиментації.

Отримані дані свідчать про наявність північ–південно орієнтованого пісковикового «стрижня» із відгалуженнями у східно-західному напрямку, що інтерпретується як слід флювіальної системи. Виявлені закономірності не узгоджуються з лакустриною моделлю, натомість підтверджують флювіально-домінований або болотний (swamp) характер середовища накопичення, де локальні підвищення могли сприяти формуванню піднятих торфових боліт (raised bogs).

#### **Актуальність теми**

Вивчення палеогеографічних умов формування вугільних пластів та пов'язаних із ними пісковикових тіл у межах Tongue River Member формації Форт-Юніон є важливим завданням сучасної нафтогазової геології. Попри тривалу історію видобування метану з вугільних пластів у басейні Паудер-Рівер, пісковики, просторово та генетично пов'язані з цими пластами, залишаються недостатньо дослідженими, хоча геофізичні дані вказують на їхню можливу газоносність. Проблема полягає у відсутності чітких критеріїв прогнозування газонасичених пісковикових тіл у регіоні зі складною седиментаційною історією.

Нерівномірний розподіл потужних вугільних горизонтів, їх розщеплення або локальна відсутність у центральній частині досліджуваної території свідчать про значні варіації палеообстановок. Для оцінки газового потенціалу пісковиків та обґрунтування перспектив пошукових робіт необхідні точні геологічні моделі, побудовані на основі стратиграфічних кореляцій, інтерпретації геофізичних даних та седиментологічного аналізу.

Отже, дослідження є актуальним, оскільки:

- дозволяє уточнити палеогеографію та седиментаційні процеси в межах одного з найбільш газопродуктивних басейнів США;
- сприяє розвитку методик прогнозування флювіальних пісковикових тіл;
- дає можливість покращити моделі оцінки газоносності не лише в регіоні, а й у подібних вугленосних товщах у світі;
- має вагомим практичне значення для вдосконалення пошуково-розвідувальних робіт.

### **Мета дослідження**

Метою магістерської роботи є встановлення палеообстановок формування вугільних пластів і пісковикових тіл Tongue River Member та визначення закономірностей розповсюдження газонасичених пісковикових горизонтів у досліджуваному районі басейну Паудер-Рівер.

### **Завдання дослідження**

Для реалізації мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати літературні джерела щодо геологічної будови та седиментаційних моделей формації Форт-Юніон.
2. Здійснити інтерпретацію гамма-каротажних діаграм 22 свердловин і виконати їх стратиграфічну кореляцію.
3. Побудувати ізопакітові карти загальної потужності розрізу та пісковикових тіл, а також карту коефіцієнта піскуватості.
4. Визначити причини зменшення потужності або відсутності окремих вугільних пластів у центрі досліджуваної ділянки.
5. Реконструювати палеообстановки седиментації та встановити тип флювіальної системи, що контролювала поширення пісковикових тіл.
6. Виокремити перспективні зони можливого розвитку газонасичених пісковикових горизонтів за аналогією з продуктивним родовищем Oedekoven.
7. Сформулювати рекомендації щодо подальших геолого-розвідувальних робіт.

## **Об'єкт і предмет дослідження**

**Об'єкт дослідження** – вугленосна товща Tongue River Member (формація Форт-Юніон) басейну Паудер-Рівер.

**Предмет дослідження** – просторові та седиментологічні закономірності формування вугільних пластів та газонасичених пісковикових тіл, а також їх відображення у геофізичних даних свердловин.

## **Теоретичні та методологічні основи дослідження**

Теоретичною основою роботи є:

- сучасні моделі седиментології вугленосних басейнів;
- концепції флювіальних систем та болотних палеогеографічних умов;
- методи стратиграфічної кореляції та геофізичної інтерпретації свердловин.

Методологічна база включає:

- аналіз літературних джерел;
- інтерпретацію гамма-каротажних кривих;
- роботу у програмному комплексі IHS PETRA;
- побудову ізопахітових та структурних карт;
- седиментологічну інтерпретацію фацій.

## **Наукова новизна**

У роботі вперше для досліджуваної частини басейну Паудер-Рівер:

- встановлено північ–південне простягання основного пісковикового каналу з боковими притоками;
- показано зв'язок між зонами розрідження вугільних пластів та активністю флювіальної системи;
- запропоновано уточнену модель палеообстановок, що поєднує низинні болота та флювіальне руслове накопичення;
- визначено нові перспективні ділянки для пошуку газонасичених пісковикових тіл.

## **Практичне значення результатів**

Отримані результати можуть бути використані для:

- удосконалення моделей прогнозування пісковикових колекторів у межах Tongue River Member;
- вибору перспективних ділянок для подальших пошуково-розвідувальних робіт;
- уточнення геологічної будови регіону під час буріння нових свердловин;
- навчального процесу за спеціальністю 103 «Науки про Землю» (курси: «Седиментологія», «Регіональна геологія», «Методи інтерпретації ГДС»).

### **Особистий внесок магістранта**

Магістрант самостійно здійснив збір та аналіз літературних джерел, виконав інтерпретацію каротажних кривих, побудував кореляційні схеми, ізопахітові карти у програмі IHS PETRA, виконав седиментологічне узагальнення та сформулював наукові висновки.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1. Геологічна історія району

Паудер-Ріверська западина розташована на північному сході штату Вайомінг та на південному заході Монтани. Геологічний розріз басейну включає вісім основних структурних-стратиграфічних одиниць, розділених великими стратиграфічними перервами (Weichman, 1964). Кожна з цих одиниць відповідає одному крупному трансгресивно-регресивному циклу (WGATSC, 1965).

У цьому дослідженні розглядаються лише одиниці VII та VIII крейдового та палеогенового віку (рис. 1).

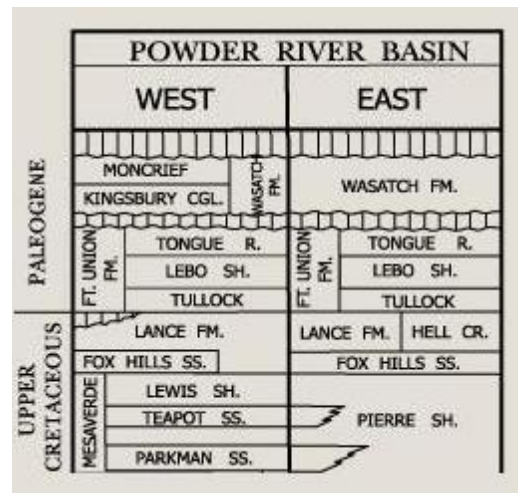


Рис. 1 Стратиграфічна колонка верхньої крейди та палеогену в басейні річки Паудер (за даними USGS, Central Region Energy Resources Team, 2007).

Розріз одиниці VII починається з морських відкладів, сформованих під час крейдового трансгресивного моря, яке просувалося як з півночі, так і з півдня, сходячись у центральних регіонах Скелястих гір та Великих рівнин. У середині цієї товщі виділяють п'ять регресивних циклів (WGATSC, 1965), у межах яких утворювалися пісковики, що розділяють глинисті фації великих трансгресій.

Четвертий та п'ятий регресивні цикли відповідають формаціям Мезаверде та Ланс відповідно. Ці цикли відображають етапи активного підняття території

та посиленого надходження грубозернистого матеріалу у западину. За даними Wyoming Geological Association (1965), пізньокрейдове підняття пов'язується із початковою фазою Ларамійської орогенії. Одночасно відбувалося й прискорене осідання в центральних частинах басейну, що сприяло накопиченню значної потужності відкладів формації Ланс, представленої алювіальними рівнинами, меандруючими руслами та прибережними комплексами.

Одиниця VIII включає палеоценову формацію Форт-Юніон та еоценову формацію Васатч (WGATSC, 1965). Ларамійська орогенія завершилася до часу накопичення олігоценних вулканогенних порід формації Уайт-Рівер, які перекривають ядра піднятих масивів Блек-Гіллз, Ларамі та Біггорн (Curry, 1971).

## 1.2. Ларамійська орогенія

Хоча швидке осідання западини спостерігалось наприкінці маастрихту, ізопакітові карти Curry (1971) для відкладів Ланс–Фокс-Хіллз показують збільшення потужності на південь (рис. 4). Дослідник включив формацію Фокс-Хіллз у свої побудови через подібність кривих гамма-каротажу; попри це, Curry (1971) наголошує, що немає достатніх доказів активної Ларамійської орогенії у цей час.

Палеоструминні дані Seeland (1988) свідчать про переважний східний напрямок течії протягом пізньої крейди, а також на початку палеоцену (товща Таллок), що вказує на відсутність підняття Блек-Гіллз. Лише у ранньому палеоцені у товщі Форт-Юніон (висока частка пісковиків та зміна напрямку палеострумів на західний) проявились ознаки тектонічної активності в районі Блек-Гіллз (Lisenbee, 1988).

Подальші ознаки активізації Ларамійської орогенії – поява аркозових пісковиків, метаморфічних уламків та інтрузивних кластів у верхній частині Форт-Юніон – вказують на денудацію та оголення докембрійського фундаменту Блек-Гіллз, Ларамі та Біггорн (Seeland, 1988).

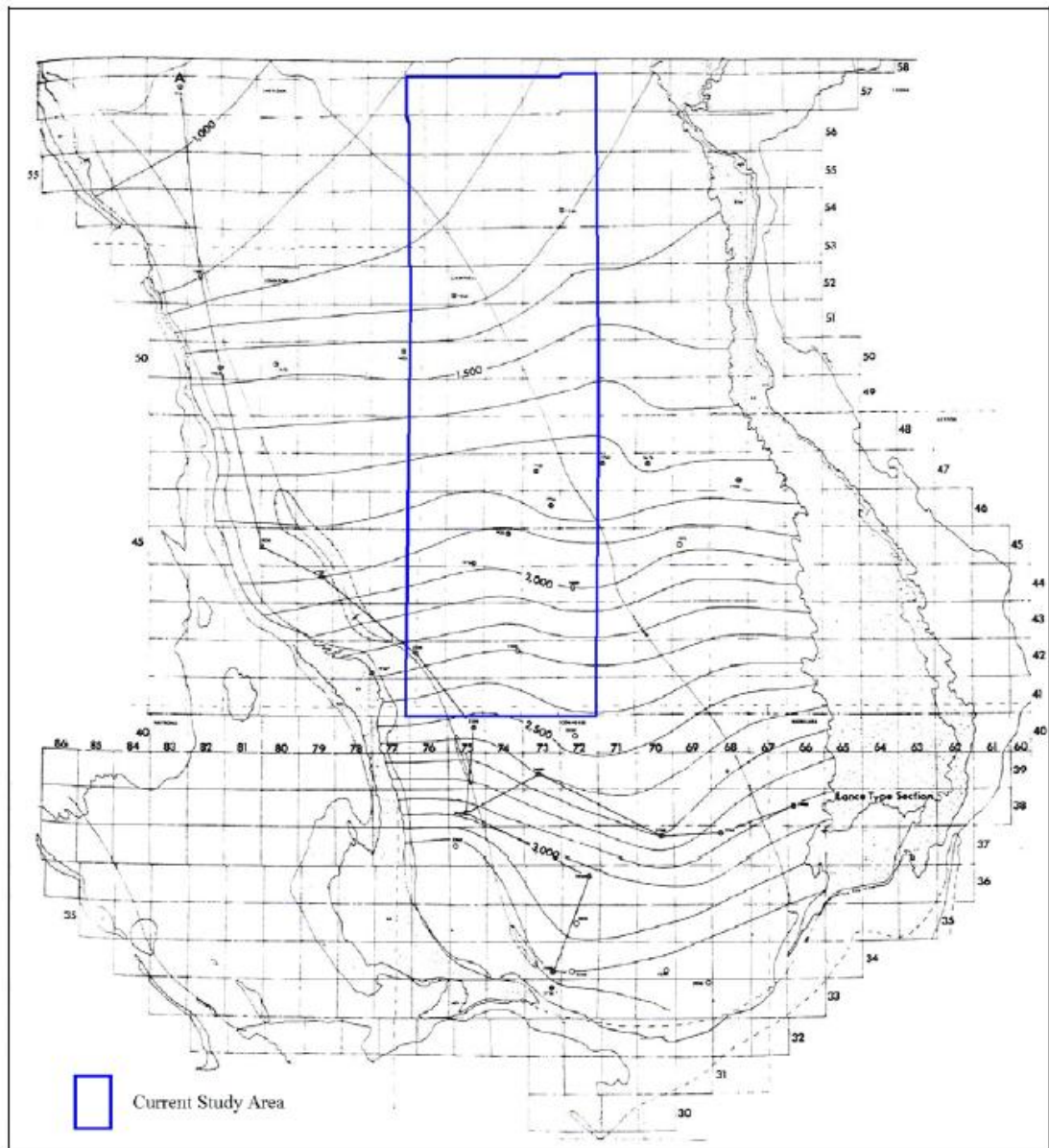


Рис. 4. Ізопахіальна карта формацій Ленс та Фоксхіллс у басейні річки Паудер (за Каррі, 1971, рис. 6).

### 1.3. Газопродуктивні пісковики

Оедековенське газове родовище розташоване в північно-східній частині досліджуваної території (рис. 5). У 1986 році компанія *Wyatt Petroleum Corporation* розпочала розвідувальну програму через наявність сприятливих структурних та літологічних ознак.

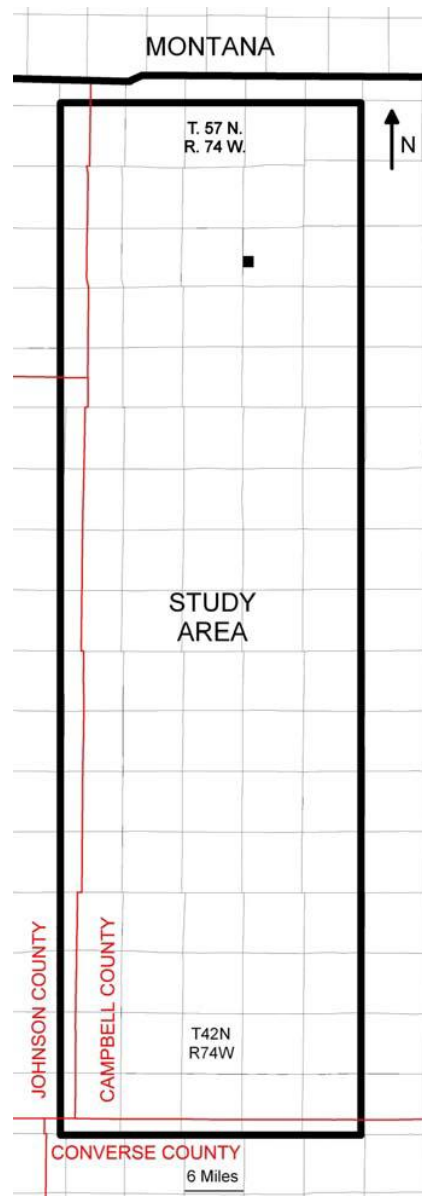
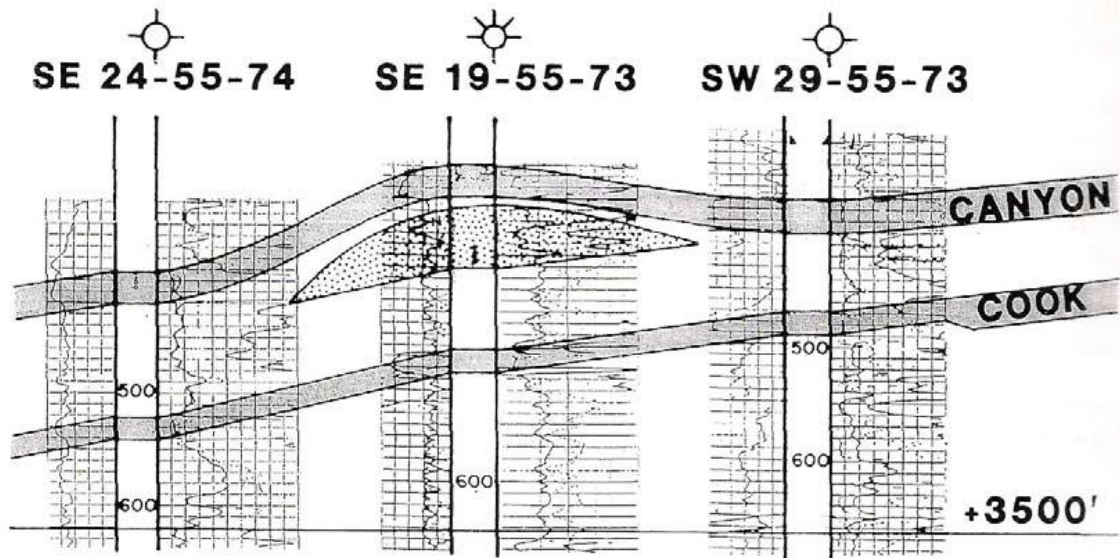


Рисунок 5. Карта досліджуваної території. Газове родовище Едековен виділено на T.55N. R.73W.

Каньйонський вугільний пласт формує північ–південно орієнтовану антикліналь із амплітудою понад 140 футів (Oldham, 1997). Потужність інтервалу між пластами Canyon і Cook також має максимум уздовж цієї структури, що збігається з високорезистивним пісковиком, який виклинюється у мулисте середовище на сході та заході (рис. 6).



*Anschutz 2-B Oedekoven*

Рис. 6. Структурний поперечний розріз перспективного майданчика Одековен (за Олдхемом, 1997, рис. 9).

У 1986 р. було пробурено свердловину Wyatt 83-1 Oedekoven, розкрито інтервал 342–362 ft та отримано дебіт газу (рис. 7). Разом із свердловиною Wyatt 83-2 сумарний видобуток до 1994 р. становив 848 тис. MCF, а загальна продукція по родовищу – 1,83 млн. MCF (Oldham, 1997).

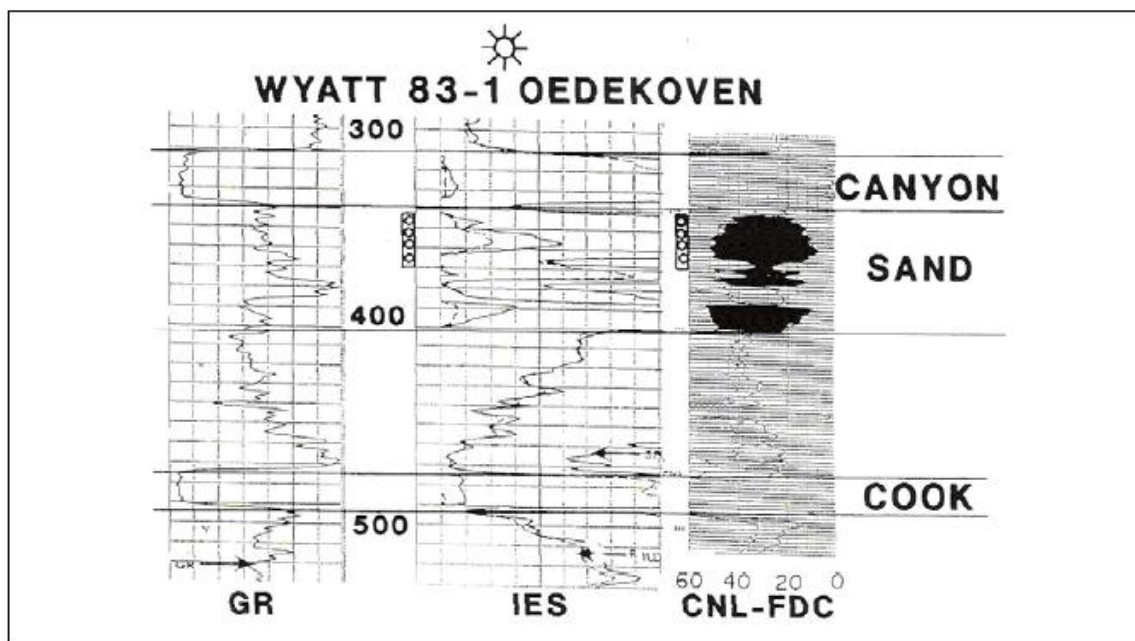


Рис. 7. Каротажний діаграм зі свердловини Wyatt 83-1 Oedekoven (за Oldham, 1997, рис. 12).

Особливістю родовища є **повна відсутність водопрпливу**, що робить його економічно привабливим і відмінним від типових метанових свердловин у вугіллі. Попри наявність таких пісковикових колекторів у басейні, їх генезис і закономірності поширення досліджені недостатньо.

#### **1.4. Палеообстановка накопичення товщ Tongue River**

Палеогеографічна інтерпретація Tongue River Member залишається дискусійною. Для пошуку пісковикових тіл, перспективних для газовидобутку, необхідно визначити домінуюче середовище осадо накопичення.

##### **1.4.1. Флювіальна модель (Flores, 1993)**

Flores (1993) інтерпретує товщу як продукт меандруючої–анастомозуючої річкової системи з підвищеними купольними болотами (raised bogs) уздовж русел. Модель включає:

- меандруючі канали, що розгалужуються на розриви гребель (crevasse splays);
- перехід до зрілих, купольних болот;
- обмеження латеральної міграції русел за рахунок підвищених боліт.

Модель пояснює формування потужних вугленосних товщ Tongue River, а низький вміст сірки та золи у вугіллі підтверджує домінування дощового живлення торфових боліт.

##### **1.4.2. Лакустична модель (Ayers, 1986)**

Ayers (1986) запропонував альтернативну модель, де ключову роль відігравало **велике озеро Lake Lebo**, яке заповнювалося дельтами, що проградировали з периферії басейну. Зменшення частки пісковиків до осі западини інтерпретується як ознака напрямку проградації.

- Потужні вугленосні товщі виникали на міждельтових рівнинах.
- Виникнення озера пов'язується з Ларамійською орогенією.

