

УДК 550.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.105.03>

Людмила ШУМЛЯНСЬКА, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0003-0234-7916

e-mail: lashum@ukr.net

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Петро ПІГУЛЕВСЬКИЙ, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0001-6163-4486

e-mail: pigulev@ua.fm

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

ПОБУДОВА ТА ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ЩІЛЬНОСТІ МАНТІЇ ПІД УКРАЇНСЬКИМ ЩИТОМ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.В. Шабатурою)

Вступ. Моделі густини мантиї є ключовими інструментами для розуміння фундаментальних геологічних і фізичних процесів, які відбуваються всередині Землі. Багато параметрів, які використовуються в моделях густини мантиї, залишаються недостатньо зрозумілими та невизначеними. Серед інших до них належать дані про склад та реологію мантиї, які можуть значно варіюватися. Значний вплив на кінцевий результат має спосіб створення моделей щільності (густини).

Методи. Моделювання за допомогою одновимірних моделей спрощує процес обчислення, натомість узагальнює розподіл густини мантиї, припускаючи, що він є однорідним у горизонтальному напрямку. Це обмеження не дозволяє враховувати латеральні варіації густини мантиї, які можуть бути важливими на регіональному рівні. Тривимірні моделі є більш складними і вимагають великої кількості даних, які здебільшого "важко" доступні. Крім того, тривимірне моделювання вимагає великого об'єму обчислювальних ресурсів, тому їх використання може бути обмеженим.

Результати. У цьому дослідженні представлено квазітривимірну модель густини мантиї під Українським щитом, отриману на основі набору одновимірних кривих густини, при розрахунках яких були внесені поліноміальні поправки за неоднорідність, які компенсують недоліки обрахунку одновимірних моделей. Ця тривимірна модель отримана в результаті перерахунку одновимірних кривих швидкості, одержаних сейсмотомографічним методом по Р-хвилям, розрахованим для 21 мантийного домену в діапазоні глибин від 50 до 2600 км. Процес перетворення кривих швидкості Р-хвиль у модель густини включає такі етапи: визначення сейсмічних меж у мантиї як точок перегину першої похідної кривих швидкості Р-хвиль для кожного мантийного домену; створення синтетичної моделі мантиї S-хвиль під Українським щитом шляхом перерахунку кривих швидкості Р-хвиль; вирішення рівняння Адамса–Уільямсона з використанням сейсмічних швидкостей (P,S) для кожного домену з подальшою поліноміальною корекцією для врахування гетерогенності; вибір еталонної моделі мантиї, яка була б основою для перерахунку швидкісних кривих у густину, через порівняння гравітаційного потенціалу на поверхні Землі та розрахованих від існуючих референтних моделей мантиї (PREM, PREMA, PREM3, IASP91 AK135). Як еталонну було вибрано модель AK135 за результатами порівняння обчисленого та спостереженого гравітаційного потенціалу в центральній точці Українського щита.

Висновки. У цьому дослідженні акцентується увага на заключних етапах конструювання моделі густини мантиї, враховуючи: збалансування маси верхньої та нижньої мантиї для кожного домену при визначенні густини з використанням рівняння Адамса–Уільямсона та введення поліноміальних корекцій відносно еталонної моделі AK135; розрахунок густин для кожного з 21 мантийного домену та їх тривимірна інтеграція. Отримана модель густини мантиї Українського щита добре узгоджується з поділом мантиї на три основні шари: літосферу, верхню мантию та нижню мантию. Кожен зі структурних шарів має свій візуальний патерн гетерогенності густини.

Ключові слова: густина, мантия, Український щит.

Вступ

Наукова новизна. На основі трансформації одновимірних сейсмотомографічних моделей для 21 домену мантиї Українського щита шляхом застосування поліноміальних поправок для обраної як оптимальної референтної моделі AK135 (Pigulevskiy, & Shumlianska, 2022), були отримані криві розподілу щільності (густини) для 21 домену мантиї. На їх основі було побудовано 3D-модель, яка дала змогу зробити першу реконструкцію густинної будови мантиї під Українським щитом (від 50 до 2600 км). Результати показують, що мантия під щитом має варіативну щільність та шарувату структуру із змінними по глибині та латералі аномаліями, морфологія яких має кореляцію з тектонічними одиницями (масштабу мегаблоку щита, шовними зонами).

З кінця минулого століття наукові дослідження мантиї значно покращили наше розуміння внутрішньої структури Землі. Сучасні моделі ґрунтуються на сейсмічних томографічних даних, які використовуються для створення глобальних карт сейсмічної томографії. Ці карти відображають сейсмічну гетерогенність у мантиї Землі на різних глибинах (Ritsema et al., 2011).

Водночас питання побудови 3D-мірної моделі мантиї досі залишається актуальним. Також залишається невизначеність щодо питання, чи можна використовувати

єдину одновимірну еталонну модель Землі для реконструкції структури мантиї під континентами, океанами, платформами та іншими геотектонічними структурами. Яку модель слід вибрати для реконструкції різних регіонів, наприклад мантиї під Українським щитом?

