

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ТРОЙНІЧ КОСТЯНТИН СЕРГІЙОВИЧ



УДК 550.8.056

**КОМПЛЕКСНА ІНВЕРСІЯ ДАНИХ
СЕЙСМО- ТА ГРАВІРОЗВІДКИ МЕТОДОМ
ОДНОЧАСНОЇ ІТЕРАТИВНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ**

04.00.05 - Геологічна інформатика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 2016

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка

Науковий керівник: Доктор геологічних наук, професор
Вижва Сергій Андрійович,
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка,
завідувач кафедри геофізики

Офіційні опоненти: Доктор фізико-математичних наук, професор
Міненко Павло Олександрович
Криворізький державний педагогічний
університет,
професор кафедри інформатики та прикладної
математики

Доктор геологічних наук, доцент
Лісний Георгій Дмитрович
ТОВ "Тутковський Геофізика",
начальник обчислювального центру.

Захист відбудеться «29» грудня 2016 р. о 10-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.42 Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 03022, м. Київ, вул. Васильківська, 90, ауд.104.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці ім. М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 01033, м. Київ, вул. Володимирська, 58, к. 12.

Автореферат розісланий «28» листопада 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.001.42



І.В. Тішаєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційна робота присвячена розробці комплексної інверсії даних сейсмо- та гравірозвідки методом одночасної ітеративної реконструкції.

Актуальність теми дисертації. Наукова спільнота активно розвиває напрямки геофізичної томографії та комплексної інверсії, про що свідчить велика кількість відповідних публікацій в передових геофізичних періодичних виданнях світу. Геофізична томографія також широко використовується сучасними нафтогазовими, сервісними та інженерними компаніями для вирішення широкого кола задач. Алгоритми та принципи роботи програмного забезпечення для томографічної (переважно сейсмічної томографії) та комплексної інверсії геофізичних даних, що розробляються провідними світовими геофізичними компаніями через комерційну таємницю не публікуються. Висока ціна послуг передових зарубіжних компаній не дозволяє широко використовувати найсучасніші технології геофізичної томографії на теренах України.

У Київському університеті^{*} ще з початку 80-х років минулого століття під керівництвом проф. Тимошина Ю.В. була створена перша в колишньому СРСР школа сейсмічної голографії (томографії). З того часу дослідники кафедри геофізики працюють над створенням конкурентоспроможних методів томографічної інверсії комплексу геофізичних даних для вирішення цілого класу завдань нафтогазової геології, інженерної геофізики, Фізики Землі, моніторингу небезпечних геологічних процесів.

Комплексна томографічна інверсія даних сейсмо- та гравірозвідки становить значний інтерес для аналізу складнобудованих розрізів при пошуках та розвідці родовищ нафти і газу, пов'язаних із соляними тілами. Вдала імплементація цього методу в практику вітчизняних геолого-геофізичних робіт дозволить підвищити ефективність геофізичних досліджень та позитивно вплине на нарощування енергетичного потенціалу України та виконання «Стратегії розвитку мінерально-сировинного комплексу України до 2030 року».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках бюджетної теми № 11БФ049-02 «Розробка теорії та методології побудови динамічних геолого-геофізичних моделей геологічних об'єктів і процесів», а саме – підрозділу «Розробка теоретичних основ геофізичної томографії складнобудованих геологічних середовищ» на кафедрі геофізики. Дана тема фінансувалась фондом фундаментальних і прикладних досліджень Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Мета та задачі дослідження. Мета дисертаційного дослідження полягає у розробці методу інверсії комплексу даних сейморозвідки та гравірозвідки за допомогою геофізичної томографії із залученням всієї наявної геологічної інформації та результатів інтерпретації даних попередніх геофізичних та петрофізичних досліджень в якості апріорної інформації.

Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи необхідно вирішити

* Нині Київський національний університет імені Тараса Шевченка

наступні наукові задачі:

1. Виконати аналіз сучасного стану геофізичної томографії та комплексної інверсії геофізичних даних з метою отримання фізичних параметрів середовища та оцінити їх переваги та недоліки, а також сучасні напрямки розвитку.
2. Розробити новий методологічний підхід до комплексної інверсії геофізичних даних із залученням моделювання петрофізичних властивостей.
3. Вдосконалити існуючі методи сейсмічної променевої томографії для можливості обробки великих масивів сейсмічних даних.
4. Розробити метод інверсії гравітаційних даних на основі методу одночасної ітеративної реконструкції (SIRT).
5. Розробити метод комплексної томографічної інверсії даних сейсмо- та гравірозвідки на основі методу одночасної ітеративної реконструкції (SIRT).
6. Провести перевірку розроблених методів та алгоритмів на спеціально створених синтетичних тестах та на даних реальних геофізичних спостережень.

Об'єктом дослідження є складнобудоване геологічне середовище, яке описується через густину та пружні параметри окремих комірок.

Предметом дослідження є комплексна інверсія даних сейсмозвідки та гравірозвідки в ефективні геофізичні та геологічні параметри середовища на основі методу одночасної ітеративної реконструкції.

Методи дослідження. Для розробки та перевірки методів інверсії використані розрахунково-аналітичний метод та математичне моделювання. Для петрофізичних моделювань використано статистичний (регресійний, кореляційний) аналіз.

Наукова новизна отриманих результатів. Основні результати проведених досліджень мають таку наукову та прикладну новизну:

1. Розроблено новий методологічний підхід комплексної інверсії геофізичних даних із залученням моделювання петрофізичних властивостей.
2. Вдосконалено метод сейсмічної променевої томографії для можливості обробки великих масивів сейсмічних даних.
3. Вперше розроблено метод інверсії гравітаційних даних на основі методу одночасної ітеративної реконструкції (SIRT).
4. Вперше введено блочну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для комплексу гравітаційних та сейсмічних даних, яка дозволяє виконувати комплексну томографічну інверсію з використанням повільності поздовжніх хвиль як шуканого параметру.
5. Вперше розроблено метод комплексної томографічної інверсії даних сейсмо- та гравірозвідки на основі методу одночасної ітеративної реконструкції (SIRT).

Практичне значення одержаних результатів. Серед основних можливих напрямків застосування результатів наукового дослідження можна виділити наступні:

1. Алгоритм спільної інверсії сейсмічних та гравітаційних даних може бути використаний при обробці та інтерпретації даних геофізичних методів при

- пошуках та розвідці родовищ вуглеводнів в складних геологічних умовах, зокрема при наявності штоків і діапірових структур.
2. Розроблене автором програмне забезпечення може бути використане для інверсії даних міжсвердловинних сейсмічних (акустичних) прозвучувань при інженерних дослідженнях.
 3. Деякі відомі методи адаптовано для збільшення швидкості обчислень та зменшення вимог до ресурсів обчислювальної техніки.
 4. Кожна із складових розробленого алгоритму втілена автором в окремі програмні модулі на мові програмування C++ та може бути використана незалежно для вирішення інших дослідницьких та прикладних задач, таких як трасування сейсмічних променів крізь швидкісну модель, обчислення гравітаційного ефекту заданого розподілу мас та вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь в сенсі найменших квадратів нев'язки.
 5. Проведена перевірка на даних міжсвердловинних прозвучувань на підприємстві КПВД «Енергопроект», що підтвердило його високу ефективність.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати за темою дисертаційних досліджень були отримані автором особисто та опубліковані в наукових фахових вітчизняних та зарубіжних виданнях.