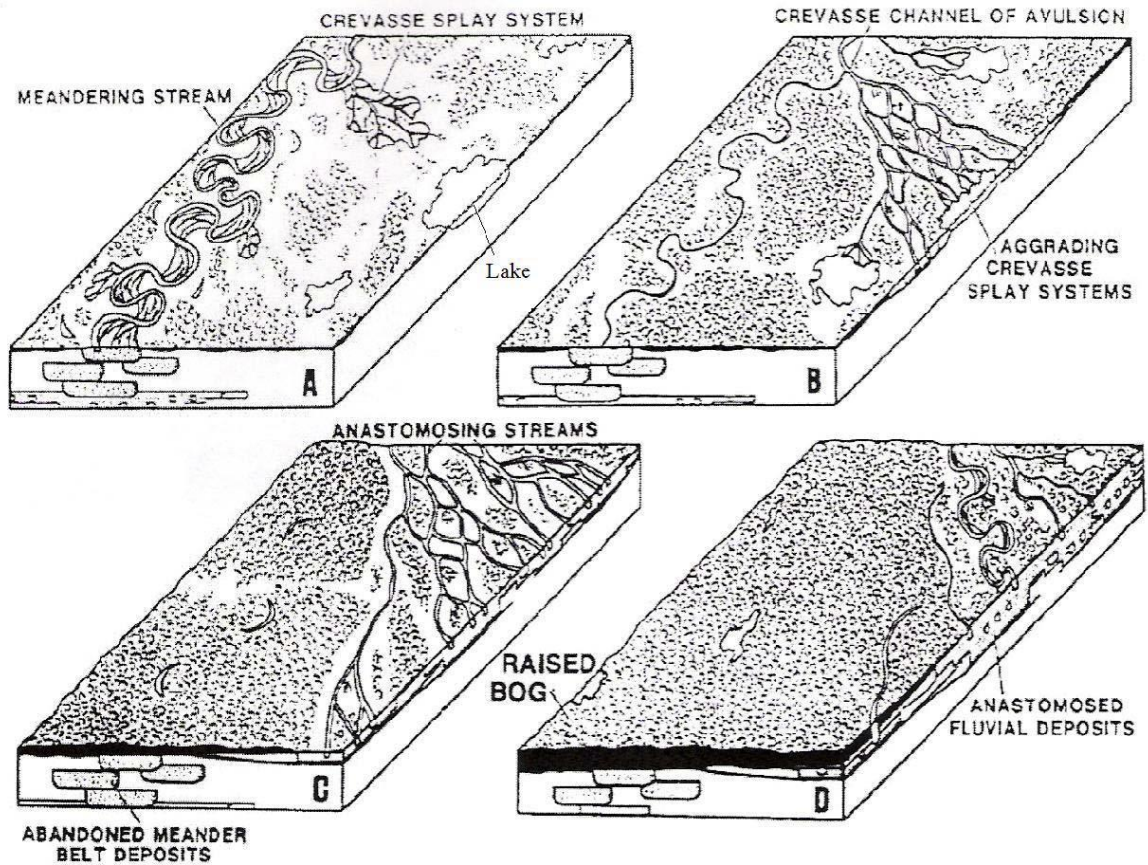


Рис. 8. Модель середовища осадонакопичення з домінуванням річкових опадів (за Флоресом, 1993, рис. 15).

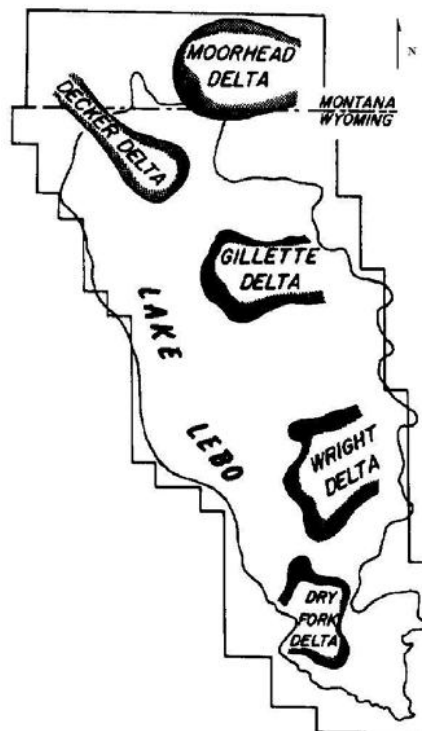


Рис. 9. Озерна модель з флювідельтовим відкладенням (за Айерсом, 1986, рис. 12).

### 1.4.3. Модель низинного заболоченого басейну (McClurg, 1988)

McClurg (1988) критикував моделі Flores та Ayers, зазначаючи, що вони не пояснюють аномально велику потужність і латеральну протяжність вугленосних товщ Tongue River Member.

Він порівняв середовище осадонакопичення з **Окіфенокським болотом (Флорида)** – неглибокою заболоченою лагуною із середньою глибиною води 2–2,5 м (рис. 10). Згідно з моделлю:

- тектонічне нерівномірне осідання викликає переміщення болотних систем;
- при збільшенні глибини ділянка перетворюється на озеро → припинення торфонакопичення;
- після підміління болотний режим відновлюється.

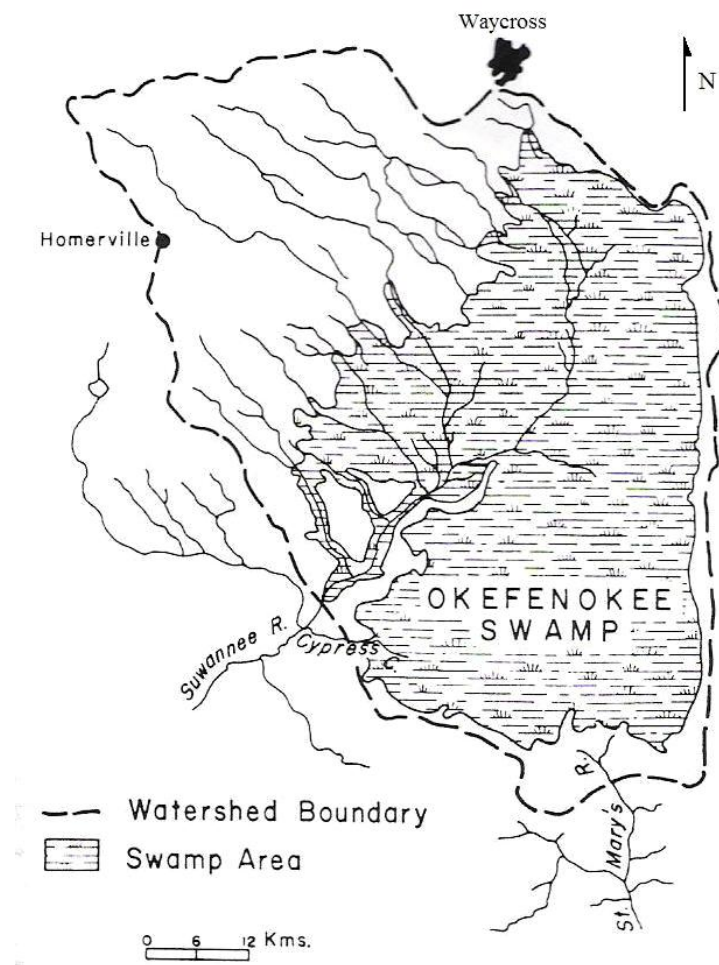


Рис. 10. Болото Окефенокі, Флорида (за МакКлергом, 1988, рис. 8)

У результаті в розрізі формуються два вугленосні горизонти, розділені озерними відкладами.

#### 1.4.4. Дослідження Goolsby & Finley (2000)

Автори побудували детальну базу кореляцій (рис. 11) та встановили такі закономірності:

- вугленосні пласти демонструють латеральну стійкість і характерні **Z-подібні структури розщеплення** (рис. 12);
- це пов'язано з **міграцією центра торфонакопичення**, який переміщався навколо басейну під впливом тектоніки;
- побудована «петльова» (“loop”) кореляція показала, що пласт Wyodak фактично **накладається сам на себе**, що підтверджує тривалу міграцію зони боліт (рис. 13–14).

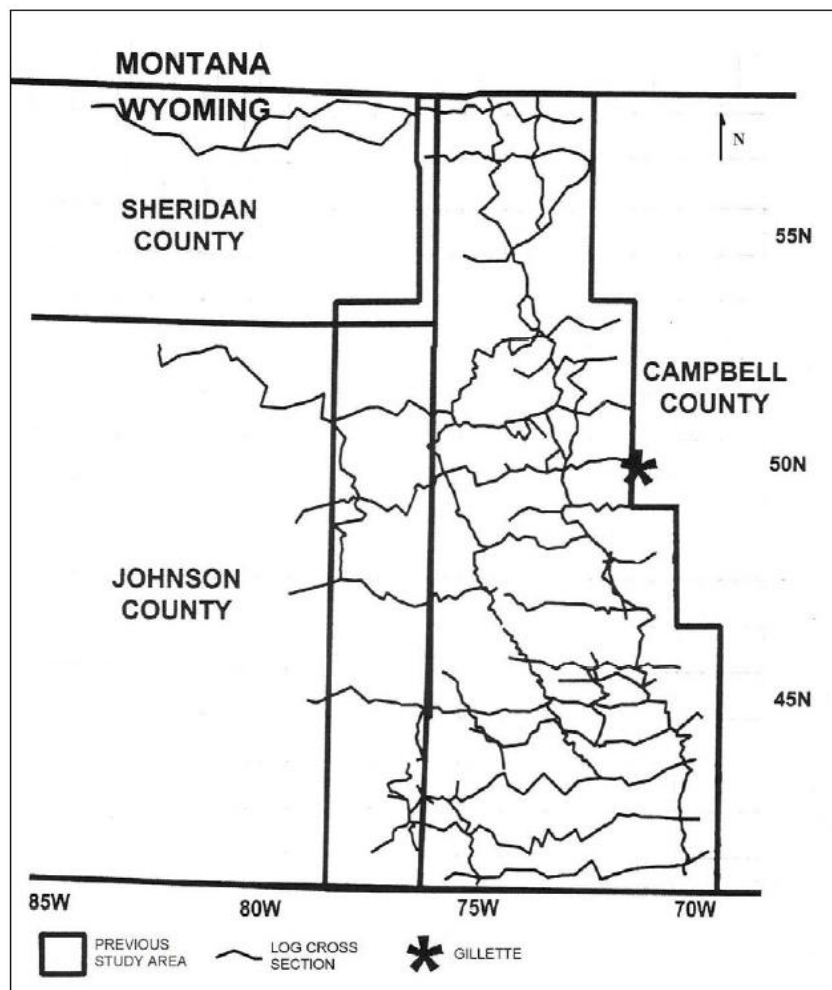


Рис. 11. Масштаб досліджуваної території та дані Гулсбі та Фінлі (за Гулсбі та Фінлі, 2000, рис. 2).

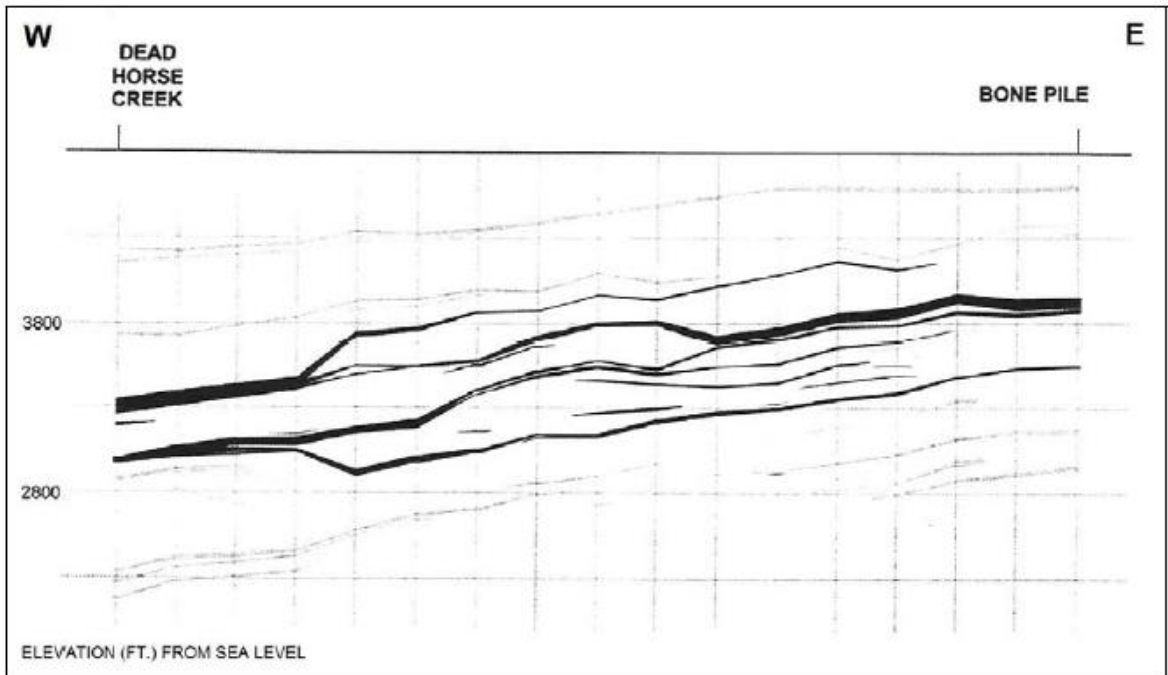


Рис. 12. Приклад Z-подібних структур та тонких вугільних пластів у центрі розрізів (за Гулсбі та Фінлі, 2000, рис. 12).

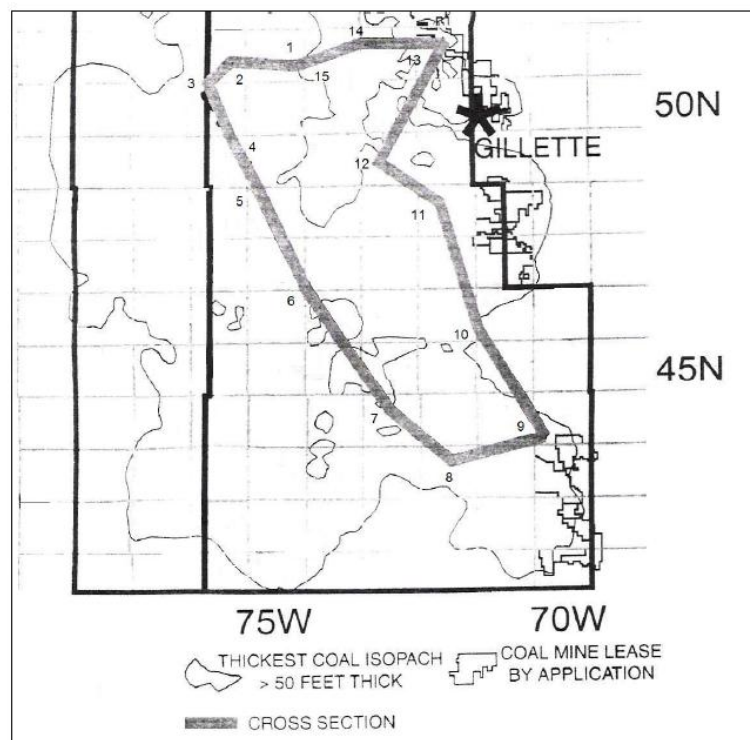


Рис. 13. Розташування поперечного перерізу «петля» в окрузі Кемпбелл, штат Вайомінг (за Гулсбі та Фінлі, 2000, рис. 19).

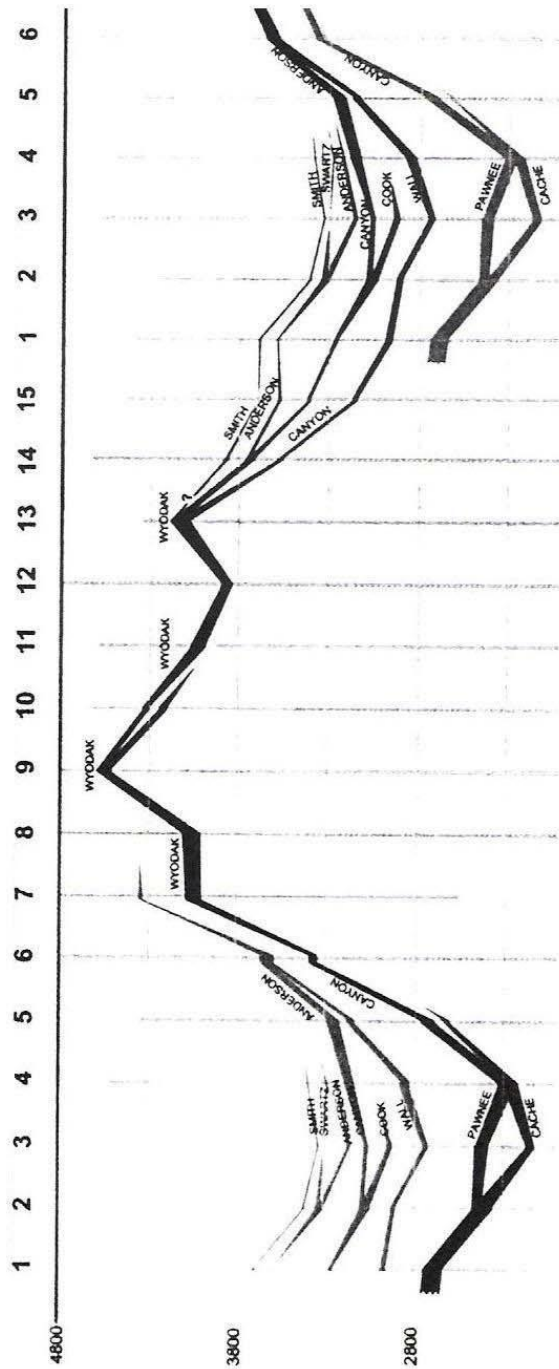


Рис. 14. Поперечний переріз «петля» (за Гулсбі та Фінлі, 2000, рис. 21).

Goolsby & Finley (2000) доводять, що процес формування вугілля був просторово неперервним, але рухомим у відповідь на диференційне осідання.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методологічна основа роботи базується на комплексному аналізі геофізичних даних свердловин, побудові кореляційних розрізів та ізопахових карт, а також порівнянні отриманих результатів із відомими моделями осадонакопичення для формації Fort Union (*Ayers, 1986; Flores, 1993; McClurg, 1988; Goolsby & Finley, 2000*). Основним вихідним матеріалом слугували каротажні діаграми **597 свердловин** у межах досліджуваної території Campbell County (Wyoming), отримані з відкритого архіву Wyoming Oil and Gas Conservation Commission. До аналізу залучалися гамма-каротаж, електричний резистивітет та нейтронно-щільнісні діаграми, причому більшість даних становив саме гамма-каротаж через невелику глибину інтервалу.

Каротажні криві були стандартизовані в інтервалі **0–120 API**, де значення до 30 API інтерпретували як вугільні пласти, діапазон 30–70 API – як пісковики, а понад 70 API – як глинисто-алевролітові товщі. Піки по кожному пласту фіксували у програмному середовищі **IHS PETRA**, де для кожної свердловини виділяли верхню і нижню межі досліджуваного інтервалу. Верхньою межею інтервалу слугувала покрівля пласта **Smith**, а нижньою – підосва пласта **Pawnee**; за його відсутності інтервал завершували по підосві пласта **Wall**. У північній частині району, де пласт Smith виходить на поверхню, верхньою межею приймали пласт **Anderson**. Для свердловин цієї зони використовували іншу систему позначень пісковиків у PETRA, що забезпечувало коректну побудову карт.

На основі підібраних меж було створено **22 кореляційні розрізи**: дев'ятнадцять схід–захід та три північ–південь. У кожен розріз включали по одній свердловині з кожної секції тауншипу, забезпечуючи рівномірність мережі. Кореляція виконувалася між вугільними пластами Smith, Anderson, Canyon, Cook, Wall та Pawnee, з урахуванням їх розщеплення й латеральної

мінливості. Особливу увагу приділяли зонам характерних «Z»-подібних розщеплень, описаних *Goolsby & Finley (2000)* (див. *Fig. 12, Fig. 14*). Нумерацію свердловин подавали у скороченому форматі API – наприклад, API 049-005-12345 записували як 0512345.

На основі кореляції побудовано комплект **ізопахових карт**: загальної потужності інтервалу Smith–Pawnee, сумарної потужності пісковиків (товщиною  $\geq 5$  ft), а також карти піскуватості, що відображає співвідношення потужності пісковиків до загальної товщі. Для північної частини площі, де інтервал виходить на поверхню, створено окремий комплект карт. Товщина кожного інтервалу обчислювалася автоматично в PETRA за різницею глибин між верхнім і нижнім піком. Карти пісковиків будували шляхом сумування усіх пісковикових інтервалів у межах кожної свердловини, після чого виконувалася просторова інтерполяція (див. *Рис. 15*).

Побудовані карти надали можливість виявити закономірності розподілу пісковикових тіл, зокрема формування північ–південного «пісковикового стовбура» з боковими розгалуженнями на схід та захід – особливість, що узгоджується з уявленнями про флювіально-доміноване середовище (*Flores, 1993*). Зіставлення результатів із наявними моделями осадо накопичення дозволило оцінити їх відповідність різним сценаріям – лакустичному (*Ayers, 1986*), флювіально-анастомозуючому (*Flores, 1993*) та болотному, подібному до сучасного Окефенокее (*McClurg, 1988*). Найближчою до отриманих геологічних даних виявилася модель низькорельєфного застійного болота з міграцією депоцентру, що також узгоджується з просторовою мінливістю потужностей вугільних пластів.

Таким чином, застосована методика – комбінація інтерпретації каротажів, кореляційних розрізів та ізопахового моделювання – дала можливість достовірно реконструювати осадові умови формування Tongue River Member і визначити ділянки з найбільшою ймовірністю розвитку газонасичених пісковикових тіл.

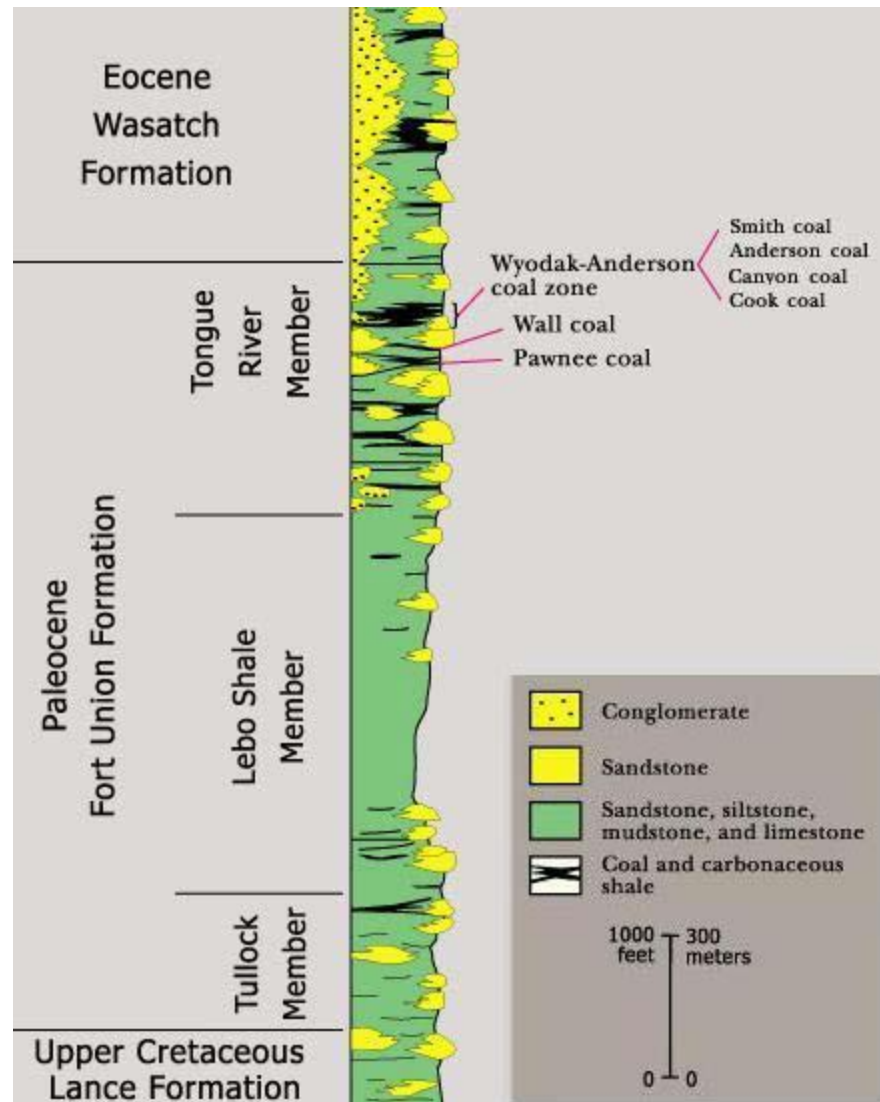


Рис. 15. Стратиграфічна колонка палеоцену з вугільними пластами від Сміта до Поні (за даними Геологічної служби США, Команди енергетичних ресурсів Центрального регіону, 2007 р., рис. 6).