Геофізикам також доводиться вирішувати питання, пов'язані з кулястістю Землі (Старостенко, & Манукян, 1983). Це включає вибір посередньої структури та визначення рівня деталізації моделі (Пігулевський, & Свистун, 2014), врахування швидкісної анізотропії (Kern, & Tuba, 1993), використання загальних і послідовних даних Р- та S-хвиль (Шумлянська, Дубовенко, & Пігулевський, 2021) та перерахунок сейсмологічних даних у модель густини Землі (Mooney, & Kaban, 2010).

Ці питання, які стосуються густини мантиї, активно вивчаються, зокрема проводиться активне дослідження структури мантиї під Українським щитом.

Загалом виділяються два напрями розв'язання проблем визначення густини мантиї. Перший – це моделювання розподілу густини на глибину, отриману на геологічній поверхні (Толстой та ін., 2003) з використанням різних уявлень (гіпотез) про будову Землі як планети або отриманих за сейсмічними даними (Ringwood, 1975; Про можливість ..., 1993), та зіставлення отриманих результатів з гравітаційним полем або гравітаційною

енергією (Marchenko, 1999), або моментом інерції (Чуйкова, & Максимова, 2010). При цьому функції розподілу задаються у вигляді вхідних даних, наприклад, на основі лише радіального поділу густини у вигляді її неперервних та кусково-неперервних моделей: Лежандра-Лапласа, Роша, Булларда і Гаусса (Marchenko, 2000).

Другий напрям – це моделювання густини мантії, виходячи з результатів досліджень залежності тиску, сейсмічних швидкостей, густини в лабораторних умовах (Волярович, 1977; Семенов, 1978, 1983), у результаті яких було отримано лінійну залежність швидкості від густини:

$$V = a + b\sigma,$$

де σ – густина, a і b – коефіцієнти, що становлять функціональні залежності від атомної ваги речовини.

Для швидкостей об'ємних хвиль експериментальні співвідношення з густиною аналогічні:

$$V_p = a_p + b_p\sigma; V_s = a_s + b_s\sigma.$$

Ці емпіричні залежності стали основою багатьох досліджень густини, не тільки для земної кори, а також і для мантії.

Одним з перших оцінку коефіцієнтів a та b в кореляційній залежності швидкості від щільності для земної кори та верхньої мантії Українського щита виконав С.С. Красовський (1981). Комбіновану градієнтно-шарувату модель середовища для південно-східної частини УЩ було створено виходячи зі наявних даних про збільшення швидкості пружних хвиль залежно від підвищення основності та ступеня метаморфізму порід (Пігулевський, & Свистун, 2014).

Також різні коефіцієнти a і b були визначені для різних "поверхів" моделі літосфери Центральної і Східної Європи в межах Східноєвропейської платформи (Соллогуб, Чекунов, & Гарецький, 1989).

Подібну ідеологію було використано для знаходження поліноміальних поправок в інтервалах глибин, визначених по сейсмологічних межах, що є додатками до густини мантії, отриманої при розв'язанні рівняння Адамса-Уільямсона, а саме (Шумлянська, & Пігулевський, 2022):

$$\sigma(V_p, V_s) = \sigma_{A-W} + k,$$

де σ_{A-W} – густина, знайдена за рівнянням Адамса-Уільямсона; k – поліноміальна поправка, $k = a + b(z)$, де a та b – коефіцієнти лінійної функції, яка є різницею двох поліномів – між поліномом, що описує розподіл густини з глибиною, отриманим за розв'язком рівняння Адамса-Уільямсона, яке призводить до однорідного розподілу густини, як наслідок накладених обмежень на рівняння (Захаров та ін., 2016), та поліномом, що описує розподіл густини в мантії, відповідно до однієї з референтних моделей мантії (*PREM*, *PREMA*, *PREMC*, *IASP91* *AK135*) в кожному інтервалі глибини, що знаходиться між сейсмічними межами, знайденими за точками перегину першої похідної кривої швидкості $v_p(z)$ (Shumlianska, Dubovenko, & Pigulevskiy, 2020); z – глибина, км.

У цьому дослідженні розглянуто такі питання: збалансування отриманої моделі з масами верхньої та нижньої мантії відповідно до еталонної моделі *AK135*. Попередні результати геолого-тектонічної інтерпретації отриманої моделі густини верхньої і нижньої мантії.

Відомо, що найтісніший зв'язок з речовинним складом Землі має густина. Тому питання, пов'язані з перерахунком даних сейсмічної томографії в моделі густини верхньої і нижньої мантії (Усенко, 2014) є важливим кроком для подальшого моделювання внутрішньої будови Землі.

Мета. Перерахунок синтетичної *P*- і *S*-швидкісної тривимірної моделі мантії під Українським щитом у значення густини шляхом внесення поліноміальних

поправок на неоднорідність до одновимірних кривих густини, отриманих при розв'язанні рівняння Адамса-Уільямсона. Збалансування отриманої моделі з масами верхньої та нижньої мантії на основі вибраної як еталонної моделі *AK135*. Візуалізація отриманих значень густини у вертикальні та горизонтальні розрізи мантії під Українським щитом.