У роботах, виконаних у співавторстві, автору належать наступні внески:

У роботі [1] у співавторстві із проф. Вижвою С.А. автору належить написання всіх основних частин статті, створення ілюстрацій, розробка алгоритму та втілення його у вигляді програмного коду, створення тестових моделей та виконання інверсії на синтетичних прикладах.

У роботі [3] у співавторстві із Матвійчуком Б.В. та проф. Вижвою С.А. автору належить написання вступної частини, розділу «Використання томографії в сейсморозвідці» та вклад в написання розділу «перспективи подальших досліджень»

У роботі [8] у співавторстві із Віршило І.В. та Матвійчуком Б.В. автору належить написання розділів «velocity tomography», «ray tracing», «tomography algorithm description», частин розділів «model definition» та «testing models», а також блок-схема, яка узагальнює ідею літологічної інверсії комплексу геофізичних методів за допомогою томографії та моделювання петрофізичних параметрів.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати, відображені в роботі, доповідалися на таких Міжнародних наукових конференціях та симпозіумах:

- 1) 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014 (Bulgary, 2014);
- 2) Міжнародна наукова конференція «Роль вищих навчальних закладів у розвитку геології» (Київ, 2014);
- 3) XIV міжнародна конференція «Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти» (Київ, 2015).

У цілому робота обговорювалася на науковому семінарі Інституту Геології Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 8 наукових робіт, серед

яких 4 статті у наукових фахових виданнях, що входять до переліку МОН за спеціальністю дисертації та одна – в закордонному науковому періодичному виданні, а також 3 публікації у матеріалах міжнародних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків та переліку використаних літературних джерел, що налічує 73 назви. Загальний обсяг дисертації складає 122 сторінки; робота містить 1 таблицю та 46 рисунків.

Автор висловлює щирю подяку науковому керівнику, доктору геологічних наук, професору Вижві С.А. за суттєву допомогу на всіх етапах виконання роботи; доценту Віршило І.В. за продуктивні наукові дискусії та консультації; кандидату геологічних наук Дейнеко С.І. за люб'язно надані польові записи. Окрему подяку висловлюю професору Мартіну Букхольту за мотивацію та мудрі поради стосовно методології наукових досліджень. Також висловлюю щирю подяку моїй дружині за терплячість, розуміння та підтримку протягом чотирьох років роботи над цим дослідженням.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкривається актуальність теми досліджень та зв'язок роботи з науковими програмами, в межах яких виконувались дослідження. Визначено мету та задачі дослідження, описано методи дослідження. Наводиться наукова новизна основних результатів досліджень, вказано практичне значення одержаних результатів та зазначено особистий внесок здобувача. Подано відомості про публікації за темою дисертації та апробацію результатів досліджень. Описано структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі виконано огляд сучасного стану геофізичної томографії з позицій задач, які вирішуються цим методом. Томографія знайшла найширшого розвитку для інверсії даних сейсмозв'язки, причому як поверхневої, так і міжсвердловинної, тому в даному розділі опущене використання геофізичної томографії для вирішення задач електрометрії та радіоактивних методів.

Теоретичне підґрунтя томографії заклали *J. Radon, M. Born, S. Rytov, G. Kirchhoff* та *S. Kaczmarz*. Піонерськими роботами з напрямку прикладної геофізичної інверсії можна назвати *P. Bois, K. Aki, P. Richards, D. Anderson, A. Dziewonski, T. Bishop, R. Langan, P. Love, R. Cutler* та *G. McMechan*. Свій внесок в розвиток томографії зробили: *K. Benxi, M. Cavalca, X. Chang, N. Cheng, S. Chiu, R. Cutler, W. Daily, D. Dougherty, L. Lines, D. Pei, R. Stewart, M. Woodward, J. Zhang, H. Zhou*.

У нафтогазовій промисловості геофізична томографія застосовується для широкого кола задач на різних стадіях розвитку родовищ від розвідки родовищ до розробки та видобутку вуглеводнів. Основні задачі, що нині успішно вирішуються за допомогою геофізичної томографії такі: міжсвердловинні акустичні та електромагнітні дослідження; відновлення швидкісної моделі на основі часів пробігів сейсмічних променів (швидкості варіюють вертикально та по латералі в

ізотропному або анізотропному середовищі); інтегрування каротажних даних, даних ВСП та сейсмозвідки для отримання оптимальної структурної моделі в домені глибини; переведення сейсмічних даних з домену часу в домен глибини та міграції сейсмічних даних для правильного відображення положень відбиваючих горизонтів в просторі; знаходження статичних поправок або залишкових (*residual*) статичних поправок; обчислення коефіцієнтів поглинання середовища по згасанню амплітуд та обчислення поправок за поглинання середовища (*Q-compensation*).

Основна ідея літологічної томографії полягає в тому, щоб маючи дані непрямих та прямих спостережень в певних ділянках простору, перенести параметри виміряні прямими методами (або оцінені непрямими методами із високим ступенем достовірності) на ті області, де наявні дані лише непрямих методів. Літологічною томографією займався *M. Bosch, G. Lortzer, A. Berkhout, L. Lines, H. Tan, S. Treitel, J. Beck, R. Chambers, J. Eager, M. Van Schaak*.

Основна ціль комплексної інверсії геофізичних даних полягає у зменшенні неоднозначності вирішення оберненої задачі геофізики та збільшенні достовірності та стійкості розв'язку. Це досягається зменшенням області можливих рішень за допомогою комплексування даних різних геофізичних методів. Найбільший вклад у використання томографії для вирішення задачі комплексної інверсії геофізичних даних, на думку автора, внесли такі дослідники: *L. Lines, A. Schultz A.K., S. Treitel, R. Stewart, S. Chiu, D. Zhou, D. O'Connell, W. Wang, J. Zhang*.

На теренах України геофізичною томографією (спочатку її називали "голографією") займався *Ю. Тимошин*. В Київському національному університеті Тараса Шевченка розвивається напрямок літологічної томографії, пов'язаний із роботами *Г. Продайводи, С. Вижви, І. Віршило*.

Огляд літературних джерел показав, що інтерес дослідників до літологічної характеристики розрізу на основі геофізичної томографії, а також до комплексної інверсії не зникає вже декілька десятиліть, проте питання комплексної томографічної інверсії геофізичних даних а також літологічної оцінки розрізу за допомогою геофізичної томографії досі не вирішені у повній мірі, про що свідчать публікації останніх років. Відтак, тема дисертаційного дослідження автора є актуальною.

У другому розділі послідовно подаються всі основні теоретичні положення, необхідні для того, щоб пояснити суть комплексної інверсії даних сейсмозвідки та гравірозвідки методом одночасної ітеративної реконструкції (SIRT) на теоретичному рівні. Розкрито наступні теми: принципи інверсії геофізичних даних на основі моделі; побудова дискретних моделей для комплексної інверсії; інверсія сейсмічних та гравіметричних даних з точки зору лінійної алгебри; метод одночасної ітеративної реконструкції; інверсія комплексу сейсмометричних та гравіметричних даних на основі методу одночасної ітеративної реконструкції з урахуванням даних петрофізичних досліджень.

Існує окрема група методів інверсії, які базуються на ітеративних методах вирішення систем рівнянь та використовують моделювання в процесі інверсії. Ця група методів називається інверсією на основі моделі (*model based inversion*).