## 2.1. Вихідні дані та їх характеристика

### 2.1.1. Геофізичні матеріали свердловин

Для дослідження були використані каротажні діаграми **597 свердловин**. Збір здійснено з відкритої бази *Wyoming Oil and Gas Conservation Commission*. До аналізу включено:

- гамма-каротаж (GR),
- резистивітет,

- нейтрон-щільнісний каротаж (neutron–density), з газових, нафтових і водозабірних свердловин.

Оскільки вивчуваний інтервал залягає на невеликій глибині, більшість доступних діаграм – це саме **гамма-каротажі**, як найбільш економічний метод.

Для гамма-каротажів була прийнята стандартна шкала **0–120 API**. Згідно з методикою:

- значення  $\leq 30$  API інтерпретувалися як *вугільні пласти*;
- **30–70 API** – як *пісковики*;
- **>70 API** – як *глини та алеволіти*.

Відбір інтервалів виконувався в програмі **IHS PETRA**, де для кожного пласта задавалися маркерні горизонти (*див. рис. ...*).

## 2.2. Стратиграфічні межі досліджуваного інтервалу

Стратиграфічний інтервал дослідження був обмежений вугільними пластами Tongue River Member:

- **верхня межа** – покрівля пласта **Smith**,
- **нижня межа** – підосва пласта **Pawnee**.

У випадках, коли пласт **Pawnee** відсутній у свердловині, нижньою межею приймали підосву пласта **Wall**.

У північній частині району, де пласт **Smith** виходить на денну поверхню, верхньою межею вважали покрівлю пласта **Anderson** (*див. рис. 15*).

Для свердловин північного сектору пісковики позначалися окремим кольором і кодом у PETRA для подальшої коректної побудови ізопахів.

## 2.3. Побудова кореляційних розрізів

На основі каротажних даних було створено **22 структурні кореляційні розрізи**:

- **19** у напрямку *схід–захід*, позначені A–A' ... S–S';
- **3** у напрямку *північ–південь*, позначені T–T', U–U', V–V'.

Для забезпечення рівномірної густоти мережі в кожен розріз включали по одній свердловині з кожної секції та кожного тауншипу. У деяких місцях кореляційні лінії містили пропуски через:

- відсутність свердловин у секції,
- відсутність повного інтервалу (Smith–Pawnee) у наявних каротажах.

На цих розрізах виконано:

- кореляцію вугільних пластів Smith, Anderson, Canyon, Cook, Wall і Pawnee,
- ідентифікацію пісковиків потужністю  $\geq 5$  ft,
- виявлення зон розщеплення вугілля (типові *Z-patterns*),
- уточнення латеральної мінливості фацій (*рис. ...*).

Особливу увагу приділено складним випадкам кореляції, пов'язаним із міграцією депоцентру торфоутворення, описаною в роботі *Goolsby & Finley (2000)* (*див. fig. 14*).

## 2.4. Нумерація свердловин

Свердловини ідентифікували за API-номером:

- формат для штату Вайомінг: **049-XXX-XXXXX**,
- для округу Кемпбелл – **049-005-XXXXX**.

Для компактності вкорочений варіант нумерації у розрізах записували як:

**0512345** ← API: *049-005-12345*.

## 2.5. Побудова ізопахових карт

На основі піків (*marker picks*), отриманих із каротажів, було побудовано три типи карт:

### 1. Ізопахи загальної товщі інтервалу Smith–Pawnee

Товщина розраховувалась у PETRA як різниця між глибиною верхнього та нижнього маркерів.

### 2. Ізопахи сумарної товщини пісковиків

У межах кожної свердловини:

- сумували потужності всіх пісковиків ( $\geq 5$  ft),
- значення наносили на карту методом інтерполяції (*рис. ...*).

### 3. Карта піскуватості (sandstone ratio map)

Визначали співвідношення:

$$\frac{\text{Потужність пісковиків}}{\text{Загальна потужність інтервалу}}$$

Ця карта дозволила простежити:

- формування північ–південного «пісковикового стовбура» (sandstone trunk),
- його східні та західні відгалуження,
- просторову відповідність з інтервалами розщеплення вугілля,
- зв'язок з продуктивним пісковиком Оедековенського родовища.

Для північної частини площі, де Smith виходить на поверхню, було побудовано **окремий набір карт** за аналогічними параметрами.

### 2.6. Узгодження результатів із попередніми моделями

Побудовані карти та кореляції порівнювали з моделями:

- лакустичної седиментації (*Ayers, 1986; Ayers, 2002*) – не підтверджується,
- флювіально-анастомозуючої системи з піднятими болотами (*Flores, 1993*) – частково підтверджується,
- низькорельєфного застійного болота (аналог Окефенкеє) (*McClurg, 1988*) – повністю відповідає отриманим даним.

При аналізі враховано результати структурних робіт Seeland (1988), Goolsby & Finley (2000) та інших дослідників.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИ ТА ЕТАПИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження особливостей літологічної будови та закономірностей поширення пісковикових тіл у товщі Tongue River Member формації Fort Union виконувалося на основі комплексного аналізу геофізичних матеріалів свердловин, картографічних даних та результатів їх подальшої інтерпретації в програмному середовищі **PETRA**. Методичний підхід передбачав поетапне поєднання кількісних та якісних методів геологічної інтерпретації з метою отримання репрезентативної моделі будови досліджуваного інтервалу, що дозволяє визначити умови його формування та перспективні зони розвитку газонасичених пісковиків.

#### 3.1. Програма та етапи дослідження

Загальна програма дослідження складалася з таких етапів:

##### 1. Збирання та підготовка вихідних даних

- завантаження геофізичних каротажних діаграм (гамма-каротаж, електричний опір, нейтронно-гамма) 597 свердловин із бази *Wyoming Oil and Gas Conservation Commission*;
- відбір свердловин, що повністю перекривають інтервал Smith–Pawnee (або Anderson–Pawnee для північної частини площі);
- приведення даних до єдиного формату для імпорту в **PETRA**.

##### 2. Стандартизація каротажних параметрів

- встановлення інтервалів API для виділення літотипів:
  - <30 API – вугілля,
  - 30–70 API – пісковик,
  - >70 API – аргіліт/алевроліт.
- введення єдиного «сланцевого рівня» (shale line) на рівні **70 API**.

##### 3. Побудова 22 кореляційних розрізів

- створення профілів уздовж кожного тауншипу (A–S),

- додаткових меридіональних профілів (T–V),
- уточнення кореляції вугільних пластів: Smith, Anderson, Canyon, Cook, Wall, Pawnee.

#### **4. Розрахунок потужності інтервалів та пісковиків**

- автоматичне обчислення потужності інтервалу за різницею між верхньою та нижньою кореляційною поверхнями;
- сумування товщин пісковикових прошарків  $\geq 5$  ft у кожній свердловині.

#### **5. Побудова карт ізолій**

- карти загальної потужності інтервалу (*рис. 42*),
- пісковикової потужності (*рис. 43*),
- карти співвідношення пісковик/загальна товщина (*рис. 44*),
- аналогічні карти для скороченого інтервалу в північній частині площі (*рис. 45–47*).

#### **6. Порівняння отриманих результатів з існуючими моделями палеооточення**

- аналіз попередніх моделей (Ayers, 2002; Goolsby & Finley, 2000);
- зіставлення пісковикових аномалій з областями розщеплення та вимирання вугільних пластів.

#### **7. Узагальнення та інтерпретація даних**

- формування висновків щодо флювіальної природи пісковикової товщі;
- оцінка перспектив розвитку газонасичених пісковикових тіл.

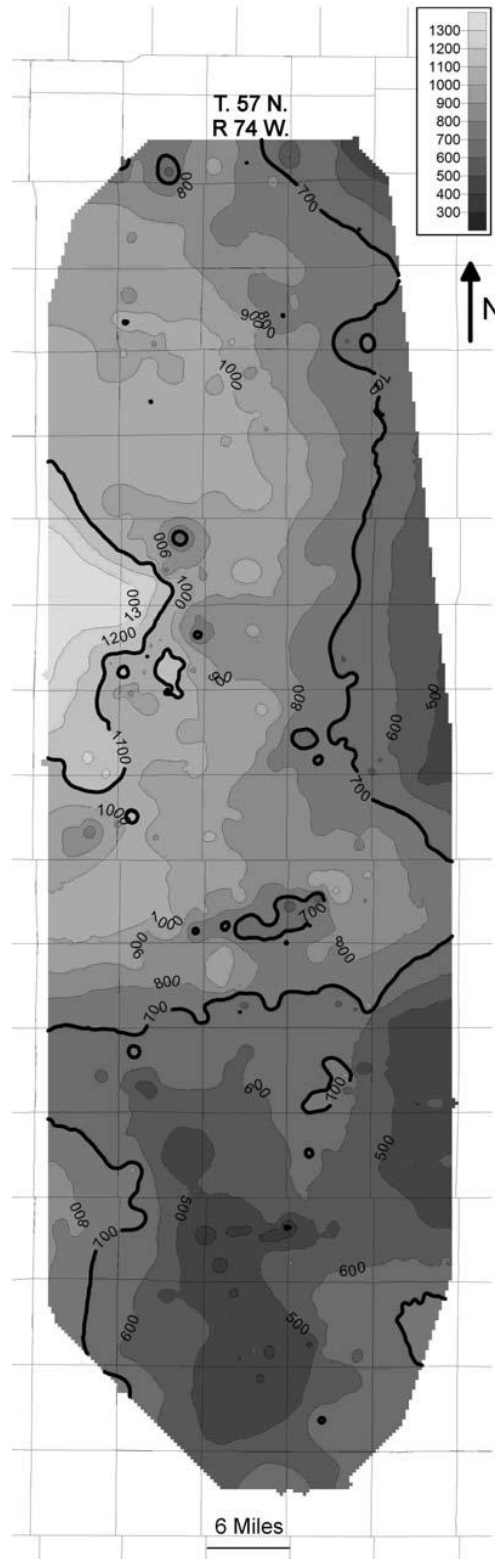


Рис. 42. Загальна товщина досліджуваного інтервалу (у футах).

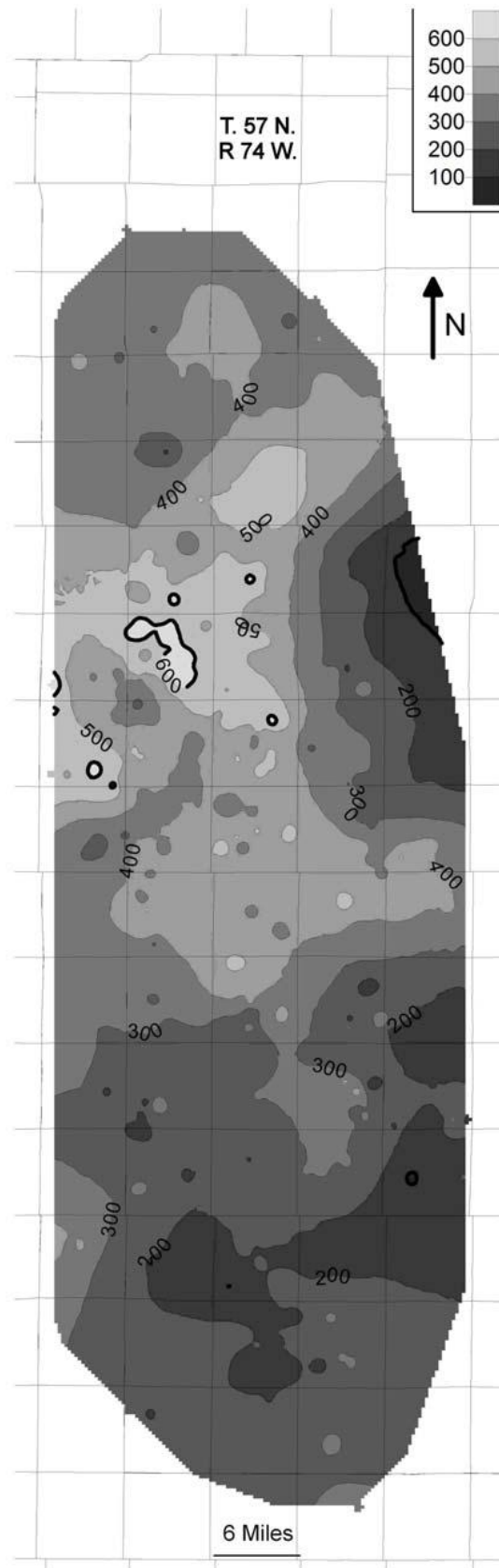


Рис. 43. Загальна товщина пісковика для досліджуваного інтервалу (у футах).

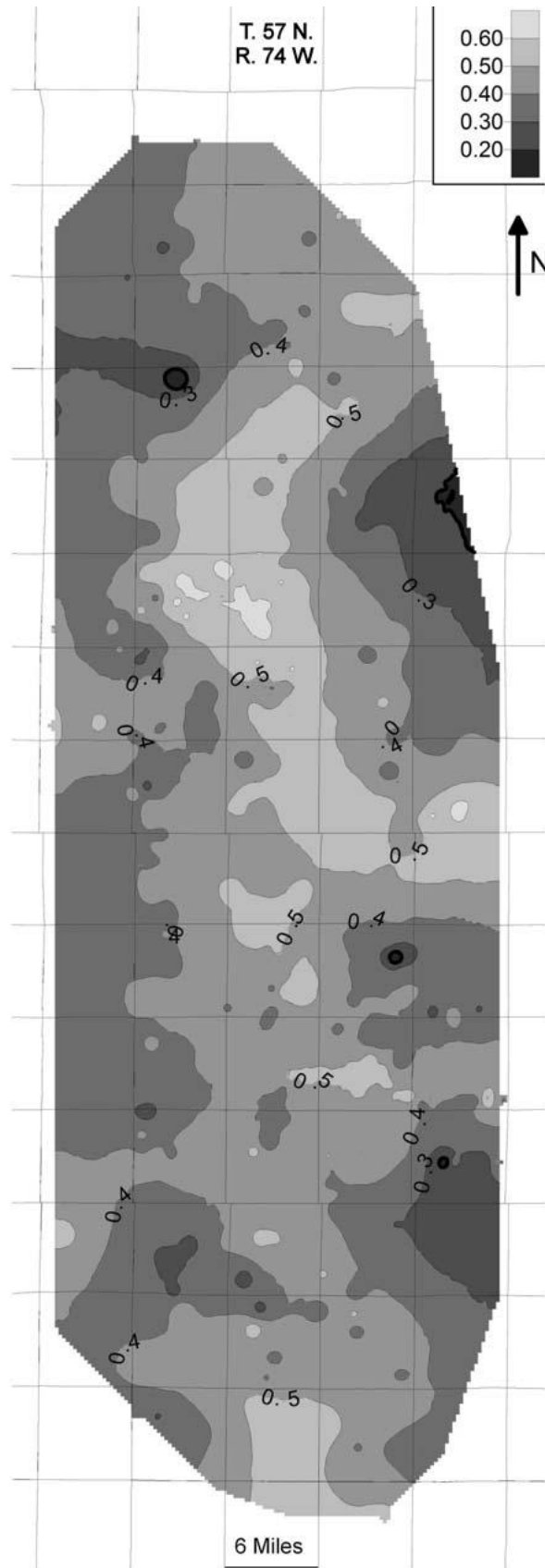


Рис. 44. Карта ізопакіал співвідношення пісковика до загального інтервалу.

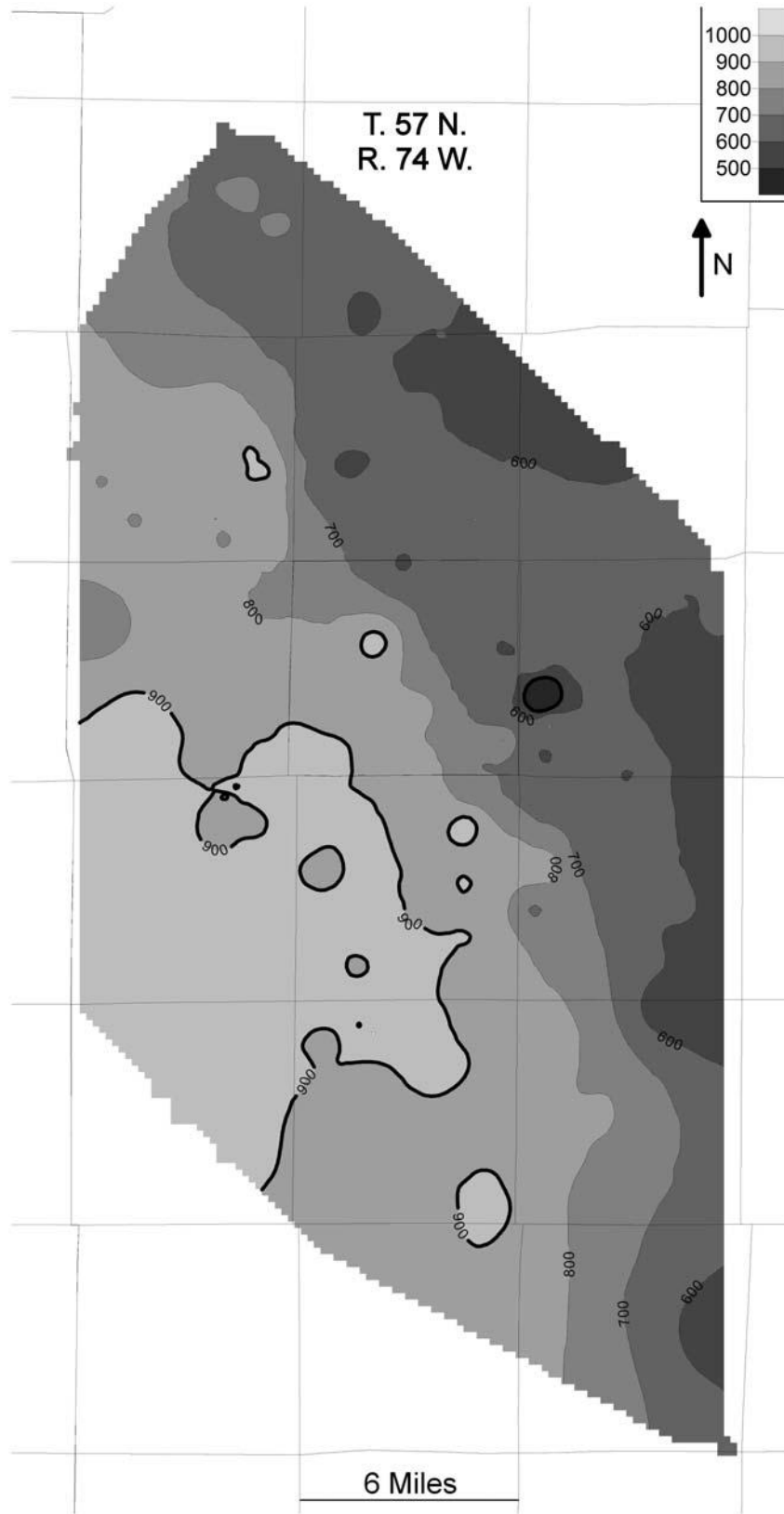


Рис. 45. Товщина скороченого інтервалу на півночі (у футах).

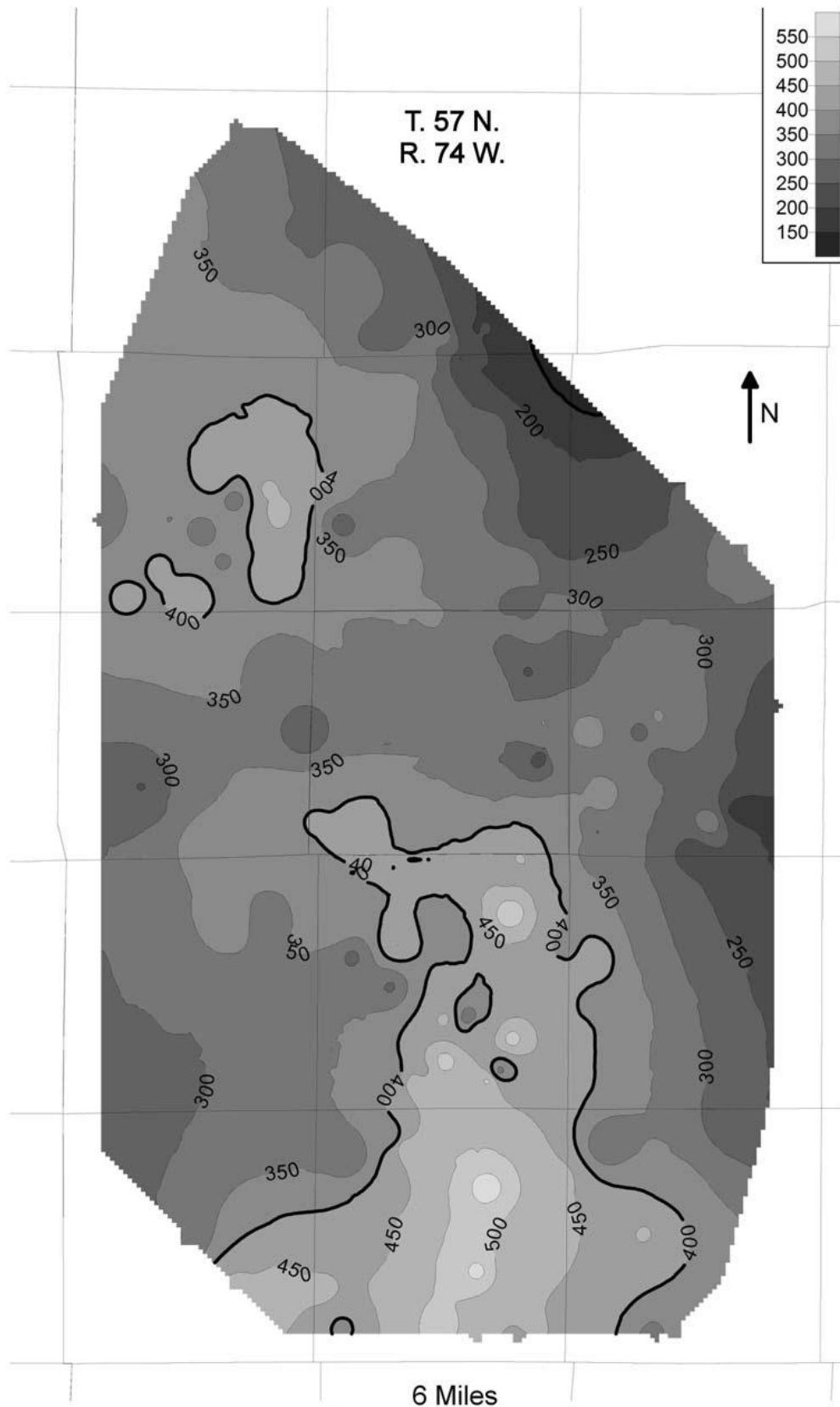


Рис. 46. Товщина пісковика скороченого інтервалу на півночі (у футах).