Перевагою ітеративних методів вирішення оберненої задачі геофізики є те, що інтерпретатор може впливати на результат не лише за допомогою обмежень, але і задаючи модель першого наближення. Причому, чим більше геологічного сенсу вкладено в модель першого наближення, тим якіснішого результату інверсії можна досягти.

Для побудови моделі частина геологічного середовища, яка досліджується, розбивається на прямокутні паралелепіпеди (комірки) за допомогою трьох систем взаємно-перпендикулярних площин. Після того як підпростір розбитий на прямокутні комірки, кожній комірці задається значення модельної функції. У загальному випадку набір параметрів комірки може бути наступним: швидкість/повільність, густина, температура, тиск, клас породи, концентрація мінералів, структура порового простору тощо. Не всі параметри використовуються безпосередньо в процесі інверсії, проте вони можуть бути використані на етапі побудови функціональних зв'язків між повільністю та густиною. Значення параметрів в межах комірки можна вважати постійним, або таким, що змінюється за певним законом (у залежності від потреб досліджень).

У випадку променевої сейсмічної томографії функцією, що підлягає відновленню, є розподіл повільностей в межах досліджуваної частини простору, а проєкціями зазначеної функції - часи пробігів сейсмічних променів вздовж певної траєкторії.

Рівняння для часів пробігів сейсмічних променів в матричній формі запишемо у вигляді множення матриці довжин відрізків траєкторій кожного променя для кожної комірки на вектор-стовпчик значень повільностей в кожній комірці моделі:

$$t = D \cdot s,$$

де t – вектор-стовпчик часів пробігів сейсмічних променів; D - матриця довжин відрізків траєкторій кожного променя у відповідних комірках моделі; s – вектор значень повільностей в комірках.

Пряму задачу гравірозвідки для дискретної моделі можна показати у вигляді векторного добутку матриці геометричних факторів комірок на вектор густин. У матричній нотації рішення прямої задачі гравірозвідки можна представити у вигляді:

$$g = F \cdot \sigma,$$

де g – вектор-стовпчик значень гравітаційного впливу моделі на точку спостереження; F - матриця геометричних факторів для кожної точки спостереження у кожній комірці моделі; σ – вектор значень густини в комірках.

Променева сейсмічна томографія в практиці геофізичних досліджень часто реалізована на методі алгебраїчної реконструкції (ART) або методі одночасної ітеративної реконструкції (SIRT). Вищезгадані методи передбачають ітеративне знаходження вектора поправок Δs до значень повільності в комірках моделі та

обчислення нового значення моделі, яке буде використане в наступній ітерації:

$$\mathbf{s}^{(v)} = \mathbf{s} + \Delta \mathbf{s},$$

де $\mathbf{s}^{(v)}$ – нове значення вектора повільності в комірках дискретної моделі; \mathbf{s} – попереднє значення вектора значень повільності; $\Delta \mathbf{s}$ – вектор поправок до вектора значень повільності.

Величини поправок в методі одночасної ітеративної реконструкції обчислюються шляхом знаходження величини поправок отриманих від кожного променя, та додавання до значень вектора повільності середньозваженої величини поправок від кожного променя для цієї комірки:

$$\Delta s_i = \frac{1}{Q_i^{(s)}} \cdot \sum_{j=1}^{Q_i^{(s)}} \Delta^j s_i,$$

де Δs_i – поправка повільності в i -й комірці; $\Delta^j s_i$ – поправка повільності в i -й комірці для j -го променя; $Q_i^{(s)}$ – кількість сейсмічних променів, що перетинають i -у комірку.

Поправка до значень повільності в i -й комірці знаходиться методом алгебраїчної реконструкції, який напряду використовує метод Качмажа:

$$\Delta^j s_i = D_{ji} \cdot \Delta t_j / \sum_{k=1}^N D_{jk}^2,$$

де $\Delta^j s_i$ – поправка повільності в i -й комірці для j -го променя; D_{ji} – довжина пробігу j -го сейсмічного променя в межах i -ї комірки; Δt_j – різниця між спостереженим та обчисленим часами пробігу j -го променя; N – кількість комірок в моделі.

Автор пропонує адаптувати метод одночасної ітеративної реконструкції для інверсії аномального гравітаційного поля. Необхідно зазначити, що вирішуючи таку задачу робиться припущення, що аномальне гравітаційне поле викликане аномальними масами лише в межах досліджуваної області.

Незважаючи на фізично різний зміст задач інверсії часів пробігів сейсмічних хвиль та гравітаційного поля автор вважає, що оскільки пряма задача як сейморозвідки, так і гравірозвідки є системою лінійних алгебраїчних рівнянь, то формулу для знаходження поправок повільності в сейсмічній томографії можна перетворити на формулу знаходження поправок густини, замінивши: вектор часів пробігів сейсмічних хвиль на вектор значень аномального гравітаційного поля, вектор повільностей на вектор густин та матрицю довжин пробігів хвиль на матрицю геометричних факторів. Також слід врахувати, що жоден елемент матриці геометричних факторів не рівний нулю. Формулу для знаходження поправок густини на основі гравітаційного поля за допомогою одночасної ітеративної реконструкції можна записати наступним способом:

$$\Delta\sigma_i = \frac{1}{Q^{(g)}} \cdot \sum_{j=1}^{Q^{(g)}} \Delta^j \sigma_i,$$

де $\Delta\sigma_i$ – поправка густини в i -й комірці; $\Delta^j \sigma_i$ – поправка густини в i -й комірці для j -го гравіметричного спостереження; $Q^{(g)}$ – кількість точок спостережень гравітаційного поля.

$$\Delta^j \sigma_i = F_{ji} \cdot \Delta g_j / \sum_{k=1}^N F_{jk}^2,$$

де $\Delta^j \sigma_i$ – поправка густини в i -й комірці для j -го гравіметричного спостереження; F_{ji} – геометричний фактор j -го сейсмічного променя в межах i -ї комірочки; Δg_j – різниця між спостереженим та обчисленим гравітаційним полем j -ї точки спостереження; N – кількість комірок в моделі.

У гравірозовідці всі комірки моделі вносять свій вклад у розраховане гравітаційне поле. Це призводить до того, що нев'язка в одній точці спостереження буде розподілятися по всім коміркам спадаючи із відстанню до значень, якими можна знехтувати. Внаслідок цієї властивості гравітаційного поля при виконання інверсії аномальні маси мають тенденцію скупчуватись у верхній частині розрізу. У серії класичних робіт з інверсії гравітаційного та магнітного полів *Y. Li* та *D. Oldenburg* запропонували ввести функцію $(z+z_0)^{-\beta/2}$, яка штучно змушує розподіляти маси по глибині. У результаті дослідів автор прийшов до висновку, що співвідношення $(z/z_0)^{\beta/2}$ є більш практичним для цілей дисертації та дозволяє досягнути цілком прийнятних результатів інверсії гравітаційних даних.

Автор вперше розробив метод інверсії комплексу даних сейсморозовідки та гравірозовідки на основі методу одночасної ітеративної реконструкції. Запропонований метод базується на тому факті, що інверсія часів пробігів сейсмічних променів та інверсія значень аномалій сили тяжіння може бути математично представлена через систему лінійних алгебраїчних рівнянь.

При цьому, якщо задача інверсії як сейсмічних, так і гравітаційних даних вирішується для однієї і тієї ж моделі, то ширина матриць коефіцієнтів і розмір векторів шуканих параметрів моделі будуть однаковими. Це дає можливість, підмінивши вектори повільності і густини на деякий вектор m , елементи якого виражені функцією від типу спостережених даних, об'єднати сейсмічні і гравітаційні дані в одну систему рівнянь, що складається з двох блоків:

$$\begin{bmatrix} t \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \\ F \end{bmatrix} \cdot m,$$

Значення вектора m обчислюються за формулою:

$$m = \begin{cases} s, & \text{для сейсморозовідувальних даних} \\ \sigma(s), & \text{для гравіметричних даних} \end{cases},$$

де s та $\sigma(s)$ – вектори повільності та густини як функції повільності.

Коли ми застосовуємо формулу одночасної ітеративної реконструкції до систем лінійних рівнянь, то отримуємо поправки. Тобто для отримання нового наближення ці поправки вводяться в поточне наближення. У випадку блочної системи поправки, обчислені методом одночасної ітеративної реконструкції від різних типів геофізичних даних, матимуть різні розмірності. Тому, щоб знайти модель $m^{(v)}$ на кожній новій ітерації автор пропонує обчислювати відразу значення модельної функції, а потім знаходити середнє значення від моделей, отриманих на основі застосування формули одночасної ітеративної реконструкції до кожного спостереження:

$$m^{(v)}_i = \frac{1}{Q_i} \sum_{j=1}^{Q_i} (m_i + \Delta^j m_i),$$

де m_i і Δm_i поточне значення та поправка моделі (повільність для сейсмічних даних та оцінка повільності на основі густини для гравіметричних даних) для кожної i -ї комірки.

При знаходженні середнього значення модельної функції вага гравітаційних або сейсмічних даних в кожній комірці буде визначатися співвідношенням кількості променів, що проходять через комірку, до кількості точок спостереження сили тяжіння. Для того, щоб змінити вагу спостережених даних можна знаходити значення моделі на кожній ітерації спочатку для кожного блока окремо, а потім вираховувати середньозважене від результатів обчислень кожного блоку:

$$m^{(v)} = a \cdot m^{(v)(s)} + (1 - a) \cdot m^{(v)(g)},$$

де $m^{(v)(s)}$ і $m^{(v)(g)}$ – вектори нових значень моделей отриманих шляхом застосування попередньої формули для знаходження поправок для сейсмічних і гравітаційних даних відповідно. Параметр a змінюється від нуля до одиниці, визначаючи таким чином пропорцію впливу тих чи інших даних в залежності від їх якості, інформативності та інших факторів.

У третьому розділі розглядається новий методологічний підхід до комплексної інверсії геофізичних даних із залученням моделювання петрофізичних властивостей, алгоритм трасування променів, локальна система координат для побудови моделі та формати вхідних та вихідних файлів.

При побудові схеми літологічної інверсії комплексу геофізичних даних із врахуванням даних петрофізичних властивостей на основі геофізичної томографії (рисунком 1) були використані: схема, розроблена автором в роботі [6] на самому початку дисертаційного дослідження, алгоритм виконання томографічної інверсії, описаний в монографії *T. Lo* та *P. Inderwiessen* та схема комплексної (*joint*) інверсії сейсмометричних та гравіметричних даних за *L. Lines*, *A. Schultz* та *S. Treitel*.

Відповідно до розробленої автором схеми комплексної інверсії геофізичних даних із залученням моделювання петрофізичних властивостей процес інверсії ділиться на три етапи: збір геофізичних даних та всієї можливої апріорної інформації (геологічні звіти, результати буріння тощо), побудова моделі першого наближення та підготовка геофізичних даних до інверсії (зняття відліків часів пробігів сейсмічних хвиль, вирахування регіонального гравітаційного фону тощо) та власне інверсії.

В даній схемі розрахунок петрофізичних властивостей та взаємозв'язків між значеннями петрофізичних параметрів винесено за межі ітеративного циклу оновлення моделі, так само як і літологічну інверсію, яка виконується один раз наприкінці інверсії.

Розроблений підхід забезпечує ефективний процес інверсії комплексу геофізичних даних на основі моделювання, який при цьому забезпечує геологічний сенс та непротиворіччя геофізичних параметрів в процесі інверсії за рахунок петрофізичного моделювання. Петрофізичні дані (точніше – функціональні зв'язки, що пов'язують між собою геофізичні параметри) з однієї сторони виступають у ролі обмежень можливих значень геофізичних параметрів, а з іншої – забезпечують непротиворіччя один одному геофізичних параметрів під час ітеративного оновлення моделі.

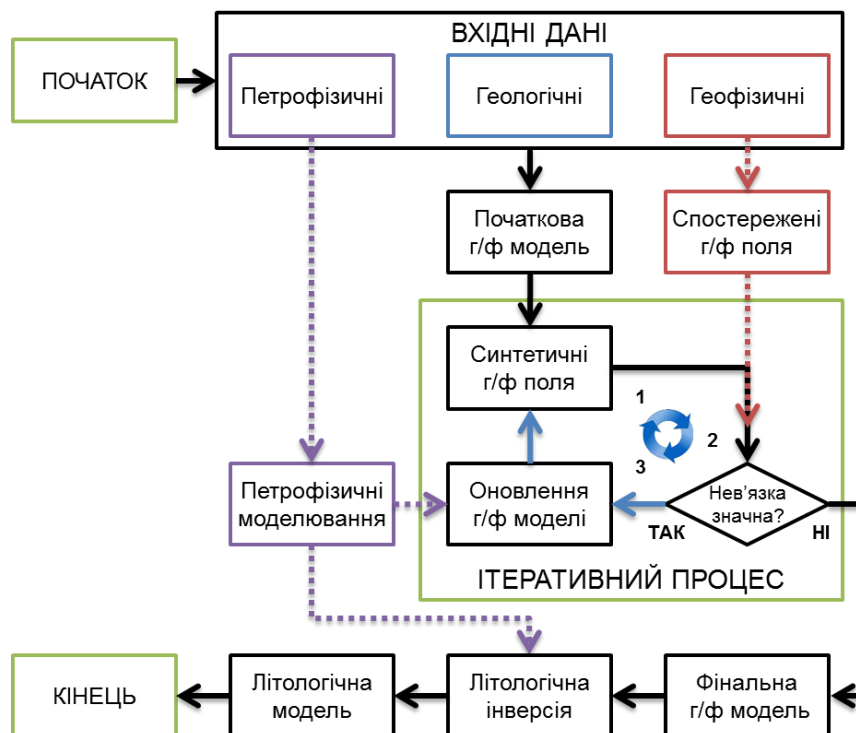


Рис. 1. Схема літологічної інверсії комплексу геофізичних даних на основі петрофізичного моделювання.

Для трасування сейсмічних променів крізь уявне геологічне середовище було обрано алгоритм дерева найкоротших відстаней (*shortest path tree*) на основі мереж. Алгоритм передбачає наявність мережі вузлових точок, що з'єднані арками.

Апроксимовані траєкторії променів будуть рухатись вздовж арок від однієї вузлової точки до іншої (рисунк 2).

Кожній арці задається час пробігу сейсмічної хвилі між вузлами. Під час роботи програми вирішується комбінаторна задача, що спрямована на пошук найменшого часу проходження хвилі від вузла, найближчого до пункту збудження до всіх інших вузлів мережі, утворюючи при цьому так зване дерево найкоротших відстаней (*shortest path tree*). Математично ця задача може бути сформульована як оптимізація шляхом розв'язку рівнянь Белмана.