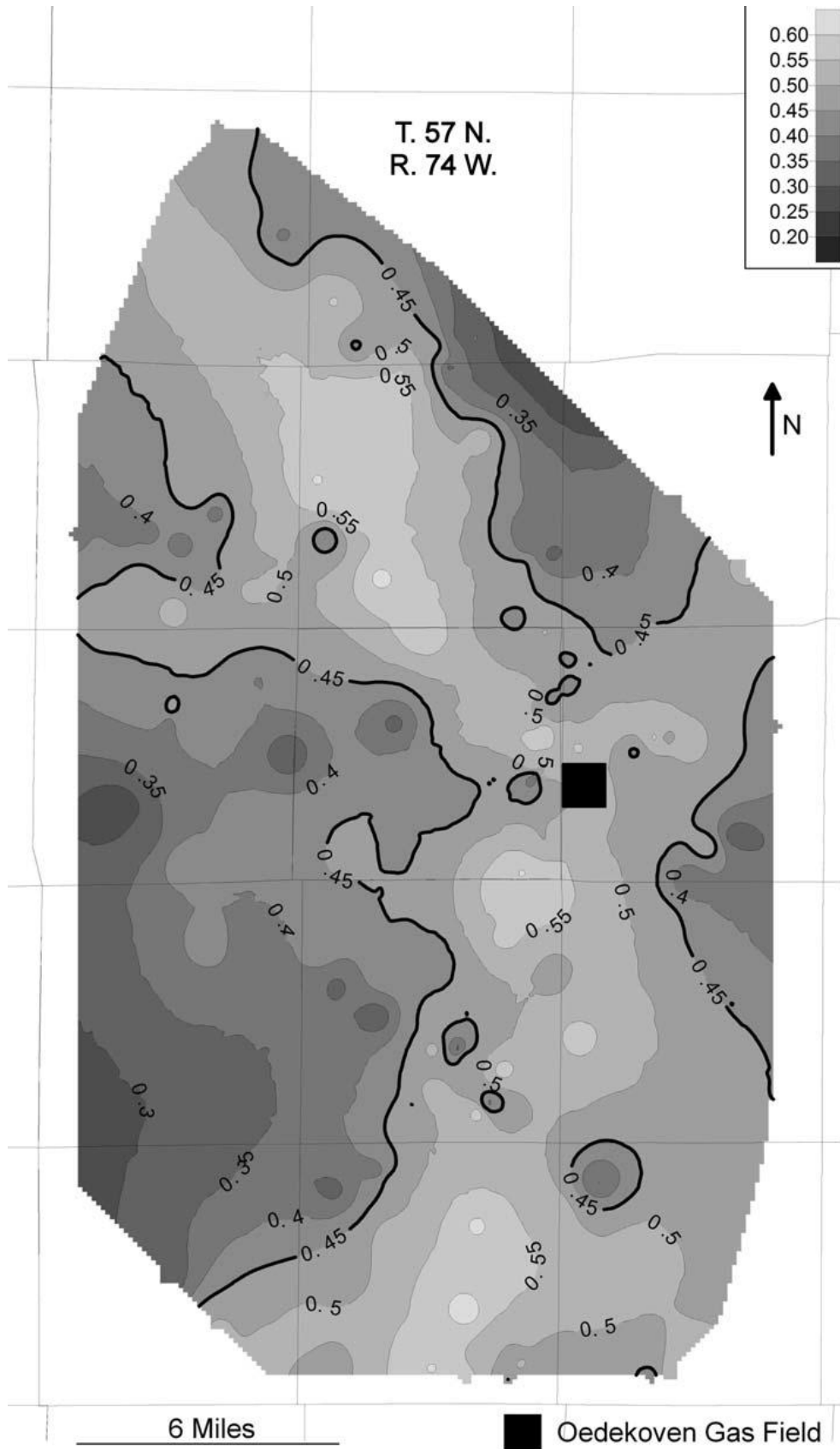


Рис. 47. Ізопахіальна карта співвідношення пісковика до загальної товщини для скороченого інтервалу. Газове родовище Едековен розташоване на висхідному меандрі річкової системи.

## 3.2. Опис застосованих методів

### 3.2.1. Аналіз геофізичних каротажів

Головним джерелом інформації стали стандартні каротажні діаграми свердловин. Основну роль відігравав **гамма-каротаж (GR)**, оскільки більшість свердловин пробурена на невеликі глибини, і саме GR присутній у переважній частині каротажів.

Для кожної діаграми визначали:

- інтервали з  $GR < 30$  API – типові низьорадіоактивні сигнали вугілля (підтверджено USGS, 2007);
- $GR 30–70$  API – пісковики (середній фон характерний для слабо глинистих порід);
- $GR > 70$  API – аргіліти й алевроліти.

Цей підхід широко застосовується для розчленування палеоценових відкладів формації Fort Union (Ayers, 2002).

Особливі труднощі викликала кореляція вугільних пластів у центральній частині площі, де, за даними Goolsby & Finley (2000), спостерігається повторне розщеплення, коса латеральна перспектива та можливе злиття пластів.

Для усунення неоднозначності для кожного профілю використовувався принцип:

- корелювання зверху вниз;
- прив'язка до найбільш стійких маркувальних пластів (Smith та Wall);
- використання сусідніх профілів як допоміжної контрольної сітки.

### 3.2.2. Картографічний аналіз та побудова кореляційних розрізів

Для визначення просторової мінливості розрізу Tongue River Member було побудовано **22 структурно-літологічні кореляційні розрізи** за даними 597 свердловин. Розрізи створювалися у програмному комплексі **PETRA**, що дозволило виконати систематизовану прив'язку каротажних кривих, провести зіставлення вугільних пластів та пісковикових тіл, а також встановити просторові тренди їхнього поширення.

Планове розташування розрізів включає:

- **19** схід–західних профілів, що відповідають кожному тауншип-ряду від А–А' до S–S' (рис. 16, рис. 22, рис. 30),
- **3** меридіональні профілі уздовж діапазонів R.73W, R.74W і R.75W, позначені як T–T', U–U', V–V' (рис. 38).

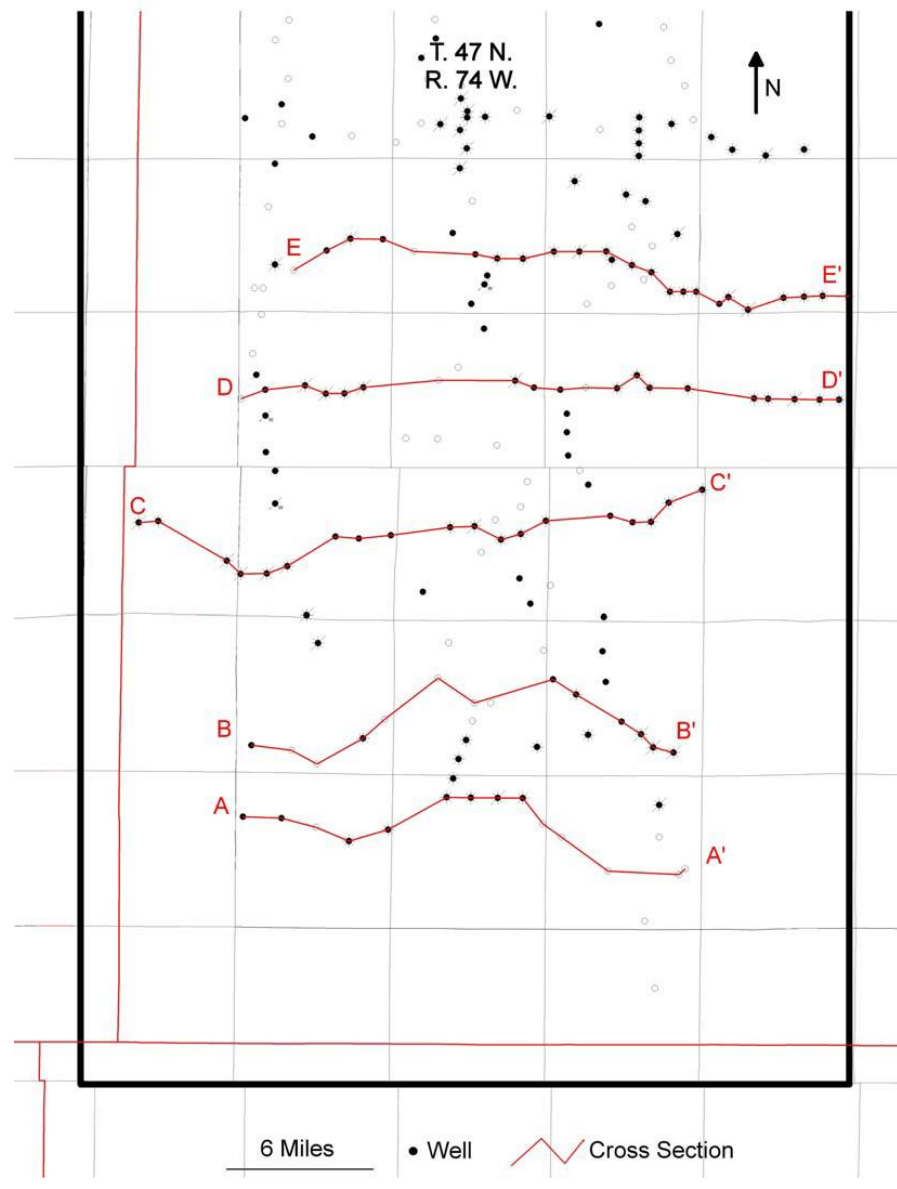


Рисунок 16. Карта південної частини досліджуваної області з розташуванням поперечних перерізів від А-А' до Е-Е'.

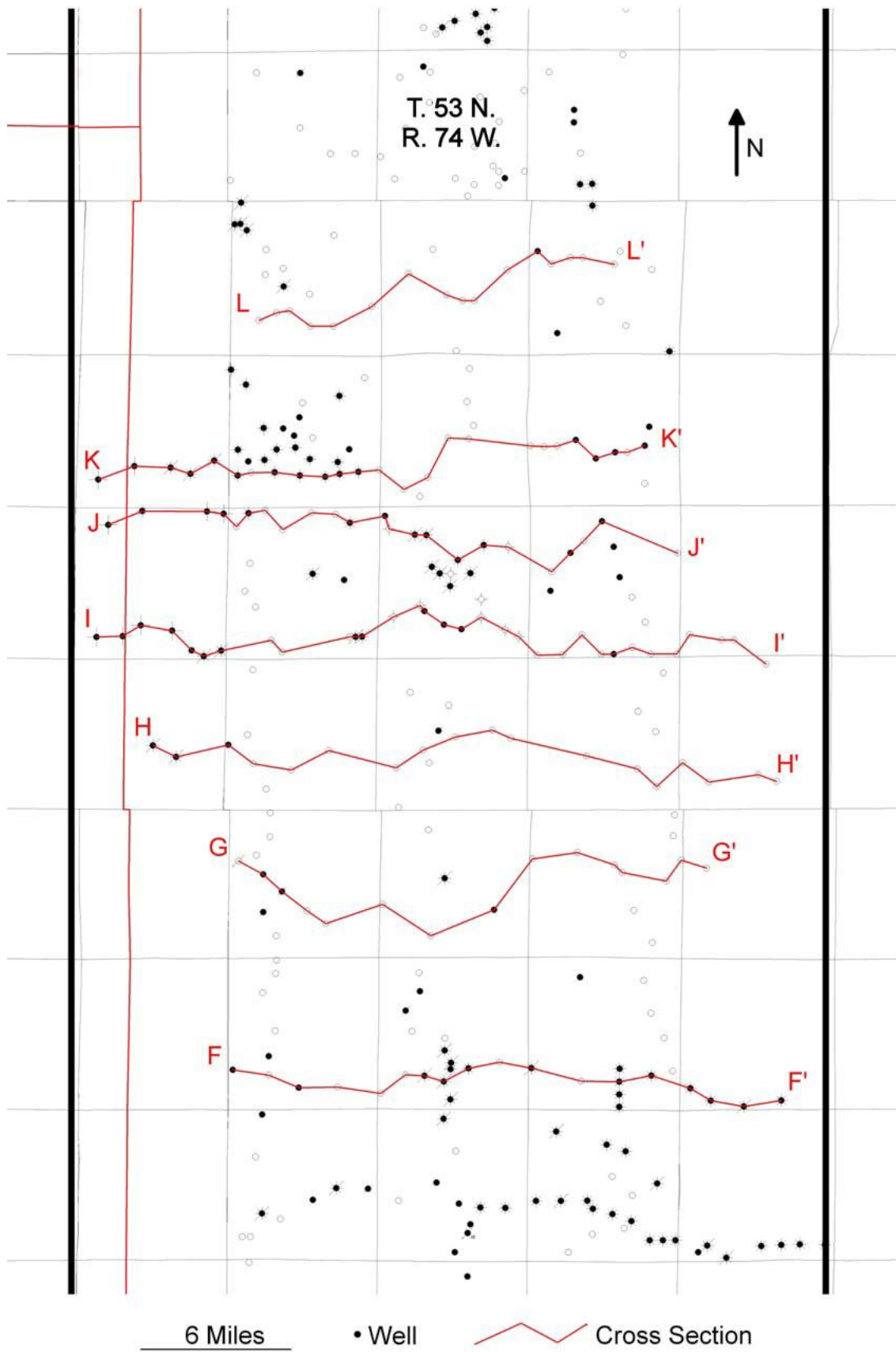


Рисунок 22. Центральна частина досліджуваної області з розташуванням поперечних перерізів від F-F' до L-L'.

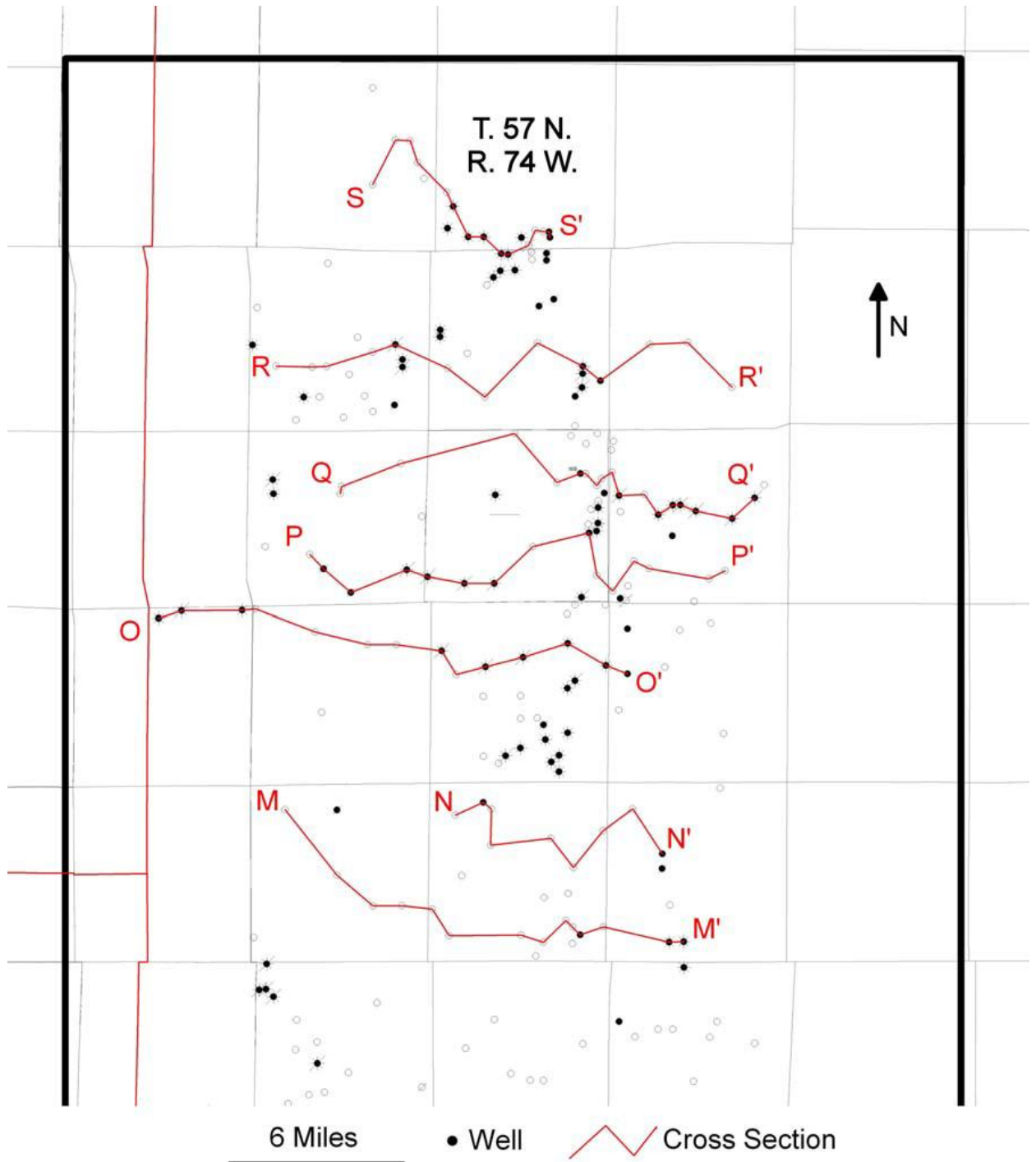


Рисунок 30. Північна частина досліджуваної області з розташуванням поперечних перерізів від M-M' до S-S'.

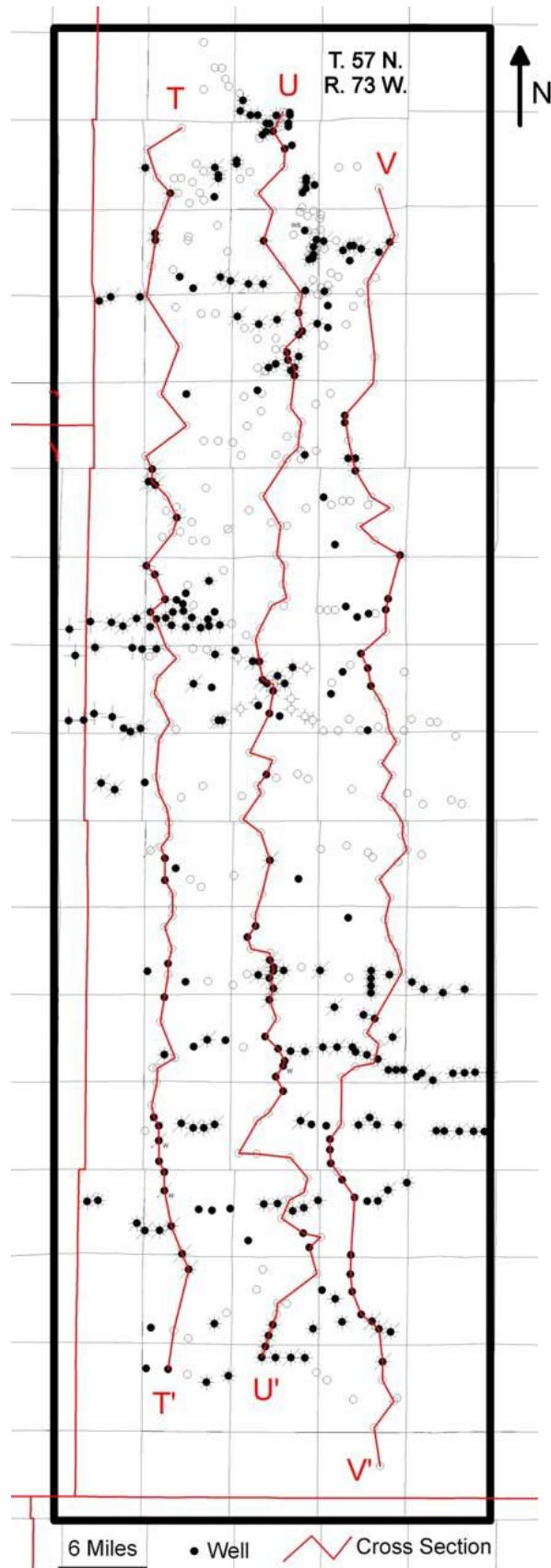


Рисунок 38. Досліджувана область з розташуванням поперечних перерізів Т-Т', U-U' та V-V'.

Таке рівномірне покриття площі забезпечило надійний структурний контроль і дозволило простежити латеральні закономірності в розповсюдженні пісковиків та вугільних тіл.

#### *Структура та особливості південних розрізів*

Розрізи А–А', В–В', С–С', D–D' та Е–Е' (рис. 16–21) демонструють найпростішу літологічну будову.

Основні характеристики цього сектору:

- присутні лише **два стійких вугільних пласти**,
- верхній пласт чітко ідентифікується як **Smith Coal**,
- нижній – товстий, масивний пласт, який у роботі інтерпретується як **Wall Coal**,
- пісковикові прошарки приурочені переважно до середини інтервалу й демонструють помірну латеральну мінливість.

Потужність досліджуваного інтервалу в середньому становить близько 600 ft, що також підтверджується картою загальної потужності (рис. 42).