Незважаючи на те, що теоретично не існує жодних обмежень на розташування вузлових точок (тобто воно може бути як регулярним, так і нерегулярним та мати абсолютно довільне положення по відношенню до границь прямокутних комірок із значеннями повільності) автор вирішив встановити наступні правила розміщення вузлових точок: а. Вузлові точки можуть знаходитись лише на границях між прямокутними комірками; б. Арки знаходяться лише всередині комірок та не можуть перетинати їх границь.

Вперше задача знаходження дерева найкоротших відстаней була вирішена *E. Dijkstra*. Проте його алгоритм є дуже неефективним та має складність пропорційну четвертій степені до кількості вузлів, в той час як *T. Moser* продемонстрував алгоритм із складністю, пропорційною логарифму кількості вузлів, або майже лінійною залежністю для розріджених мереж.

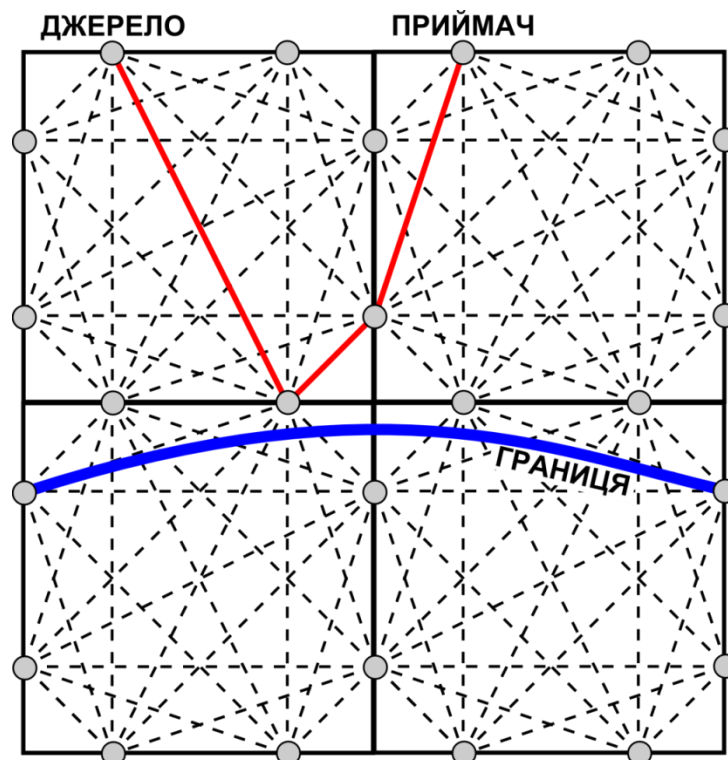


Рис. 2. Принцип створення сітки для трасування сейсмічних променів. Точками позначено вузли, пунктиром - арки, тонкою суцільною лінією - траєкторію променя, що відбився від акустичної границі, позначеної жирною суцільною лінією.

У одному із підрозділів коротко описано різницю між наступними трьома

підходами до виходу із ітеративного циклу: 1) Різниця між спостереженими та змодельованими спостереженнями менше заданої величини; 2) Абсолютне значення поправки до моделі на певній ітерації менше заданої величини; 3) Вихід після виконання наперед заданої кількості ітерацій.

Для зручності обчислень в програмному забезпеченні, розробленому для цілей дисертаційного дослідження, автор користується локальною прямокутною системою координат. Вісь X направлена вздовж лінії профіля у двовимірному варіанті або вздовж ліній пунктів прийому сейсмічного сигналу в напрямку зростання номерів пікетів (*IN-LINE*) у тривимірному варіанті; Вісь Z завжди спрямована до центру Землі. Початок відліку даної осі співпадає з рівнем приведення сейсмічних записів (або з будь-якою іншою горизонтальною площиною, якщо цього потребує геометрія спостережень). Вісь Y застосовується тільки у тривимірному варіанті та розміщується вздовж ліній збудження в напрямку зростання пікетів (*CROSS-LINE*).

Ввід даних в програму забезпечується через текстові файли. Для виконання інверсії комплексу гравіметричних та сейсмометричних даних необхідно ввести як мінімум такі дані: спостережені часи пробігів сейсмічних променів, спостережені значення аномалій гравітаційного поля, розподіл повільностей моделі першого наближення, геометрія відбиваючих горизонтів (у випадку відбитих хвиль). Формат файлів для кожного виду даних спроектовано виходячи із наступних критеріїв: 1) сумісність із іншими програмними продуктами; 2) можливість ручного редагування в пакеті *MS Office*. Наприклад, результат інверсії виводиться в форматі сумісному з геологічним програмним пакетом *PETREL*, причому координати відповідають прямокутним координатам, що використовують в геоінформаційних системах та картографії (попередньо переводяться із локальної системи координат за допомогою афінних перетворень), а значення повільностей автоматично перераховуються у швидкість для більшої зручності аналізу.

У четвертому розділі для того, щоб впевнитись у правильності роботи розроблених методів було проведено та проаналізовано ряд тестів з томографічної інверсії методом одночасної ітеративної реконструкції (SIRT) синтетичних та реальних даних, причому окремо досліджувалась інверсія сейсмічних, гравітаційних та сейсмо-гравітаційних даних. Для інверсії даних сейсморозвідки були використані синтетичні дані поверхневої сейсморозвідки та реальні дані міжсвердловинних акустичних досліджень.

Перший тест являв собою модель однорідного, ізотропного горизонтально-шаруватого середовища. За законом Снеліуса для однорідного ізотропного горизонтально-шаруватого середовища траєкторія сейсмічних променів буде являти собою прямі лінії. Тому замість трасування променів крізь швидкісну модель на основі мереж було використано апроксимацію променів прямими лініями. Це дозволило відділити похибки трасування променів від похибок томографічної реконструкції, а також перевірити правильність роботи частини коду, що відповідає за інверсію.

Результат інверсії показав, що після ста ітерацій методу SIRT розподіл швидкостей відновлено правильно для більшої частини моделі. Частину моделі не

вдалося відтворити коректно через погану геометрію спостережень (для частини простору задача стала недовизначеною).

Аналіз першої моделі дозволяє зробити два наступні висновки: по-перше, алгоритм одночасної ітеративної реконструкції запрограмований правильно; по-друге, геометрія спостережень є дуже важливим фактором успішності виконання томографічної інверсії.

Два наступні тести виконані на реальних даних міжсвердловинного прозвучування, отриманих в рамках угоди про співпрацю між Київським університетом імені Тараса Шевченка та Публічним акціонерним товариством «Київський науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут "Енергопроект"».

Другий тест проведено на наборі даних, який поставляється разом з програмним забезпеченням *GeoTom CG* для цілей освоєння принципів роботи з цим програмним забезпеченням. Тест полягав у виконанні інверсії однакового набору даних різним професійним програмним забезпеченням, та тим, що розробив автор. Порівняння результатів інверсії цими двома програмами дозволяє стверджувати, що результати інверсії дуже подібні, а різницю в зображеннях можна пояснити дещо різними розмірами комірок та різними алгоритмами інтерполяції. У цілому, експеримент дозволяє судити про правильність роботи розробленого автором програмного забезпечення із сейсмічної томографії та його конкурентоспроможність.

Третій тест проведено на матеріалах міжсвердловинних акустичних досліджень по Рівненській АЕС, які виконувались з метою перевірки якості цементування. У частині досліджуваного розрізу, де покриття сейсмічними променями достатнє, можна чітко простежити шаруватість. Окрім зміни швидкостей у вертикальному напрямку відбувається і латеральна зміна швидкостей. Саме це і дає можливість судити про наявність порожнин/включень, виклинування або зміни фацій.

Четвертий тест проведено для інверсії даних гравірозвідки методом одночасної ітеративної реконструкції. Як модель обрано класичну задачу, описану в монографії *А. Корбунова* з інверсії даних гравірозвідки - прямокутний паралелепіпед, грані якого не співпадають із гранями комірок, на які поділяється досліджувана частина простору. Як вхідні дані використовується гравітаційний ефект однорідного за аномальною густиною прямокутного паралелепіпеда, без додавання регіонального фону (чиста аномалія) та без додавання випадкових завад (ідеальні спостереження).

Для порівняння роботи методу було обрано інші методи вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь таких як: звичайний метод найменших квадратів, метод найменших квадратів з авторегуляризацією Тихонова та Пікарда-Джонсона. Усі алгоритми, з якими буде порівнюватись метод інверсії гравітаційних даних автора, втілені у вигляді програмного коду *J. Rondall* та надані у відкритий доступ на його персональному сайті.

Метод SIRT з компенсацією геометричних факторів за глибину комірки показав найкращі результати з точки зору візуального виділення контуру

аномалієутворюючого тіла, проте густини у приповерхневій частині моделі не відповідають дійсності. Слід зазначити, що це може бути пов'язано із тим, що в якості першого наближення для всіх тестів задавалась модель з однаковою (нульовою чи довільно вибраною від'ємною) аномальною густиною. Кращі результати можуть бути досягнуті при коректнішому першому наближенні та залученні апріорної інформації як обмеження (у даних прикладах не накладається жодних обмежень на можливі значення параметрів комірки).

З модельного прикладу видно, що метод SIRT цілком застосовний до інверсії гравітаційних даних. Результат інверсії залежить від вибраних вагових коефіцієнтів, першого наближення та параметрів обмеження моделі, але ці фактори не є визначальними. Також вирішальну роль грає розмір комірок: їх кількість має забезпечувати перевизначеність системи лінійних алгебраїчних рівнянь для можливості застосування методу SIRT.

Основна перевага запропонованого методу, на думку автора, полягає не у самостійній інверсії гравіметричних даних, але у принциповій можливості об'єднання гравіметричних та сейсмометричних даних у одну систему лінійних алгебраїчних рівнянь та вирішенні задачі інверсії комплексу геофізичних даних одним методом геофізичної томографії.

П'ятий тест проведений для перевірки правильності роботи запропонованого автором методу інверсії комплексу даних сейсмо- та гравірозвідки. За основу була взята синтетична модель, що створена компанією *HESS* та вільно розповсюджується спільною *SEG*. Ця модель є шаруватим середовищем, яке ускладнене присутністю соляного тіла та розлому із значною амплітудою зміщення. Обидві структури здатні створити гравітаційні аномалії. Також обидві структури створюють області низької когерентності сигналу сум трас СГТ на сейсмічних даних.

Модель, що після масштабування була використана для розрахунків синтетичних часів пробігів та аномалій сил тяжіння, зображена на рисунку 3.

Сейсмічні дані, які були розраховані на основі моделі на рисунку 3 являють собою часи пробігів сейсмічних променів, відбитих від заданих горизонтів. Для правдоподібності синтетичних даних як вхідні сейсмічні дані для інверсії використовувались часи пробігів лише тих сейсмічних променів, які відбилися від відбиваючих границь вище соляного тіла та не в безпосередній близькості із розломом та границями соляного тіла. Оскільки нижче чотирьох кілометрів не виявилось жодного відбиваючого горизонту – до вхідних даних були додані часи пробігів для ще одного сейсмічного горизонту на глибині вісім кілометрів, що було б неможливим на ранніх етапах інверсії (до знаходження форми соляного тіла) для реальних даних. Також варто зазначити, що для синтетичного тесту глибина відбиваючих горизонтів вважається відомою.

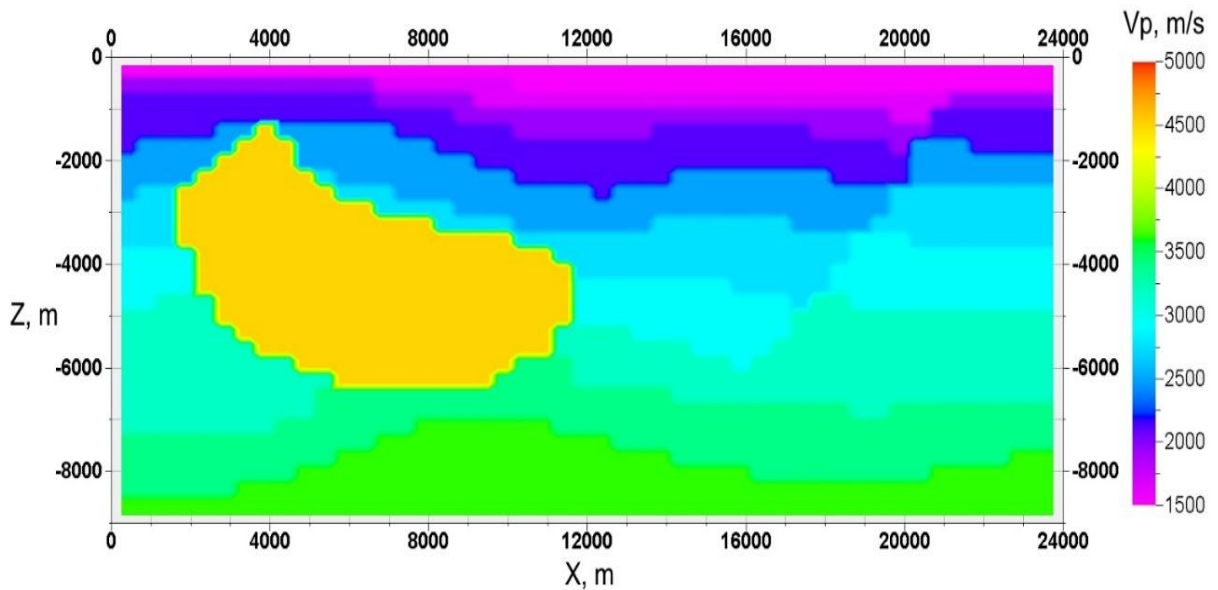


Рис. 3. Синтетична швидкісна модель, яка використана безпосередньо для тестування методу комплексної інверсії.

Одним із визначальних факторів в процесі створення синтетичних даних для масштабованої моделі було також зменшення кількості каналів для модельованої системи спостереження пропорційно зменшенню кількості комірок моделі. Часи пробігів сейсмічних променів були розраховані для правої однофлангової установки з розносом шість кілометрів та відстанню між сейсмоприймачами 150 м.

Згідно з розробленою автором теорією для інверсії комплексу даних сейморозвідки та гравірозвідки спочатку необхідно побудувати функціональну залежність між параметрами повільності (обернена величина до швидкості) і густини. За винятком двох порід (а також води) співвідношення між повільністю і густиною можна описати у вигляді степеневі функції. Коефіцієнти цієї степеневі функції за величиною співпадають з коефіцієнтами рівняння Гарднера. Для того, щоб врахувати дві породи, які випадають з тренду, в функцію вставлені виключення, встановлюючи значення густини солі при певних діапазонах повільностей.