Рисунок 17. Поперечний переріз А-А' (широта 42 дюйми пн. ш., права 75 дюйми зх. – права 73 дюйми зх.).



Рисунок 18. Поперечний переріз В-В'  
(широта 43 пн. ш., права 75 зх. – права 73 зх.).

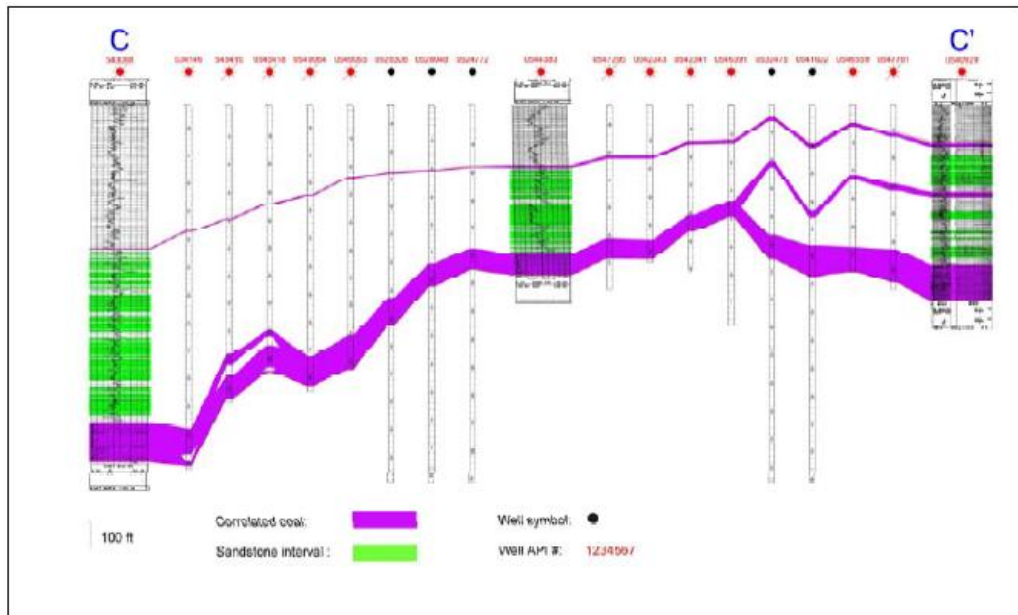


Рисунок 19. Поперечний переріз С-С'  
(широта 44 пн. ш., права 76 зх. – права 73 зх.).

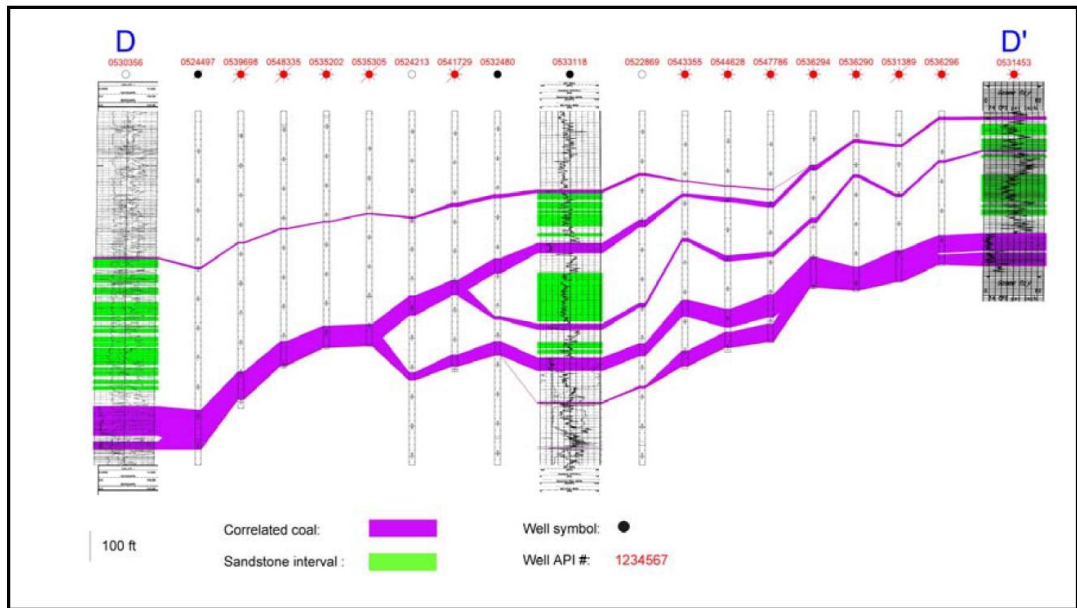


Рисунок 20. Поперечний переріз D-D' (широта 45° пн. ш., права 75° зх. – права 72° зх.).

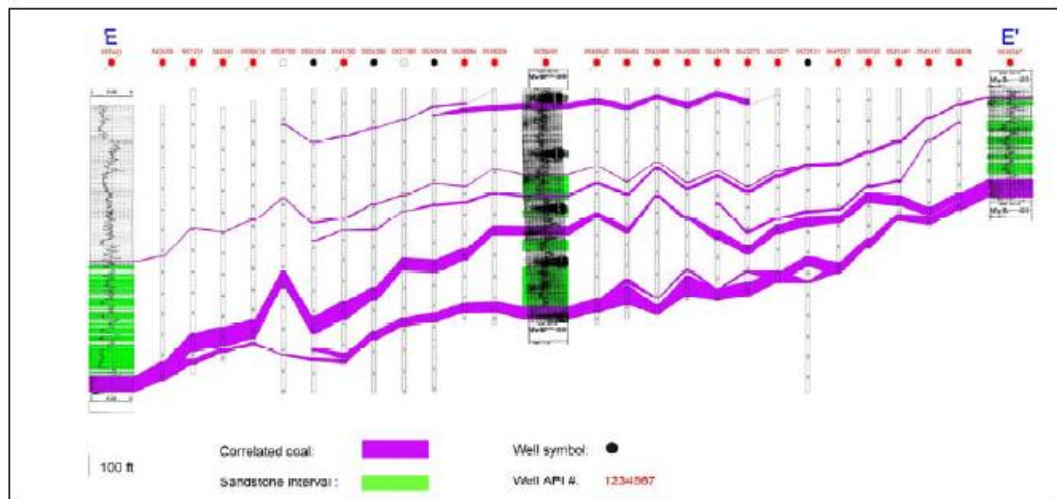


Рисунок 21. Поперечний переріз E-E' (широта 46 північна, права 75 західна – права 72 західна).

### *Літологічні зміни в центральній частині площі*

У центральній частині площі (розрізи F–F' до L–L', рис. 22–29) будова інтервалу ускладнюється:

- кількість вугільних пластів зростає до **4 і більше**,
- нижній товстий пласт, притаманний півдню, **розщеплюється** на кілька тонших прошарків,

- верхні та середні вугільні пласти також виявляють **асиметричне латеральне розділення**,
- східна частина розрізів демонструє більше розщеплень, тоді як у західному напрямку пласти зливаються в один.

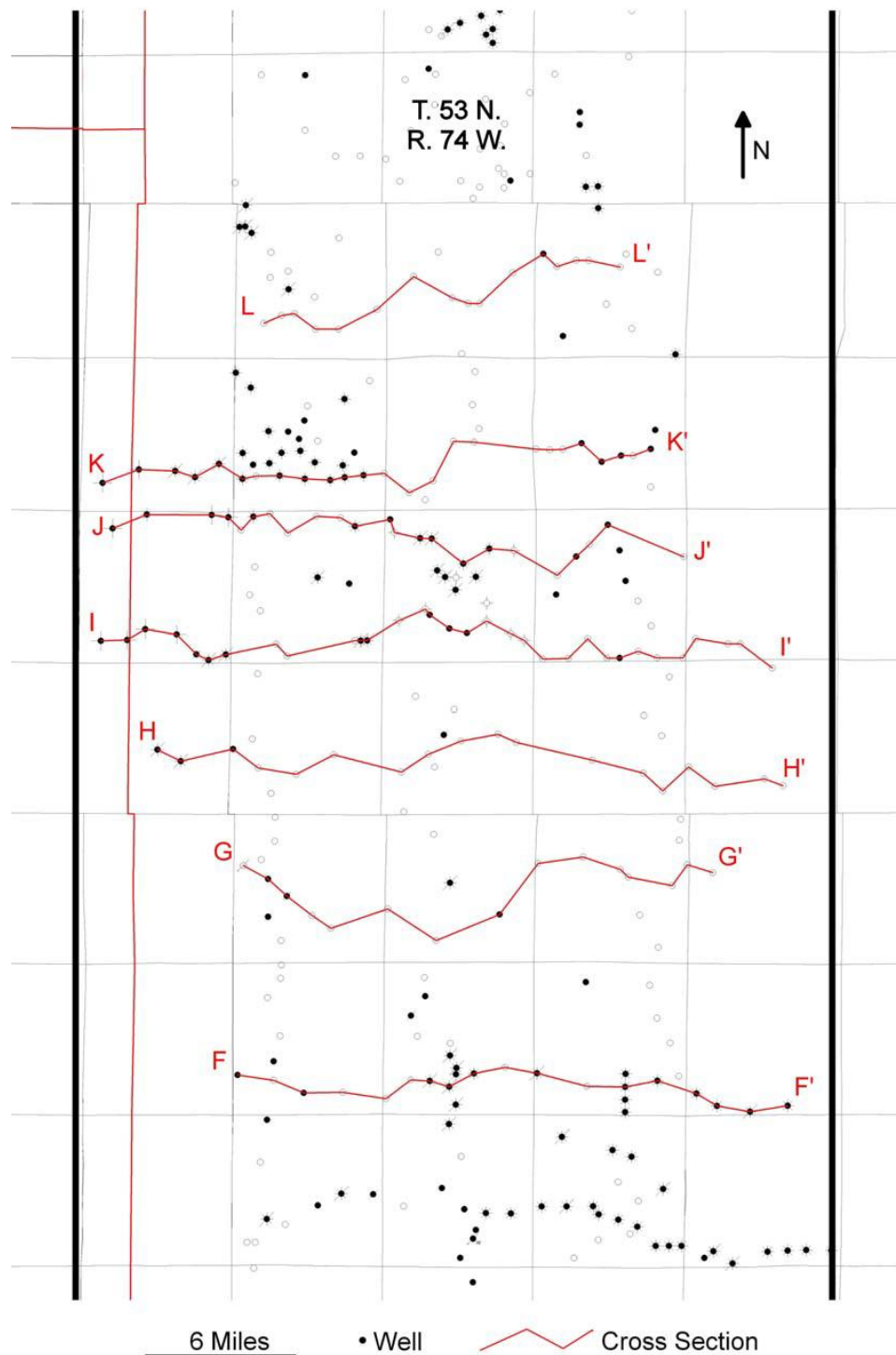


Рисунок 22. Центральна частина досліджуваної області з розташуванням поперечних перерізів від F-F' до L-L'.

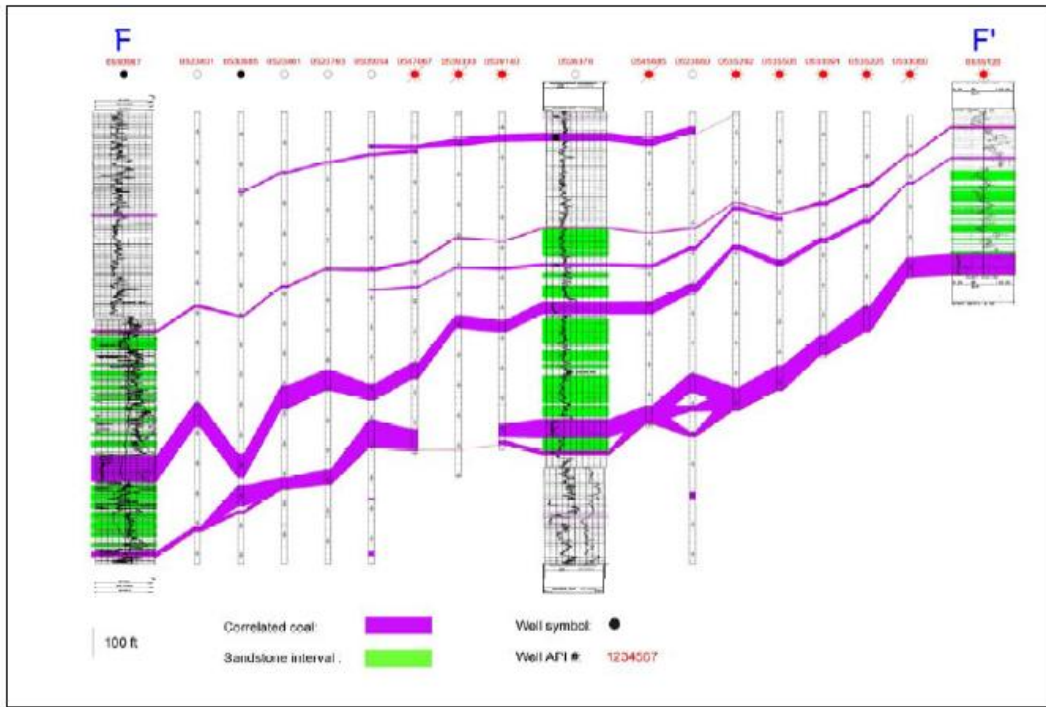


Рисунок 23. Поперечний переріз F-F'  
(широта 47 пн. ш., права 75 зх. – права 72 зх.).

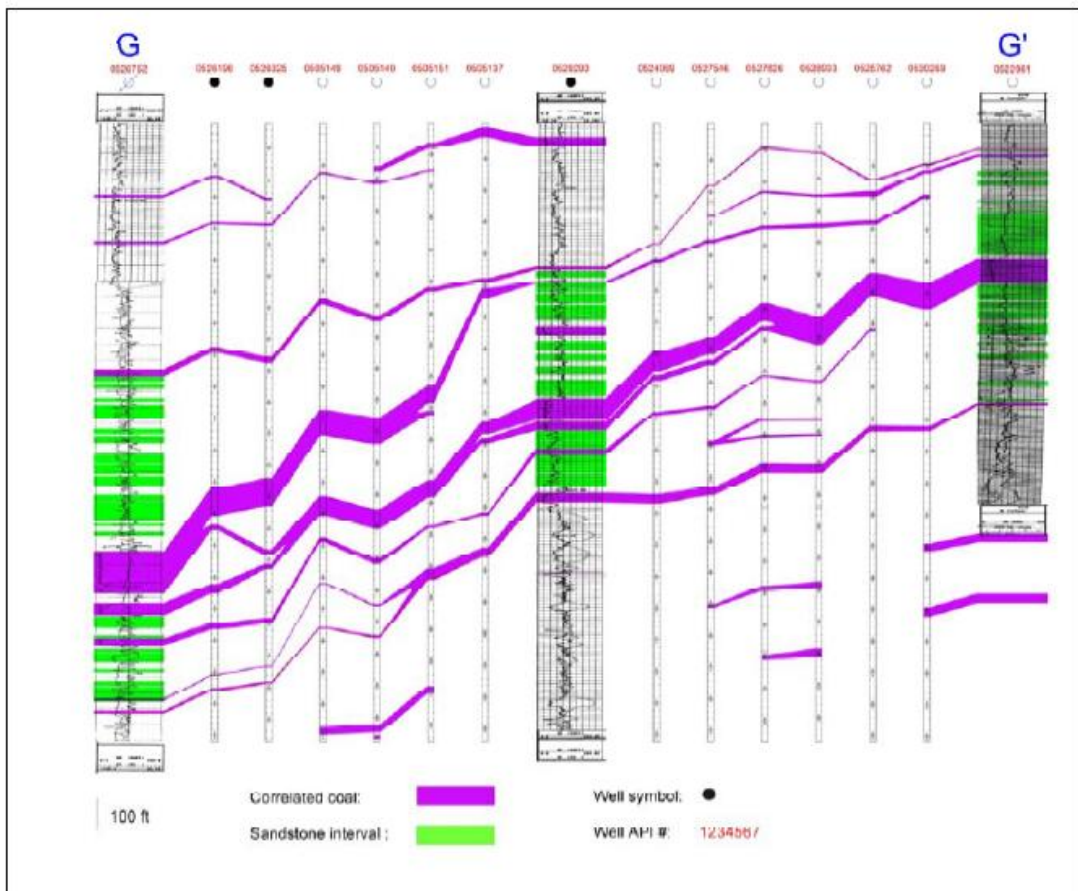


Рисунок 24. Поперечний переріз G-G' (широта 48 північна, права 75 західна,  
– права 72 західна).

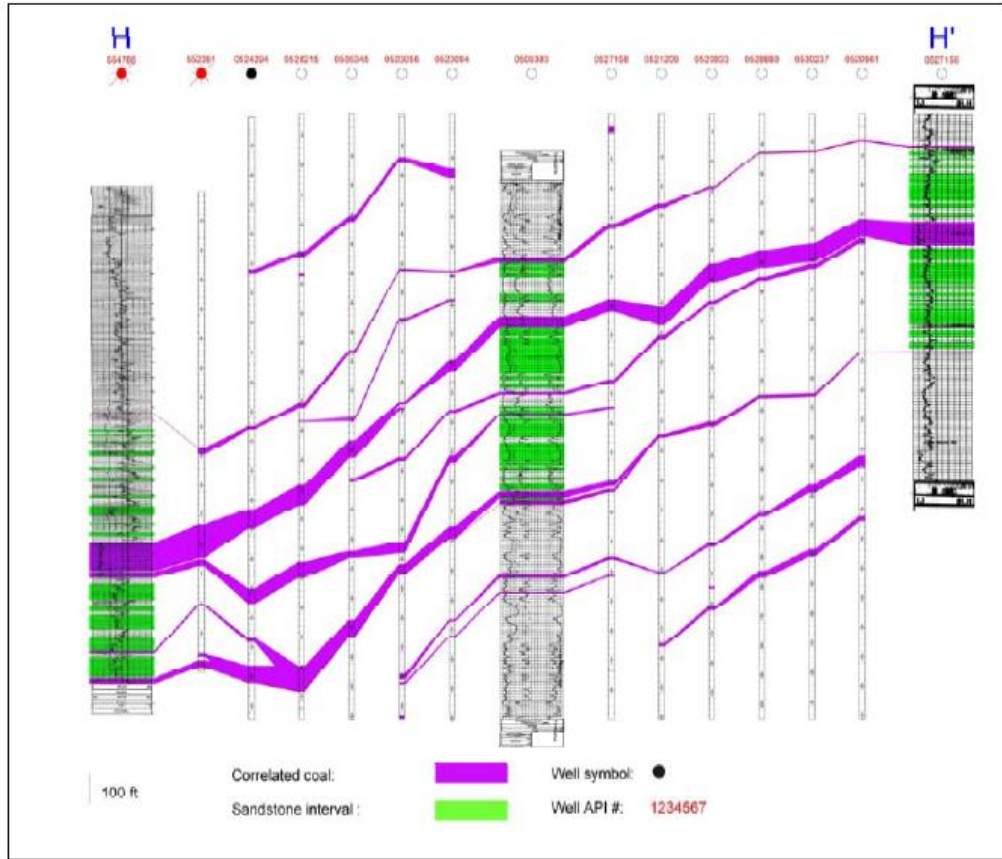


Рисунок 25. Поперечний переріз Н-Н' (широта 49 пн. ш., права 76 зх. – права 72 зх.).

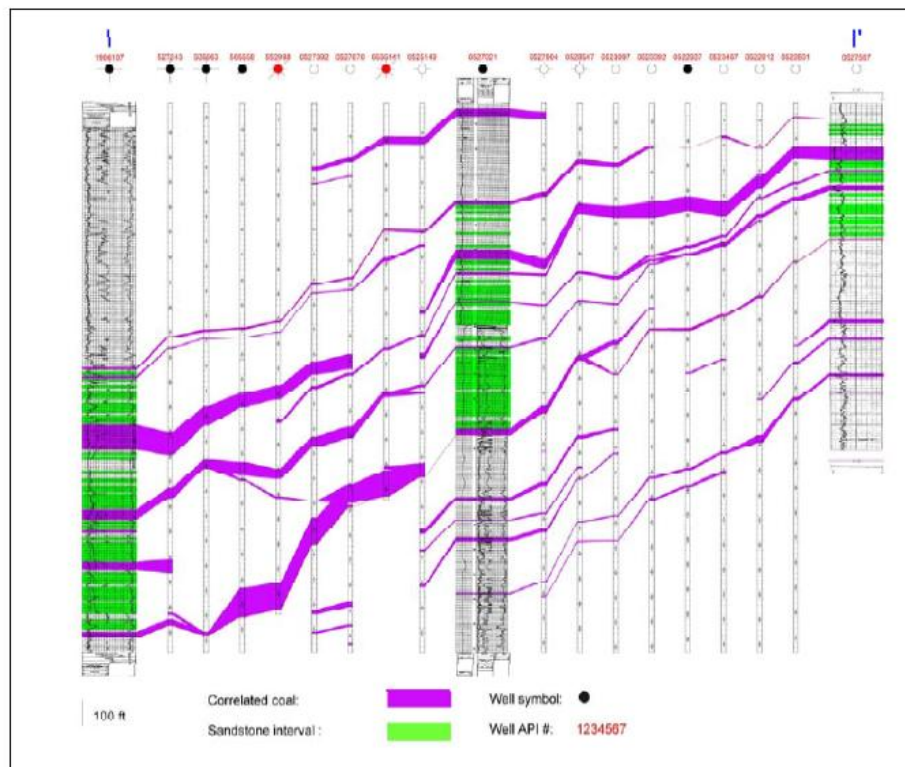


Рисунок 26. Поперечний переріз І-І' (широта 50 градусів північної широти, правий 76 градусів західної довготи – правий 72 градусів західної довготи).