На рисунку 4 наведено результат інверсії комплексу даних сейморозвідки та гравірозвідки за допомогою методу SIRT згідно підходу, запропонованого у даному дисертаційному дослідженні. Перше, що варто відзначити - соляне тіло дуже чітко проглядається на швидкісній моделі.

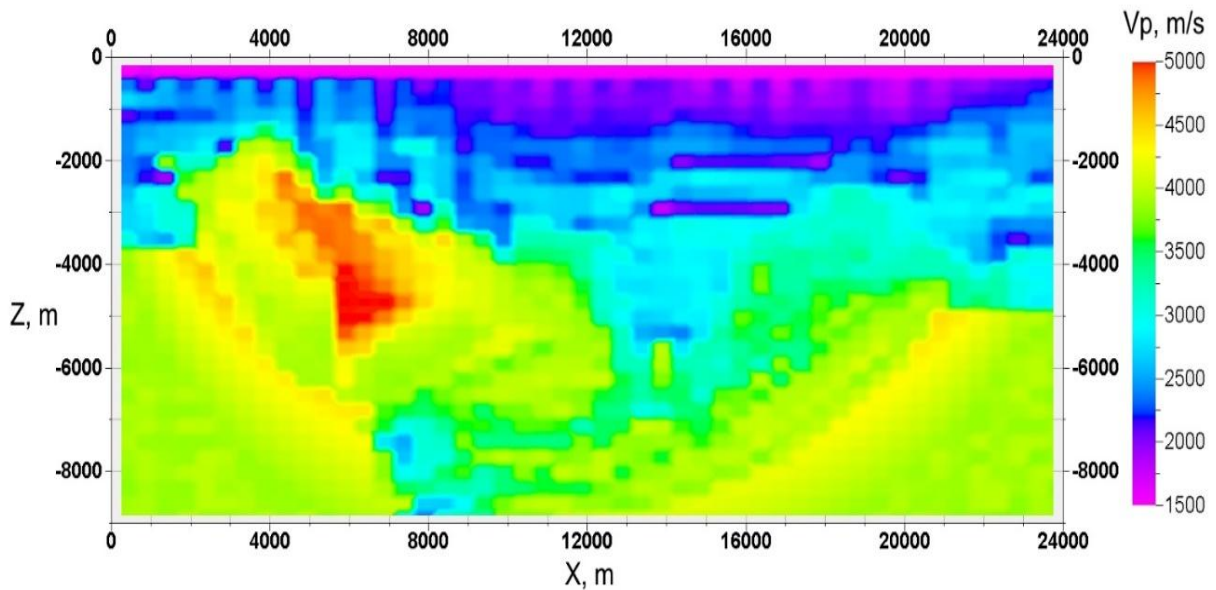


Рис. 4. Результат інверсії комплексу даних сейсмометрії та гравіметрії. Швидкісна модель після ста ітерацій методом SIRT.

Швидкість в межах соляного тіла відновлена правильно як мінімум для третини цього тіла. Інша частина має значення швидкостей, значно вищі ніж у осадових порід, що і дозволяє виділити контур соляного тіла візуально. Розлом також проглядається, особливо у верхній його частині, при цьому він поступово розмивається з глибиною. Це пов'язано з недостатньою кількістю променів, що проходять через нижню частину розлому (всі крім одного горизонту нижче солі були виключені з вхідних даних для інверсії).

Також слід відзначити появу декількох артефактів у вигляді горизонтальних смуг з низьким значенням швидкості. Найімовірніше це пов'язано з функцією, яка переводить швидкість в густину і навпаки, маючи кілька винятків для обліку солі і води, які випадають з статичного рівняння. Незважаючи на це, тест показує, що додавання навіть незначної кількості рівнянь з гравітаційними даними в систему рівнянь з сейсмічними даними дозволяє значно поліпшити результат інверсії при наявності соляних покладів.

ВИСНОВКИ

Автором було досягнуто мети досліджень та виконано всі основні наукові задачі, поставлені перед даним дисертаційним дослідженням. Основні наукові результати дисертаційного дослідження наступні:

1. Розроблено новий методологічний підхід до комплексної інверсії геофізичних даних із залученням моделювання петрофізичних властивостей. Даний підхід робить можливим поєднання часів пробігів та/або амплітуд сейсмічних променів та значень аномалій гравітаційного поля в одну систему рівнянь за рахунок моделювання взаємозв'язків між густиною та пружними параметрами середовища.

2. Вдосконалено метод сейсмічної променевої томографії для можливості обробки великих масивів сейсмічних даних. Вдосконалення стосуються збільшення ефективності роботи із машинною пам'яттю та можливості вирішувати задачу трасування променів та знаходження поправок в багато-поточному або паралельному режимах.
3. Вперше розроблено метод інверсії гравітаційних даних на основі методу одночасної ітеративної реконструкції (SIRT). Перевагою розробленого методу є можливість вирішувати обернену задачу гравірозвідки використовуючи теоретичні положення та алгоритми сейсмічної томографії, а також поєднувати сейсмічну та гравітаційну томографію в один комплекс.
4. Вперше введено блочну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для комплексу гравітаційних та сейсмічних даних, яка дозволяє виконувати комплексну томографічну інверсію з використанням повільності поздовжніх хвиль як шуканого параметру.
5. Вперше розроблено метод комплексної томографічної інверсії даних сейсмо- та гравірозвідки на основі методу одночасної ітеративної реконструкції (SIRT). Даний метод дозволяє суттєво покращити результати томографічної інверсії даних сейсморозвідки при наявності зон низької когерентності сигналу СГТ викликаних присутністю розломів із великою амплітудою та соляних тіл.
6. Результати досліджень були апробовані на реальних даних наданих підприємством КПВД «Енергопроект» та на синтетичних даних створених компанією *HESS* для тестування методів міграції сейсмічних даних та вільно розповсюджуваних спілкою *SEG*. Результати апробації показали готовність запропонованих в дисертації методів до вирішення практичних задач розвідувальної геофізики.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

- 1) **Тройніч К.** Ефективний алгоритм сейсмічної променевої томографії при обробці великих масивів сейсмічних даних / К. Тройніч, С. Вижва // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. - 2014. - Вип. 3. - С. 77-82.
- 2) **Тройніч К.** Геофізична томографія: сучасний стан та перспективи впровадження для розв'язання задач нафтогазової геології / К. Тройніч, Б. Матвійчук, С. Вижва // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. - 2014. - Вип. 4. - С. 59-63.
- 3) **Тройніч К.** Застосування методу SIRT для інверсії даних гравіметрії / К. Тройніч // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. - 2015. - Вип. 3. - С. 55-58.
- 4) **Тройніч К.** Комплексна інверсія геофізичних даних із залученням моделювання петрофізичних властивостей / К. Тройніч // Вісник Київського

національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. - 2015. - Вип. 4. - С. 67-71.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

- 5) **Тройнич К.** Комплексная инверсия данных сейсморазведки и гравиразведки методом SIRT. / К. Тройнич // Вестник Карагандинского университета. – 2016. – №2 (63). С. 50-54.