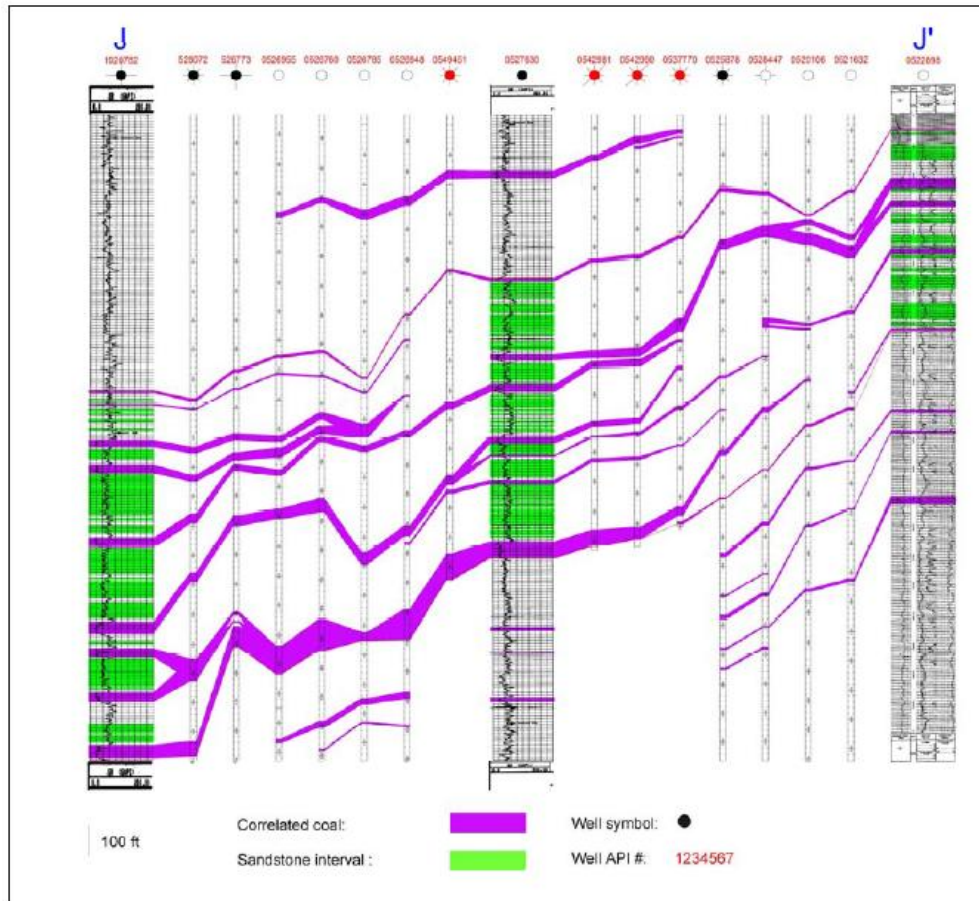


Рисунок 27. Поперечний переріз J-J' (широта 50 градусів північної широти, права 76 градусів західної довготи – права 73 градусів західної довготи).

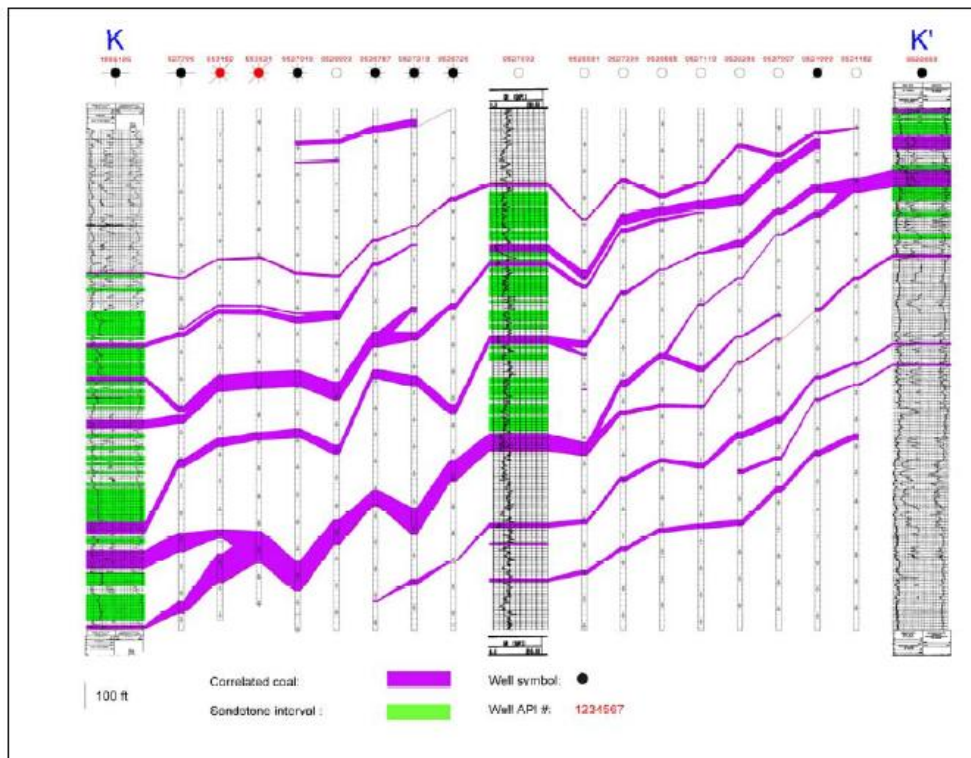


Рисунок 28. Поперечний переріз K-K' (широта 51 пн. ш., права 76 зх. – права 73 зх.).

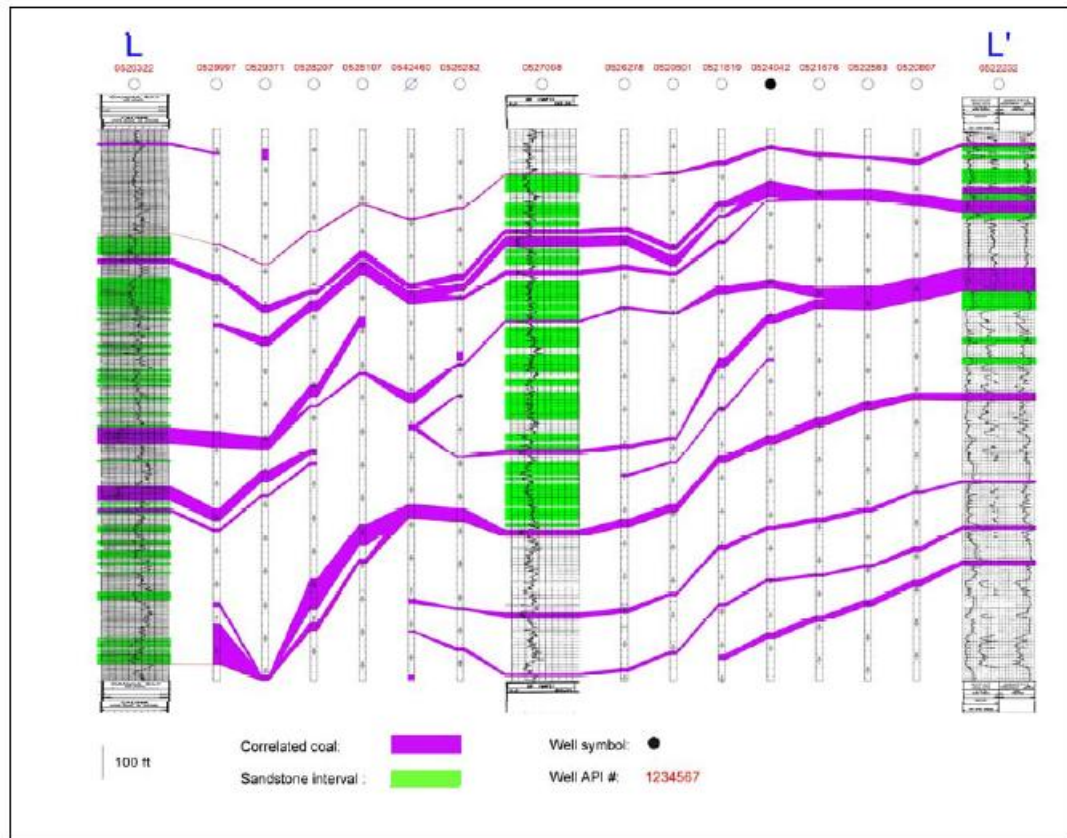


Рисунок 29. Поперечний переріз L-L'  
(широта 52 пн. ш., права 75 зх. – права 73 зх.).

Таке латеральне «мігрування» зон розщеплення чітко простежується при порівнянні розрізів **F–F'**, **G–G'**, **H–H'** та наступних, де місце первинного розділення пласта зміщується у **північно-західному напрямку**.

Подібні закономірності описували Goolsby & Finley (2000), які пов'язували їх з **міграцією торф'яних депоцентрів та неотектонічними рухами**.

#### *Будова розрізів північної частини площі*

Розрізи **M–M'** до **S–S'** (рис. 30–37) свідчать про:

- зменшення кількості вугільних розщеплень порівняно з центральним сектором,
- збереження **складної, але більш впорядкованої структури**,
- необхідності використання двох кореляційних інтервалів:
  - **повного (Smith–Pawnee)**, якщо пласт Smith не виношений,

- скороченого (Anderson–Pawnee) – у зонах виходу Smith на денну поверхню.

Для цих розрізів окремі пісковикові тіла виділяються як **світло-сірі піки** у PETRA, відповідно до оригінальної англійської роботи.

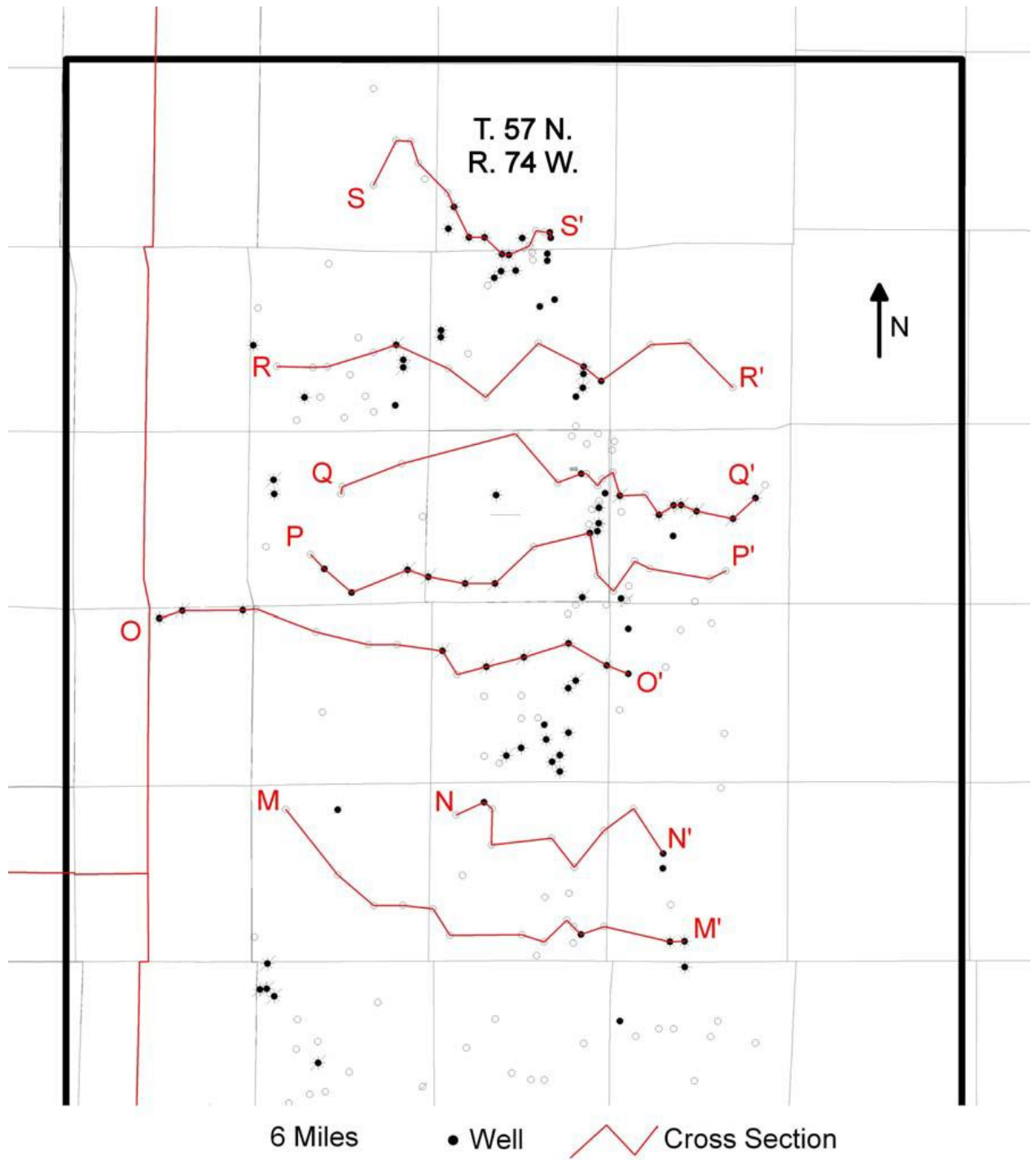


Рисунок 30. Північна частина досліджуваної області з розташуванням поперечних перерізів від M-M' до S-S'.

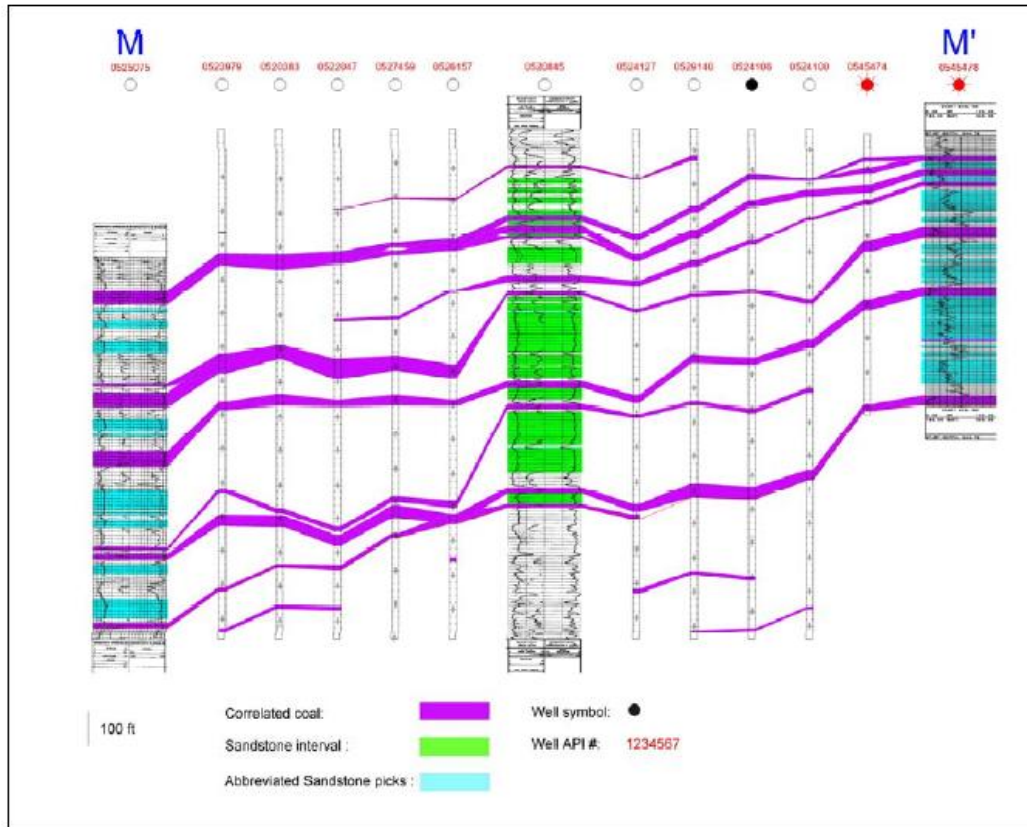


Рисунок 31. Поперечний переріз М-М'  
(широта 53 пн. ш., права 75 зх. – права 73 зх.).

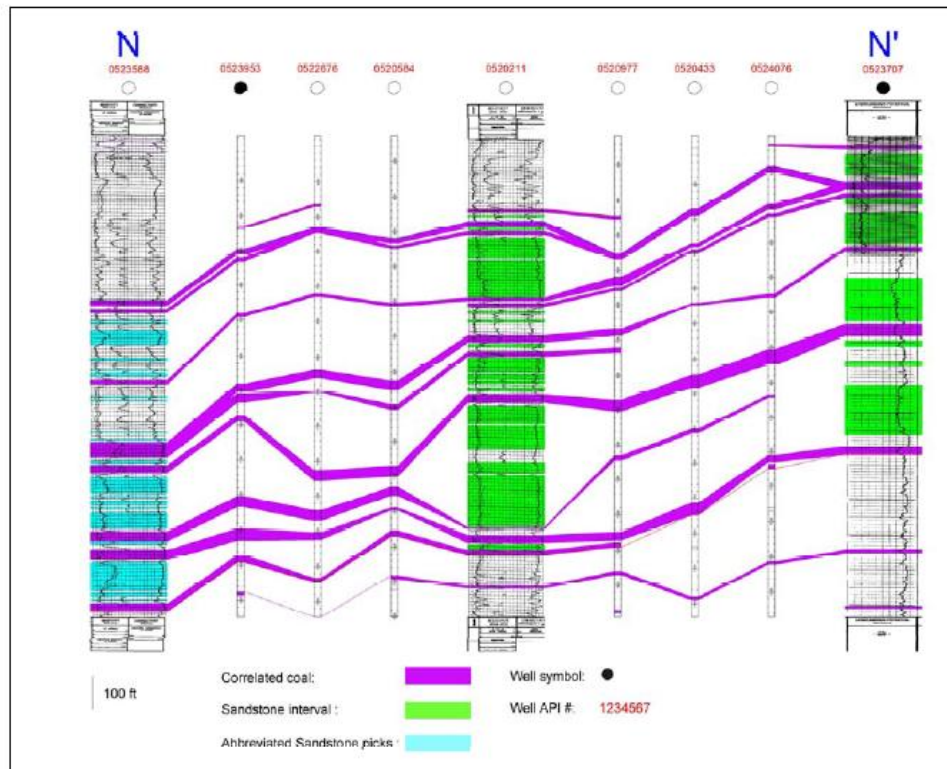


Рисунок 32. Поперечний переріз N-N'  
(широта 53 пн. ш., права 74 зх. – права 73 зх.).

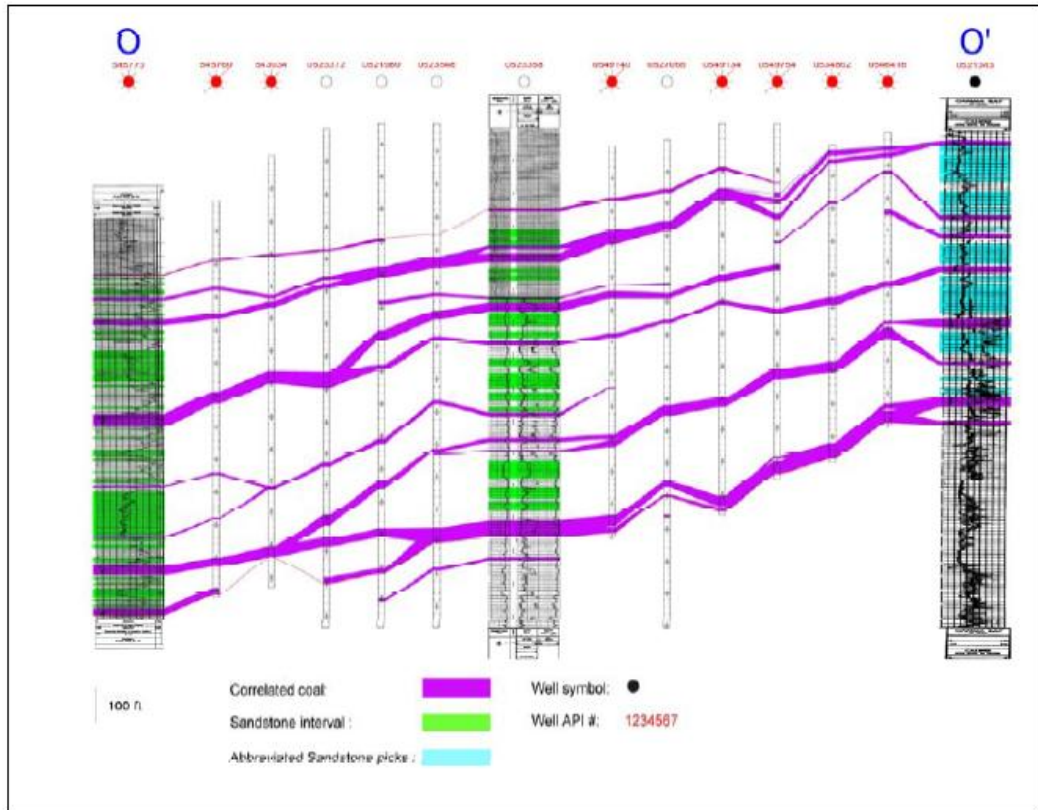


Рисунок 33. Поперечний переріз О-О'  
(широта 54 пн. ш., права 76 зх. – права 73 зх.).

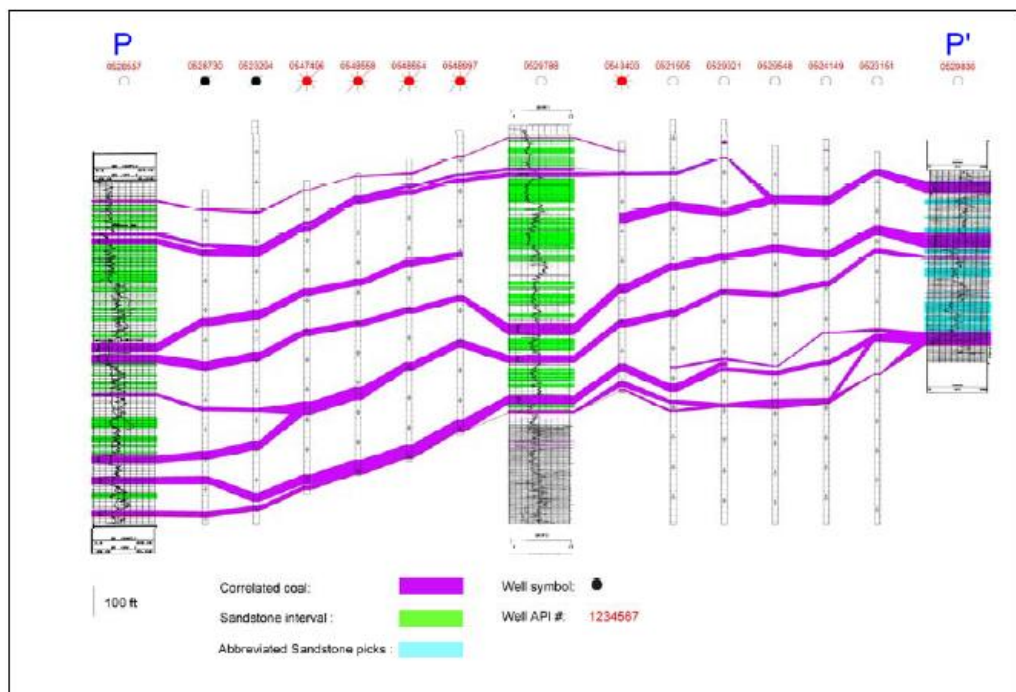


Рисунок 34. Поперечний переріз Р-Р' (широта 55° пн. ш.,  
права 75° зх. – права 73° зх.).