Публікації за матеріалами конференцій

- 6) Virshylo I. From travelttime to composition: a new inversion algorithm for seismic and gravity data / I. Virshylo, **К. Troinich**, B. Matviichuk // 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2014. – P. 451-458.
- 7) **Тройнич К.** Моделювання складу для томографічної інверсії сейсмічних та гравіметричних даних / К. Тройнич, І. Віршило, Б. Матвійчук // Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти: міжнародна конференція. - 2015 (тези)
- 8) **Тройнич К.** Променева томографія із застосуванням паралельних обчислень / К. Тройнич, Б. Матвійчук // Матеріали міжнародної наукової конференції "Роль вищих навчальних закладів у розвитку геології". - 2014. - с.38. (тези)

АНОТАЦІЯ

Тройніч К.С. Комплексна інверсія даних сейсмо- та гравірознавдки методом одночасної ітеративної реконструкції. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.05 – геологічна інформатика. – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена розробці комплексної інверсії даних сейсмо- та гравірознавдки методом одночасної ітеративної реконструкції.

Захищається метод інверсії даних гравірознавдки методом одночасної ітеративної реконструкції та метод комплексної інверсії даних сейсмо- та гравірознавдки методом одночасної ітеративної реконструкції. У процесі дисертаційного дослідження було розроблено новий методологічний підхід до комплексної інверсії геофізичних даних із залученням моделювання петрофізичних властивостей; вдосконалено метод сейсмічної променевої томографії для можливості обробки великих масивів сейсмічних даних; вперше розроблено метод інверсії гравітаційних даних та метод комплексної інверсії даних сейсмо- та гравірознавдки на основі методу одночасної ітеративної реконструкції (SIRT); вперше введено блочну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для комплексу гравітаційних та сейсмічних даних, яка дозволяє виконувати комплексну томографічну інверсію з використанням повільності поздовжніх хвиль в якості шуканого параметру. На основі розроблених методів побудовані відповідні алгоритми та програмне забезпечення.

Метод був випробуваний на синтетичних та реальних даних. Результати апробації показали готовність використання методу для вирішення наукових та виробничих задач нафтогазової та інженерної геології.

Ключові слова: геофізична томографія, комплексна інверсія, моделювання, швидкісна модель, трасування променів, методологія геофізичних досліджень.

АННОТАЦИЯ

Тройнич. К.С. Комплексная инверсия данных сейсмо- и гравиразведки методом одновременной итеративной реконструкции. - Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 04.00.05 – геологическая информатика. – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, 2016.

Анализ современного состояния геофизической томографии в нефтегазовой области показал, что метод сейсмической томографии успешно применяется для решения целого ряда геофизических задач, однако основное внимание исследователей сконцентрировано на инверсии данных сейморазведки. Использование томографии для комплексной инверсии геофизических данных - актуальное, развивающееся направление. Большинство исследователей, решая

задачу комплексной инверсии используют томографию лишь для сейсмических данных, а гравитационные данные рассматриваются как отдельная система уравнений, которая решается с помощью методов, отличных от томографии. Это подтверждает актуальность диссертационного исследования автора, направленного на комплексную томографическую инверсию комплекса геофизических данных в виде одной системы уравнений.

Диссертационная работа посвящена разработке комплексной инверсии данных сейсмо- и гравиразведки методом одновременной итеративной реконструкции.

Защищается метод инверсии данных гравиразведки и метод комплексной инверсии данных сейсмо- и гравиразведки методом одновременной итеративной реконструкции.

Для достижения задач диссертационного исследования автор разработал новый методологический подход комплексной инверсии геофизических данных с привлечением моделирования петрофизических свойств; улучшил метод сейсмической лучевой томографии для возможности обработки больших массивов данных; впервые предложил метод инверсии гравиметрических данных на основе метода одновременной итеративной реконструкции; автор впервые ввёл блочную систему линейных алгебраических уравнений для комплекса гравитационных и сейсмических данных, которая позволяет решать комплексную томографическую инверсию с использованием медленности в качестве искомого параметра.

Метод одновременной итеративной реконструкции широко используется в сейсмической лучевой томографии, однако для решения задачи гравиразведки не применялся. В работе показано, что данный метод может быть успешно использован для решения обратной задачи гравиразведки. Ключевым моментом является правильный подбор фактора затухания поля с глубиной. Преимуществом метода есть возможность использования существующих алгоритмов реализации обратной задачи сейсморазведки при помощи томографии с небольшой модификацией. Также данный подход позволяет объединить данные сейсморазведки и гравиразведки в одну систему линейных алгебраических уравнений и решать эту систему используя томографию.

В основе метода инверсии комплекса данных сейсморазведки и гравиразведки методом одновременной итеративной реконструкции лежит возможность формулировки прямых задач сейсмо- и гравиразведки в виде систем линейных алгебраических уравнений. Если исследуемая область представлена в виде дискретной модели, ячейки которой используются для решения прямых задач как сейсморазведки, так и гравиразведки – то ширина матриц коэффициентов в системах уравнений для прямой задачи сейсморазведки и гравиразведки будет идентичной. Это позволяет объединить две вышеупомянутые системы линейных уравнений в одну систему, состоящую из двух блоков. При этом вместо плотностей ячеек используются значения оценки плотности ячейки на основе значения медленности (обратной к скорости величине) для соответствующей ячейки. Далее система уравнений решается с помощью метода одновременной итеративной реконструкции, которая является разновидностью томографии. В такой постановке задачи и сейсмические и гравитационные данные непосредственно влияют на

оценку распределения скорости модели, а значение плотности оценивается с помощью взаимосвязи между плотностью и упругими параметрами среды.

Для того, чтобы обеспечить корректную работу предложенного автором метода инверсии комплекса данных сейсморазведки и гравиразведки методом одновременной итеративной реконструкции необходимо наличие связи между плотностью и упругими свойствами изучаемых пород. Такая связь может быть выведена аналитически либо построена статистически при наличии данных отобранных образцов пород и результатов их петрофизических исследований, либо данных геофизических исследований скважин.

Метод испытан на синтетических и фактических данных для моделей с простой и сложной геологической обстановкой (высокоамплитудные разломы, а также соляные тела, создающие зоны низкой когерентности сигнала трасс ОГТ). Также сейсмические данные использовались в конфигурации данных поверхностной сейсморазведки и данных межскважинного прозвучивания. Результаты апробации показали готовность использования метода для решения научных и производственных задач инженерной нефтегазовой и инженерной геологии.

Ключевые слова: геофизическая томография, комплексная инверсия, моделирование, трассировка лучей, методология геофизических исследований.

ANNOTATION

Troinich K.S. Joint inversion of seismic and gravity data using simultaneous iterative reconstruction technique. – Manuscript.

The thesis for the scientific degree of a Candidate of Physical and Mathematical sciences. Specialty 04.00.05. – Geological informatics. – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to the development of a method of joint inversion of seismic and gravity data using simultaneous iterative reconstruction technique.

The method of gravity data inversion using simultaneous iterative reconstruction technique and the method of joint seismic and gravity data inversion using simultaneous iterative reconstruction technique are defended. During the dissertational research, new methodological approach for joint inversion of geophysical data using petrophysical parameters modeling was developed; seismic tomography method was improved in order to process huge amount of seismic data; the method of gravity data inversion and the method of joint seismic and gravity data inversion based on simultaneous iterative reconstruction technique (SIRT) was developed; block system of linear algebraic equations that allows to perform joint seismic and gravity tomographic inversion based on compressional wave slowness was introduced. Sufficient algorithms and software have been developed based on introduced methods.

The method was tested on observed and synthetic data. The results of such tests proved that the method could be used for solving scientific and practical problems in oil and gas industry as well as in engineering.

Key words: geophysical tomography, joint inversion, forward modeling, velocity model, ray tracing, methodology of geophysical research.