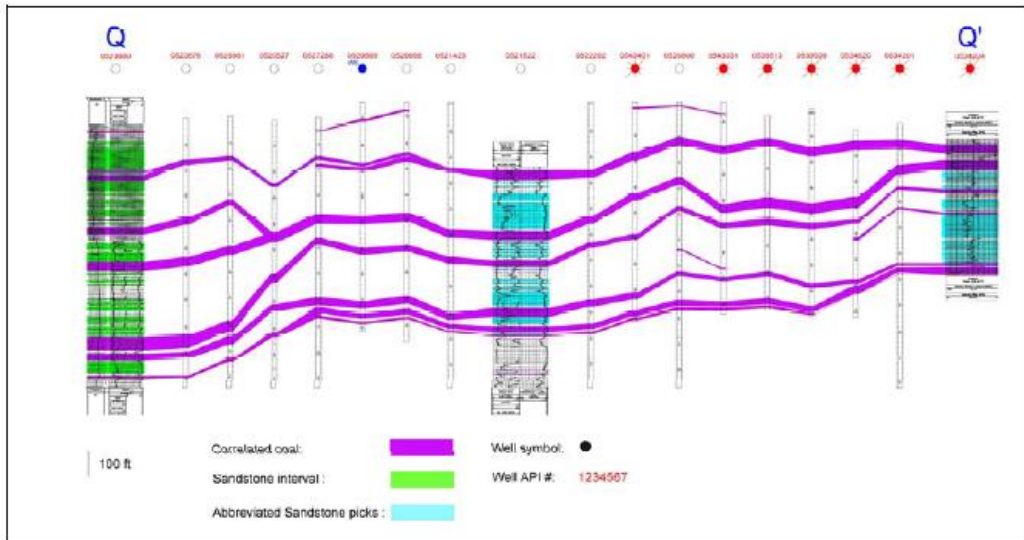


Рисунок 35. Поперечний переріз Q-Q'  
(широта 55° пн. ш., права 75° зх. – права 73° зх.).

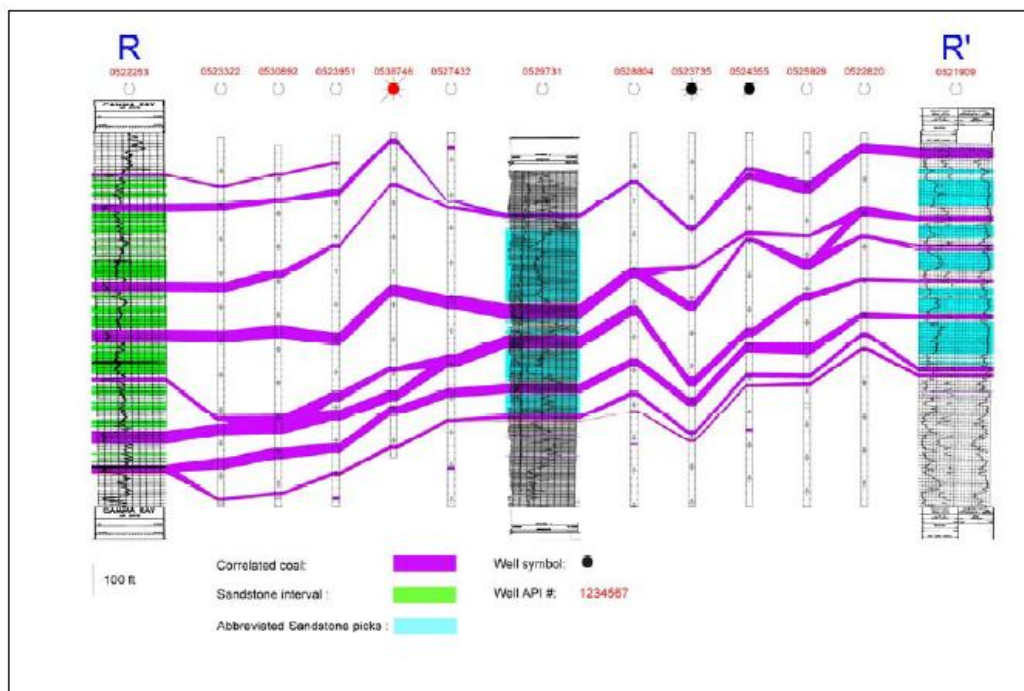


Рисунок 36. Поперечний переріз R-R' (широта 56 північна,  
права 75 західна – права 73 західна).

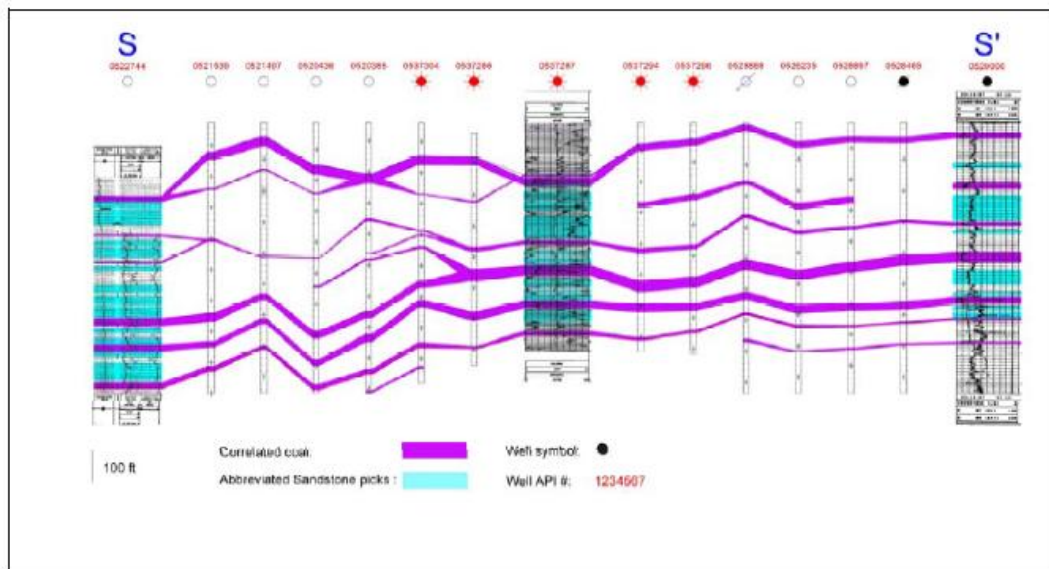


Рисунок 37. Поперечний розріз S-S'  
(широта 57 N., ширина 75 W. – ширина 74 W.).

Саме в цьому секторі найкраще проявляється крупне **північ–південне пісковикове тіло**, яке відображене на картах пісковикової потужності (рис. 43 та рис. 46).

*Виявлені просторові тенденції*

Порівняння всіх 22 профілів дозволило встановити:

1. **Зона максимальної складності та розщеплення вугільних пластів** розташована в центральній частині площі (Т. 48–52 N). Це підтверджується великими варіаціями у розрізах F–L.
2. **Зона стабільного розвитку масивних вугільних пластів** перебуває на півдні (рис. 17–21), де розщеплення практично відсутні.
3. **Зміщення зон розщеплення на північний захід** відбувається поступово, що свідчить про:
  - рух депоцентру торфонакопичення,
  - або про тектонічно зумовлене локальне прогинання (Goolsby & Finley, 2000).
4. **Формування крупного пісковикового тіла, витягнутого у північ–південному напрямку**, чітко простежується на:

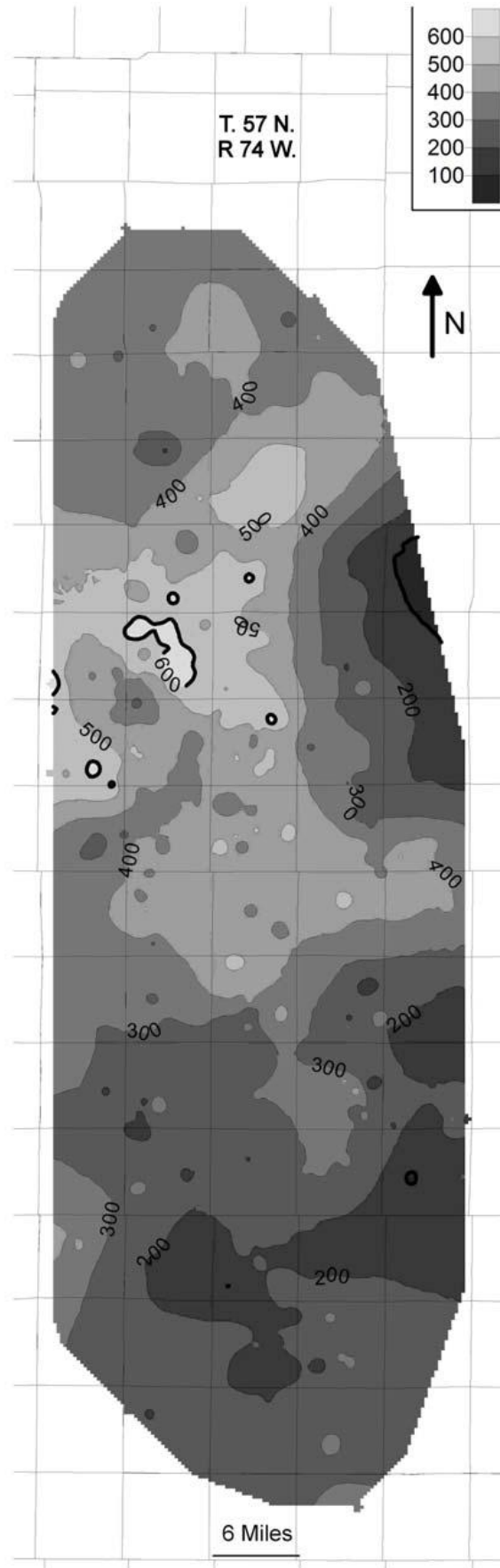


Рисунок 43. Загальна товщина пісковика для досліджуваного інтервалу (у футах).

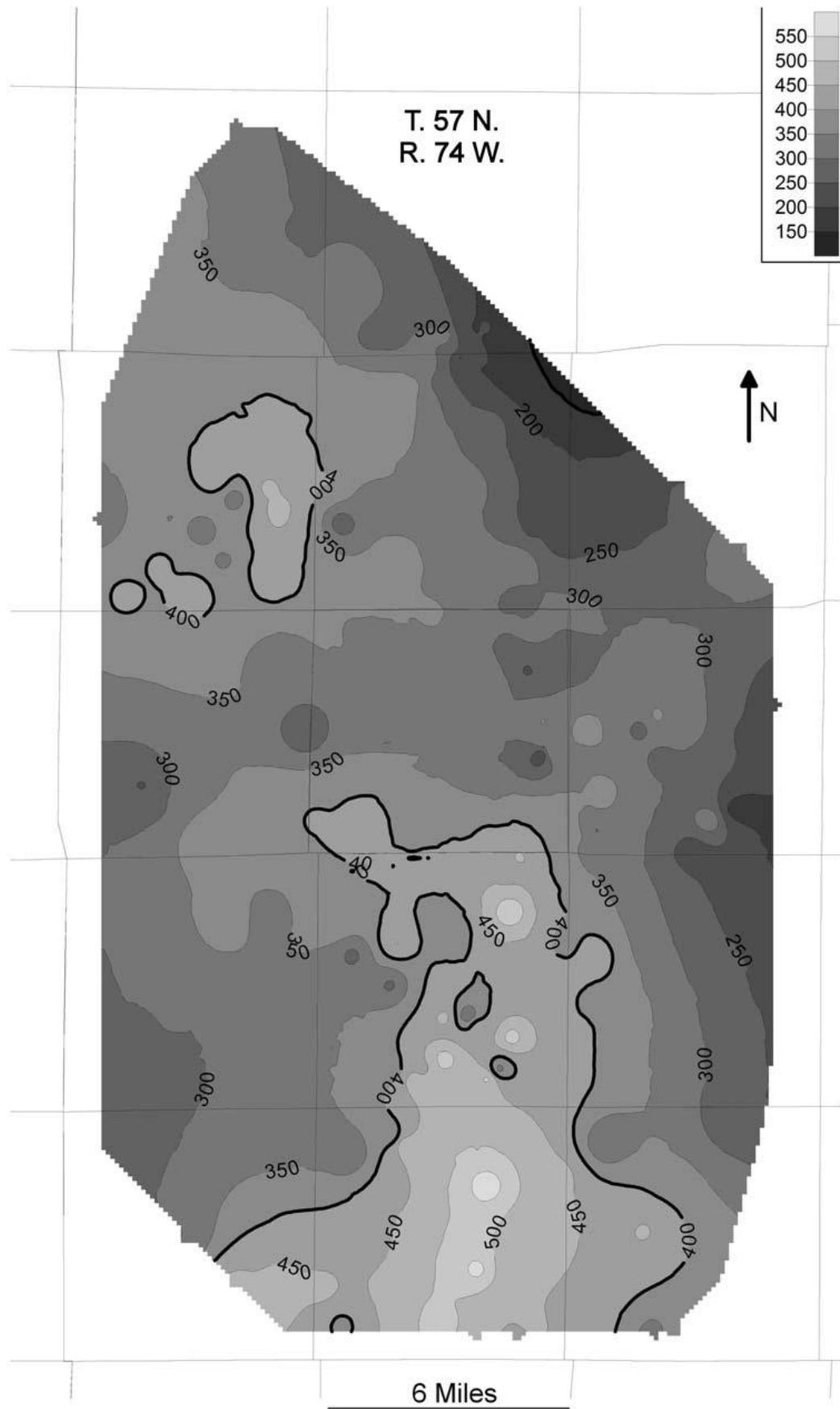


Рисунок 46. Товщина пісковика скороченого інтервалу на півночі (у футах).

- карти товщини пісковиків,

- карти співвідношення пісковик/загальна товщина ,
- скорочені карти для півночі.

Ці закономірності істотно допомогли у подальшому визначенні палеогеографічних умов та реконструкції флювіальних процесів.

#### *Значення кореляційних розрізів у подальшому аналізі*

Побудовані розрізи стали основою для:

- виділення структурних та літологічних аномалій;
- подальшого розрахунку потужностей інтервалів;
- генерації ізопахових карт;
- інтерпретації природи пісковикових тіл як частин **флювіальної системи палеозаплав**;
- аналізу перспектив наявності газонасичених пісковиків.

Таким чином, картографічний аналіз та мережа розрізів забезпечили повну тривимірну картину внутрішньої будови Tongue River Member і стали ключовим елементом методичного підходу в роботі.

### **3.2.3. Розрахункові методи**

Для отримання кількісних параметрів досліджуваного інтервалу Tongue River Member було застосовано комплекс розрахункових процедур у середовищі **IHS PETRA**, який забезпечує інтеграцію каротажних даних, автоматизований підрахунок літологічних інтервалів та побудову ізопахових карт. Розрахунки виконувалися окремо для **повного інтервалу (Smith–Pawnee)** та **скороченого інтервалу (Anderson–Pawnee)** в північній частині дослідження, де пласт Smith виходить на поверхню або не був зафіксований у каротажі.

#### *Алгоритм визначення загальної потужності інтервалу*

Загальна потужність (Total thickness) для кожної свердловини обчислювалася автоматично як:

$$\text{Total thickness} = Z_{\text{bottom}} - Z_{\text{top}}$$

де:

- **Ztop** – глибина покрівлі пласту Smith (або Anderson для північних розрізів),
- **Zbottom** – глибина підшви Pawnee або Wall coal.

Отримані значення використовувалися при побудові карти повної потужності інтервалу (рис. 42), де чітко простежується тенденція до збільшення товщини на захід, у напрямку осі басейну.

*Виділення пісковикових інтервалів та розрахунок їхньої сумарної потужності*

Пісковики визначалися за критерієм гамма-каротажу:

- **GR ≤ 70 API** – пісковик (нижче «shale line»),
- **GR ≤ 30 API** – вугілля,
- **GR > 70 API** – глиниста товща.

Автоматизований модуль PETRA виділяв пісковикові прошарки завтовшки **не менше ніж 5 ft**, відповідно до методики, наведеної в англомовній частині (рис. 15).

Сумарна товщина пісковиків обчислювалася за формулою:

$$\text{Sandstone thickness} = \sum_{i=1}^n h_{sand_i}, \quad h_{sand_i} \geq 5 \text{ ft}$$

де n – кількість пісковикових інтервалів у конкретній свердловині.

Результати підрахунків були використані для побудови карти пісковикової товщини (рис. 43) та карти пісковикової товщини для північного укороченого інтервалу (рис. 46).

В обох випадках карти демонструють чітко виражений **північ–південний пісковиковий тренд**, який збігається з зонами розщеплення вугілля на кореляційних розрізах.

*Розрахунок пісковикового коефіцієнта (Sandstone ratio)*

Для оцінки відносної пісковиковості інтервалу було розраховано коефіцієнт:

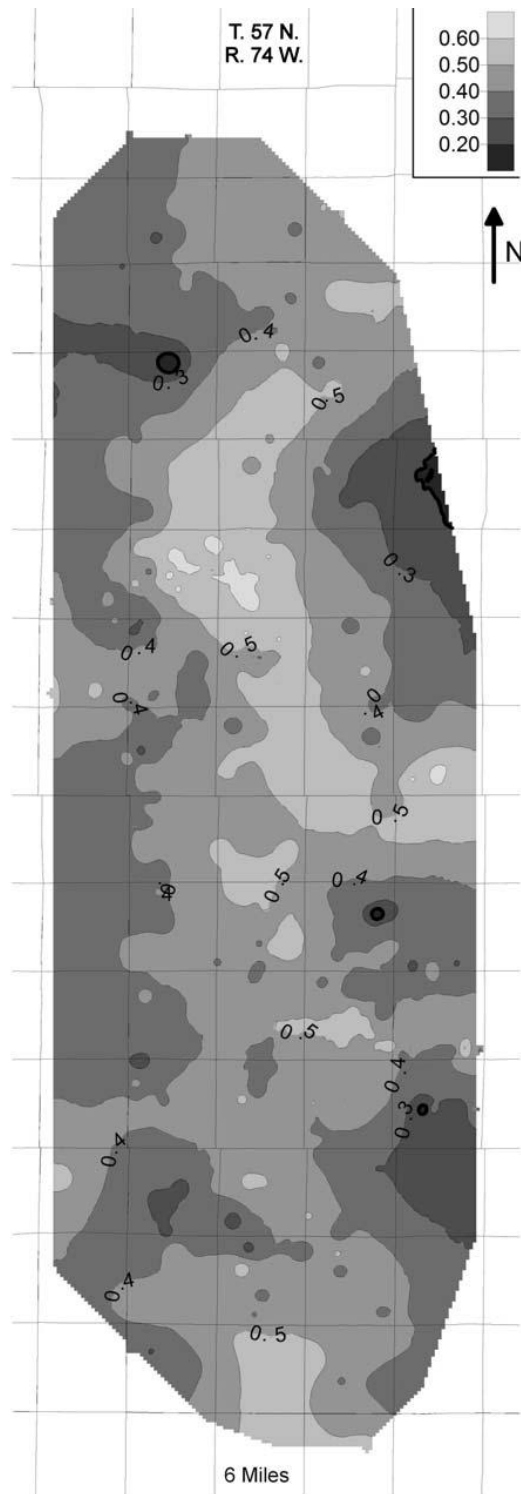


Рисунок 44. Карта ізопакіал співвідношення пісковика до загального інтервалу.

$$\text{Sandstone ratio} = \frac{\text{Sandstone thickness}}{\text{Total thickness}}$$

Цей параметр є ключовим для аналізу флювіальних систем та виявлення каналів, оскільки високі значення ( $>0.35$ ) часто відповідають:

- русловим пісковикам,
- проксимальним фаціям,
- меандровим тілами та їхнім бічним приростам.

Карта коефіцієнта піщаникості (рис. 44) демонструє:

- зв'язний протяжний «піщаниковий стрижень» уздовж осі північ–південь,
- бокові відгалуження на сході (T.46N, T.49N),
- ймовірне західне відгалуження у зоні T.51N, R.76W.

#### *Ручна перевірка автоматичних розрахунків*

Після автоматичного розрахунку всі піщаникові інтервали:

- переглядалися вручну,
- коригувалися у випадках різких стрибків GR, пов'язаних із технічними артефактами,
- переформатовувалися у межах проблемних інтервалів, наприклад, у зонах складного розщеплення пластів у центральній частині (розрізи F–L, рис. 23–29).

Ручна перевірка була критично важливою, оскільки:

1. у багатьох свердловинах присутній лише **гамма-каротаж**, що збільшує ризик хибної інтерпретації;
2. межі піщаникових тіл могли **завищуватися або занижуватися** через слабку амплітуду сигналу;
3. у центральній частині площі розщеплені пласти створювали численні псевдопіки.

### 3.2.4. Порівняльний аналіз із літературними даними

Отримані дані було зіставлено з моделями, опублікованими в роботах:

- Ayers (2002) – модель дельтової та озерної седиментації;
- Flores & Bader (1999) – модель болотного вуглеутворення;
- Goolsby & Finley (2000) – карти максимальних потужностей вугілля;
- USGS (2007) – стратиграфічна схема формації Fort Union.

Порівняння свідчить, що:

- **модель дельтового проградуючого середовища** не відповідає отриманим даним (пісковики занадто тонкі та не утворюють клиноподібних тіл → див. розділ Discussion);
- **модель флювіального середовища з підвищеними болотами (raised bogs)** частково узгоджується зі спостереженнями;
- **модель низинного болотного середовища** (аналог сучасних заболочених низин) найбільш повно узгоджується з даними і пояснює збереження потужних вугільних пластів.

### 3.3. Узагальнення результатів методичного етапу

Використані методи дозволили:

- побудувати детальну схему кореляції вугільних та пісковикових прошарків;
- виявити синусну північ–південну пісковикову аномалію, що інтерпретується як русловий флювіальний канал;
- пояснити закономірності розщеплення потужних вугільних пластів у центральній частині площі;
- виділити перспективні зони розвитку газоносних пісковиків (зокрема, район родовища Oedekoven).

## РОЗДІЛ 4. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Основною метою даної роботи було визначення потенційних зон накопичення та міграції газу з вугільних пластів (coalbed methane) у пісковикових стратиграфічних пастках Верхнього підрозділу формації Fort Union – світі Tongue River. Аналіз геофізичних каротажних діаграм у межах досліджуваної території дав змогу кількісно оцінити поширення пісковикових тіл, виконати картування їхньої потужності та співвіднести ці дані з літологічними та палеогеографічними моделями регіону. Побудовані карти потужності (рис. 42–47) та карти співвідношення пісковіку до загальної товщини (рис. 44) відображають просторові закономірності осадо накопичення й демонструють характер середовища, в якому формувалися досліджені товщі.

### 4.1. Роль Ларамійської орогенії у формуванні басейну

Історія розвитку Powder River Basin у післякрейтасовий час суттєво пов'язана з імпульсами Ларамійської орогенії. За даними Curry (1971), Seeland (1988) та Lisenbee (1988), перші ознаки тектонічної активізації фіксуються вже після пізньокрейдового часу й виявляються у локальному згущенні потужності світу Tullock у південно-західній частині басейну.

Моделі різних авторів щодо часу підняття масиву Black Hills дещо різняться:

- **Lisenbee (1988):** зміна палеотечій з **східних на західні** під час ранньопалеоценового осадо накопичення Tullock вказує на початок підняття Black Hills.
- **Seeland (1988):** східні течії зберігаються аж до Lebo Shale, а зміна напрямку відбувається пізніше.
- **Curry (1971):** збільшення пісковиковості у Tullock не корелює з крайовими частинами басейну, що підтверджує лише початкову стадію орогенії.

Важливим є те, що **метаморфічні уламки**, виявлені у пісковиках світу Tongue River (Curry, 1971; Lisenbee, 1988; Seeland, 1988), свідчать про оголення докембрійських порід у масивах Black Hills, Big Horn та Laramie вже в середині або наприкінці палеоцену. Таким чином, тектонічні імпульси та неотектонічна конфігурація басейну були важливим чинником літологічної зональності, що простежується в інтервалі досліджень.

## 4.2. Середовище осадонакопичення світу Tongue River

Депозиційне середовище Tongue River Member є об'єктом численних дискусій. Розглядаються три основні моделі:

1. **лідово-домінована навколоозерна система із західними дельтами** (Ayers, 1986);
2. **флювіальна система з меандруючими та анастомозуючими руслами** (Flores, 1993);
3. **флювіально-озерно-болотна модель низинних заболочених територій** (McClurg, 1988; Goolsby & Finley, 2000).

Отримані дані показують, що інтервал Tongue River має домінантні **ознаки флювіально-болотного середовища**, з періодичними фазами озерної седиментації, про що свідчать наявні тонкошарові глини та laterally extensive shale beds.

### 4.2.1. Пісковикові аномалії та їхня інтерпретація

Карта співвідношення «пісковик/загальна товщина» (рис. 44) демонструє чітку **північ–південну пісковикову «опуклість»**, що збігається з областю **відсутності вугілля >50 ft**, за даними Goolsby & Finley (2000) та Ayers (2002) (рис. 48).

Це свідчить про те, що:

- дана зона функціонувала як **флювіальний канал або каналізована система**;
- активне надходження піску перешкоджало тривалому накопиченню торфу.

Порівняння з моделлю Ayers (1986):

- Ayers враховував лише пісковики >40 ft (рис. 49),
- ця робота – всі пісковики >4 ft, що дало більш деталізовану картину.

Результат: пісковики **товщають на захід**, до осі басейну (рис. 42–43), а не тоншають, як припускав Ayers. Це суперечить дельтовій моделі, але узгоджується з флювіальною.

#### 4.2.2. Флювіальна модель Flores (1993)

Флювіальна система:

- мала **загальний напрямок течії на північ**,
- була представлена **межовими меандрами та притоками**,
- розвивалась у межах **низьких заболочених рівнин**.

Особливості, які підтверджують цю модель:

- лінійний північ–південний пісковиковий тренд;
- бокові «гілки» пісковикових аномалій – типові для приток;
- обмежена латеральна міграція русел через наявність навколишніх болот.

Це узгоджується з побудованими картами пісковиковості (рис. 44–46).

#### 4.2.3. Оцінка моделі raised bog (Flores, 1993)

Модель піднятих боліт передбачає:

- формування товстих (>90 ft) вугільних пластів;
- різкі межі («wants»), коли флювіальні канали врізалися у болото;
- обмежену латеральну міграцію каналів.

Частково дані це підтверджують:

- у розрізах U–U', V–V', F–F', L–L', P–P' справді присутні «wants»;
- чорні вугілля мають низький вміст сірки та золи – як у raised bogs.

Але:

- більшість товстих пластів **не обриваються різко**, а **роздвоюються**, тоншають і тривають десятки миль (до 70 mi на U–U’);
- це суперечить класичній моделі Raised bog і більше відповідає **болотно-озерним умовам із локальними епізодами затоплення** (McClurg, 1988).

#### 4.2.4. Модель McClurg (1988): низинні болота (low-lying swamp)

McClurg запропонував аналог – **Okefenokee Swamp**, де:

- болото періодично затоплюється,
- товсті вугілля формуються у «core swamp zones»,
- розділення пластів пояснюється епізодами озерної седиментації.

Ця модель добре пояснює:

- багатократне розщеплення вугільних пластів,
- присутність laterally extensive shale beds,
- різкість зміни стратиграфії в болотних системах.

Єдина проблема моделі:

ми знаємо, що в Tongue River діяла **масштабна флювіальна система з активним привносом піску**, чого немає в Okefenokee.

#### 4.3. Узагальнена модель осадо накопичення Tongue River Member

Порівняння усіх доступних даних дозволяє зробити такі висновки:

1. Депозит Tongue River формувався в умовах **низинної болотистої рівнини**, у яку впадала **північна флювіальна система** з меандрами.
2. Флювіальні канали були стабільними, оскільки **бракувало грубозернистого матеріалу**, тому авульсії були обмежені.
3. Навколишні болота діяли як фільтр, що пояснює **низьку сірчистість і низьку зольність** вугільних пластів.
4. Товсті вугільні пласти часто **розділяються, тоншають або зливаються**, що характерно для болотних систем, а не для raised bogs.

5. Пісковиковий «стрижень» (рис. 44) відображає **стабільний флювіальний канал**, який одночасно:

- накопичував значні товщі піску,
- перешкоджав утворенню вугілля.

#### **4.4. Значення флювіальної системи для формування газонасичених пісковиків**

Флювіальні тіла у Tongue River є перспективними **стратиграфічними пастками** для метану з вугілля:

- на заході досліджуваної території поверхня залягання падає на 1–2°, створюючи умови для **андіп-аккумуляції газу**;
- локальні порушення, спричинені диференційною компакцією вугілля, могли слугувати **міграційними шляхами газу**;
- існуючі продуктивні поклади (наприклад, газове поле Oedekoven) розташовані **всередині флювіальної системи** (рис. 47).

Аналогічні умови виявлені також у нових виділених перспективних ділянках (рис. 50–51), які можуть містити газонасичені пісковики значно більшої площі, ніж поле Oedekoven.

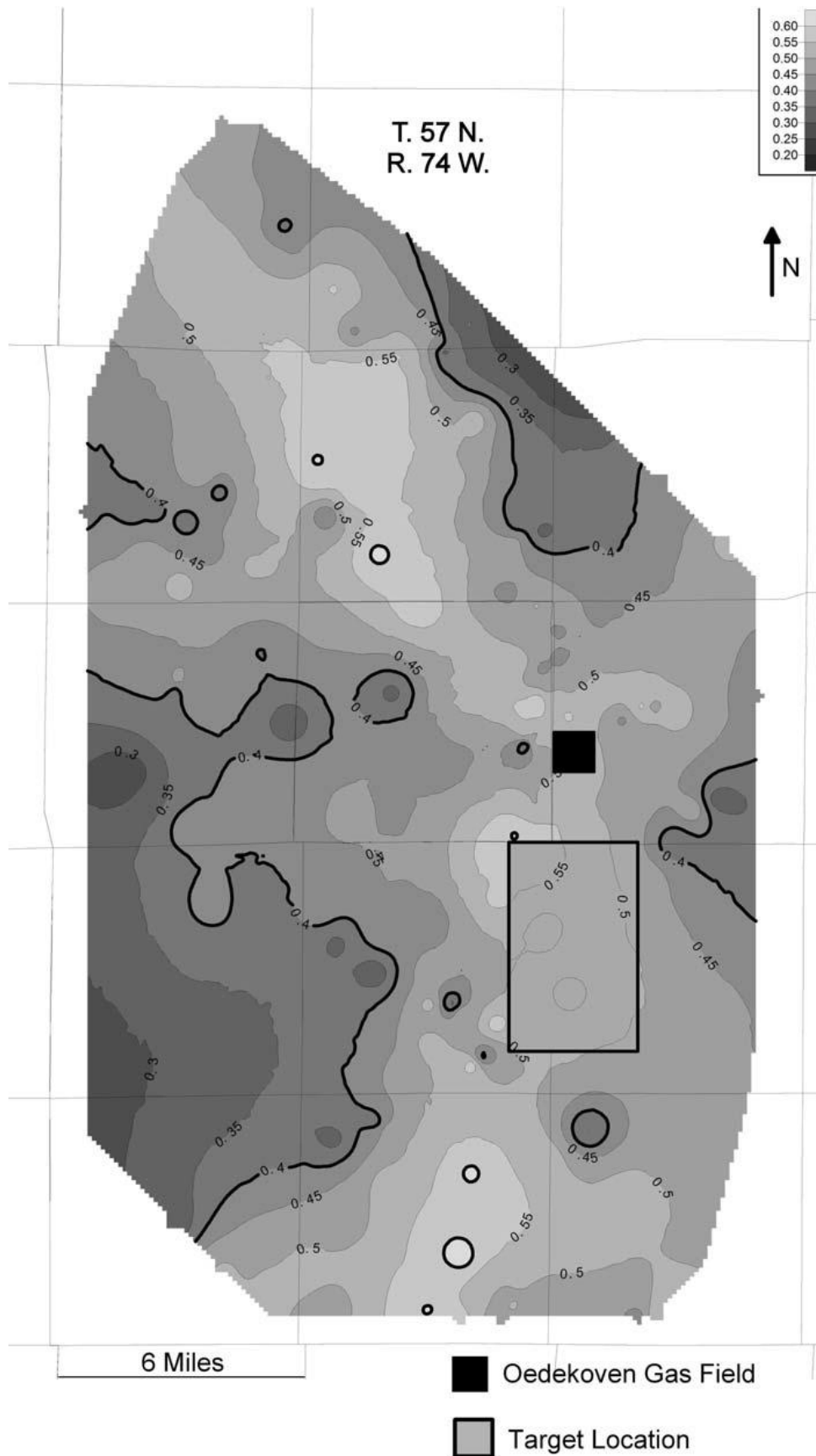


Рисунок 50: Цільове місце розташування в північній частині досліджуваної території. Вибране місце розташування розташоване на висхідному меандрі річкової системи згідно з даними скороченого північного інтервалу.

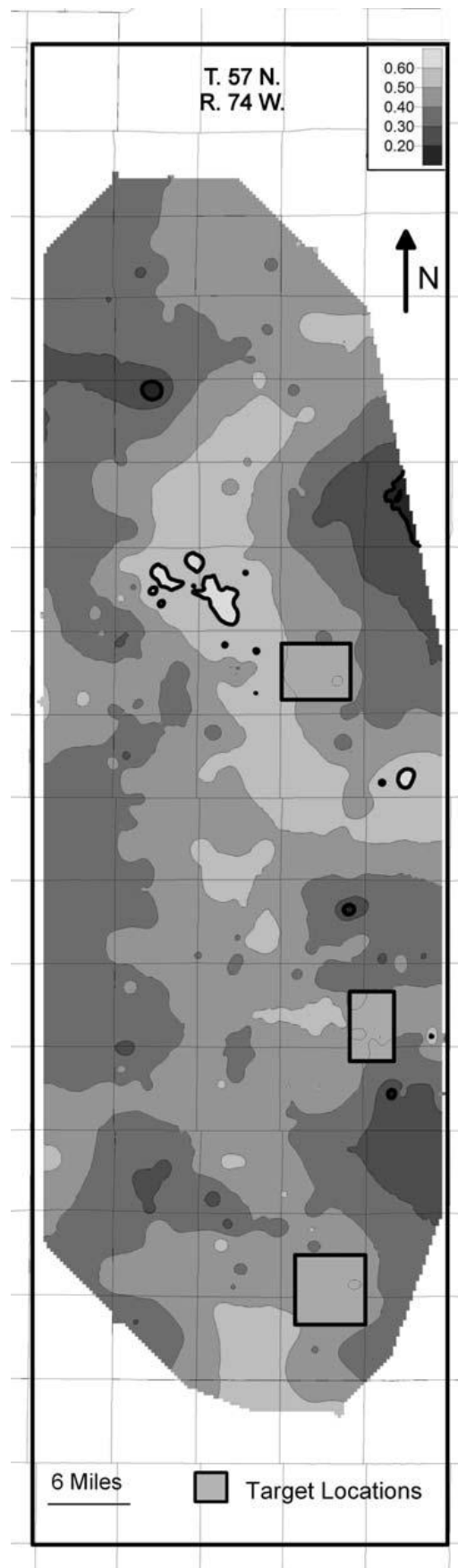


Рисунок 51: Цільові місця в досліджуваній зоні. Вибрані місця розташовані на висхідних меандрах річкової системи відповідно до даних досліджуваного інтервалу.

## **ВИСНОВКИ**

У ході обговорення отриманих результатів було виконано аналіз і зіставлення геологічних, літологічних та палеогеографічних даних, що дозволило сформулювати такі висновки відповідно до поставлених завдань.

### **1. Аналіз літературних джерел підтвердив складну історію тектонічного та осадового розвитку формації Fort Union.**

Порівняння моделей Curry (1971), Seeland (1988), Lisenbee (1988) й Ayers (1986) показало, що формування Tongue River Member контролювали ранні фази Ларамійської орогенії та зміна палеотечій у палеоцені. Літературні дані узгоджуються з отриманою структурою розрізів і сучасними картометричними результатами.

### **2. Інтерпретація гамма-каротажних діаграм та їх стратиграфічна кореляція підтвердили значну літологічну мінливість інтервалу.**

Кореляція 22 свердловин продемонструвала:

- на півдні – двопластову просту вугільну послідовність;
- у центрі – різке збільшення кількості розщеплень і зміну потужності пластів;
- на півночі – складну структуру з повторюваними тонкими прошарками пісковика й глин.

Це узгоджується з моделями зональної зміни середовища від стабільних болотистих умов до зон активного руслового впливу.

### **3. Побудовані карти потужності та коефіцієнта піскуватості показали чітку палеогеографічну закономірність.**

На картах (рис. 42–47):

- загальна товщина інтервалу зростає на захід, до осі басейну;
- потужність пісковикових тіл формує протяжну північ–південну аномалію;
- коефіцієнт піскуватості (рис. 44) підтверджує присутність стабільної міграційної зони флювіальної системи.

Ці результати свідчать про сталий каналізований режим осадонакопичення.

**4. Причини зменшення потужності або зникнення вугільних пластів у центральній частині площі визначено як результат активного руслового впливу.**

На ділянці пісковикової аномалії:

- потужні вугілля (>50 ft) відсутні (узгоджується з даними Ayers, 2002 – рис. 48);
- вугілля часто розщеплюються, тоншають або утворюють «wants»;
- флювіальний канал перешкоджав стабільному нагромадженню торфу.

Це дозволяє віднести центральну частину ділянки до зони активної руслової акумуляції.

**5. Реконструйоване середовище седиментації відповідає флювіально-болотній системі, а не дельтовому чи чисто raised bog середовищу.**

Обговорення поставило крапку над суперечливими моделями:

- модель Ayers (дельтові системи) частково суперечить картам пісковику (рис. 42–44);
- модель Flores (1993) флювіально-анастомозуючої системи добре узгоджується з пісковиковим «стрижнем» та боковими гілками;
- модель McClurg (низинні болота) пояснює розщеплення та повторювану тонкошарову седиментацію.

**Узагальнена модель:**

Tongue River формувався у низинній болотистій рівнині із стабільною флювіальною системою, орієнтованою на північ.

**6. Визначено перспективні зони можливого розвитку газонасичених пісковиків.**

На основі:

- карт піскуватості (рис. 44–47),
- порівняння з продуктивним полем Oedekoven (рис. 47),

- аналізу апдіп-умов та латерального виклинювання пісковиків, було встановлено, що **найперспективніші ділянки** лежать у межах:
  - апдіп-частин головного північ–південного пісковикового каналу,
  - зон бокових приток, які можуть формувати ізольовані пісковикові лінзи (рис. 50–51).

Ці ділянки потенційно мають більшу площу, ніж Oedekoven.

**7. Рекомендації для подальших робіт включають необхідність уточнення моделі флювіальної системи та підвищення густоти свердловинної мережі.**

Зокрема, доцільно:

- виконати 3D-моделювання пісковикових тіл у PETRA / Petrel;
- провести детальний аналіз пористості та проникності із наявної крнної інформації;
- здійснити додаткове буріння у межах виділених перспективних зон;
- уточнити траєкторію флювіального каналу за допомогою сейсмічних профілів.

### Список використаних джерел

1. Ayers W. B. Lacustrine and fluvial-deltaic depositional systems, Fort Union Formation (Paleocene), Powder River Basin, Wyoming and Montana // AAPG Bulletin. — 1986. — Vol. 70. — P. 1651–1673.
2. Ayers W. B. Coalbed gas systems, resources, and production and a review of contrasting cases from the San Juan and Powder River Basins // AAPG Bulletin. — 2002. — Vol. 86. — P. 1853–1890.
3. Bustin R. M., Clarkson C. R. Geological controls on coalbed methane reservoir capacity and gas content // International Journal of Coal Geology. — 1998. — Vol. 38. — P. 3–26.
4. Clayton J. L. Geochemistry of coalbed gas — a review // International Journal of Coal Geology. — 1998. — Vol. 35. — P. 159–173.
5. Curry W. H. Laramide structural history of the Powder River Basin, Wyoming // Wyoming Geological Association. 28th Annual Field Conference Guidebook. — 1971. — P. 49–60.
6. Flores R. M. Coal-bed and related depositional environments in methane gas-producing sequences // AAPG Studies in Geology. — 1993. — No. 38. — P. 13–38.
7. Flores R. M. Paleocene depositional systems and coal accumulation, Fort Union Formation, Powder River Basin // International Journal of Coal Geology. — 2004. — Vol. 56. — P. 1–20.
8. Flores R. M., Keighin C. W. Coal accumulation and sediment dispersal in fluvial systems of the Fort Union Formation // Sedimentary Geology. — 1999. — Vol. 124. — P. 1–26.
9. Goolsby J. E., Finley A. K. Correlation of Fort Union coals in the Powder River Basin, Wyoming: a proposed new concept // Wyoming Geological Association. 51st Field Conference Guidebook. — 2000. — P. 51–74.
10. Greb S. F., DiMichele W. A., Gastaldo R. A. Evolution and persistence of wetland ecosystems in coal-forming environments // International Journal of Coal Geology. — 2006. — Vol. 69. — P. 3–25.

11. Johnson R. C. Coalbed methane resources of the Powder River Basin, Wyoming and Montana // U.S. Geological Survey Fact Sheet. — 2002. — No. 156-02. — 4 p.
12. Johnson R. C., Flores R. M. History of Paleocene coal deposition in the Powder River Basin // Geological Society of America Special Paper. — 2003. — Vol. 369. — P. 89–105.
13. Keighin C. W., Flores R. M. Sedimentology of coal-bearing fluvial systems, Fort Union Formation // AAPG Bulletin. — 1989. — Vol. 73. — P. 1168–1188.
14. Law B. E. Basin-centered gas systems // AAPG Bulletin. — 2002. — Vol. 86. — P. 1891–1919.
15. Lisenbee A. L. Tectonic history of the Black Hills uplift // Wyoming Geological Association. 39th Annual Field Conference Guidebook. — 1988. — P. 45–52.
16. Mavor M. J., Close J. C. Coalbed methane reservoir characteristics of the Powder River Basin // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. — 2004. — Vol. 7. — P. 208–217.
17. McCabe P. J., Stanton R. W. Paleoclimate controls on coal accumulation in foreland basins // Geological Society of America Bulletin. — 1996. — Vol. 108. — P. 873–885.
18. McClurg J. E. Peat forming wetlands and the thick Powder River Basin coals // Wyoming Geological Association. 39th Annual Field Conference Guidebook. — 1988. — P. 229–236.
19. Nelson C. E. et al. Flood basalt facies from boreholes // Petroleum Geoscience. — 2009. — Vol. 15. — P. 313–324.
20. Nuccio V. F., Roberts S. B. Thermal maturity and burial history of the Fort Union Formation // AAPG Bulletin. — 2003. — Vol. 87. — P. 215–236.
21. Oldham D. W. Exploration for shallow compaction-induced gas accumulations in sandstones of the Fort Union Formation, Powder River Basin, Wyoming // The Mountain Geologist. — 1997. — Vol. 34. — P. 25–38.

22. Rice D. D., Finn T. M. Composition and origin of coalbed gas in the Powder River Basin // AAPG Bulletin. — 1996. — Vol. 80. — P. 153–176.
23. Scott A. R., Kaiser W. R., Ayers W. B. Thermogenic and biogenic coalbed gas systems // International Journal of Coal Geology. — 1994. — Vol. 24. — P. 155–168.
24. Seeland D. Laramide paleogeographic evolution of the eastern Powder River Basin, Wyoming and Montana // Wyoming Geological Association. 39th Annual Field Conference Guidebook. — 1988. — P. 29–34.
25. Stanton R. W., Flores R. M. Controls on coal quality and distribution in the Fort Union Formation // International Journal of Coal Geology. — 2003. — Vol. 56. — P. 47–68.
26. Tyler R., Scott A. R. Coalbed methane: origin, composition, and production // Geological Society Special Publication. — 1987. — Vol. 32. — P. 1–20.
27. U.S. Geological Survey. Central Region Energy Resources Team. Energy resources of the Powder River Basin. — 2007. — URL: <http://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-126/figures.html> (дата звернення: березень 2025).
28. Warwick P. D. Stratigraphy and coal resources of the Fort Union Formation, Powder River Basin // U.S. Geological Survey Professional Paper. — 2005. — No. 1625-A. — 45 p.
29. Weichman. Geological history of the Powder River Basin // AAPG Bulletin. — 1964. — Vol. 48. — P. 1881.
30. Wyoming Geological Association Technical Studies Committee. Geologic history of the Powder River Basin // AAPG Bulletin. — 1965. — Vol. 49. — P. 1893–1907.
31. Wyoming Oil and Gas Conservation Commission. Official website. — URL: <http://wogcc.state.wy.us/> (дата звернення: June 2025).
32. Zhao H., Liu G. Hydrodynamic controls on coalbed methane accumulation // Journal of Natural Gas Science and Engineering. — 2010. — Vol. 2. — P. 70–79.
33. Zuber M. D., Boyer C. M. Coalbed methane reservoir analysis and modeling // SPE Journal. — 2002. — Vol. 7. — P. 15–24.