Вихідні дані. Проблеми та розв'язок поставленої задачі впливають здебільшого з вихідних даних. Наші вхідні дані – це сейсмотомографічна *P*-швидкісна модель для мантії під Українським щитом (Шумлянська, Трипільський, & Цветкова, 2014), побудована з урахуванням значень потужності земної кори щита та швидкості сейсмічних коливань, отриманих за даними ГСЗ (Соллогуб, 1982; Трипільський та ін., 1988, 2004). Цю модель створено з використанням кінематичного методу на основі розв'язання сейсмічного завдання шляхом розкладання функції повільності в ряд Тейлора (Геуко, 2004). Розв'язання задачі сейсмічної томографії, одержане за допомогою цього методу, є точною нижньою гранню щодо розв'язання класичним методом лінеаризації і містить менше обмежень на функцію швидкості. Метод не залежить від вибору початкового наближення (одномірної референтної моделі), коректний за Тихоновим. Сама модель є набором одновимірних кривих $v_p(z)$, які характеризують певний обсяг геофізичного середовища, домену, розмір якого залежить від вікна вибірки перших часів приходу *P*-фази сейсмічної хвилі у форматі середньої точки. Інверсія годографа дає рішення $v_p(z)$ як гладкої, спадної функції, при цьому вважається, що всередині хвильоводу (якщо він є) функція швидкості постійна і розраховується, виходячи із значень швидкості на верхній та нижній межі хвильоводу. Таке уявлення функції швидкості $v_p(z)$, як гладкої і спадної, несе інформацію про сейсмічні границі в неявному вигляді. Тому сейсмічні границі можливо визначити за перегинами першої похідної $v_p(z)$ (Pigulevskiy et al., 2019; Dubovenko et al., 2021).

Головна перешкода для використання даної швидкісної моделі мантії для перерахунку в густину і, однаково, інші фізичні параметри, такі як температура, в'язкість та ін. – це наявність швидкостей лише поздовжніх хвиль. Метод перерахунку *P*-швидкісної моделі далі в *S*-швидкісну запропоновано (Шумлянська та др., 2021). При використанні середньоарифметичного значення v_p/v_s від п'яти референтних сейсмологічних моделей, вихідна синтетична *S*-швидкісна модель має прийнятні відхилення, які можна порівняти з роздільною здатністю методу їх отримання, а саме кінематичного методу Тейлорового наближення при розв'язанні сейсмічної задачі. Як показують результати визначення похибок швидкостей, при похибках визначення уявної швидкості максимальної глибини занурення рефрагованого променя = 6; 7; 8 км, обчислені похибки швидкостей мають той самий порядок, що і відхилення ($v_s - v_{s1}$) для одновимірних референтних моделей (v_s – значення швидкості за літературними джерелами для референтних моделей мантії, v_{s1} – значення швидкості шляхом перерахунку цих моделей) і значно менше похибки $\pm 0,1$ км/с, яка досягається іншими сейсмічними методами. Тобто синтетична *S*-швидкісна модель, отримана в результаті перерахунку *P*-швидкісної моделі, має властивість співрозмірності з вихідною моделлю, що дає переваги в точності у подальшому спільному використанні двох колінеарних моделей (*P*, *S*) та подальших перетвореннях у петрофізичні (фізико-літологічні) моделі мантії.

Методика побудови одновірної моделі густини мантії

Методика перерахунку складається з кількох етапів:

- визначення сейсмічних границь по перегибах P -швидкісних кривих сейсмотомографічної моделі (Pigulevskiy et al., 2019; Shumlianska, Dubovenko, & Pigulevskiy, 2020);
- розрахунок синтетичної S -швидкісної моделі, шляхом перерахунку P -швидкісної моделі, яка має властивість співрозмірності (пропорційності) з вихідною моделлю, що дає переваги в точності у подальшому сумісному використанні двох колінеарних моделей (P , S) при перетворенні на петрогустинні моделі мантії (Шумлянська, Дубовенко, & Пігулевський, 2021);
- розрахунок одновірних кривих густини шляхом розв'язання рівняння Адамса-Уільямсона, де вхідні дані є значення P - та S -швидкостей для кожного

домену мантії під Українським щитом (Шумлянська, & Пігулевський, 2022);

- трансформації отриманих кривих густини, які є одновірними, однорідними моделями різних доменів мантії з використанням поліноміальних поправок відповідно до обраної як оптимальної (еталонної) для Українського щита референтної моделі AK135 (Pigulevskiy, & Shumlianska, 2022).

Рівняння Адамса-Уільямсона вимагає першого кроку ітерації із заданим параметром щільності σ_0 . Початкову щільність було взято з літературних джерел (Kurlov et al., 2011; Svistun, & Pigulevskiy, 2021; Азаров та ін., 2006; Анциферов та ін., 2008; 2009) на рівні 50 км (табл. 1).

Пройшовши всі описані етапи, можна перейти безпосередньо до завдання розрахунку тривимірної моделі щільності мантії під Українським щитом, але тільки після етапу збалансування отриманої моделі з масами верхньої та нижньої мантії відповідно до еталонної моделі AK135.

Таблиця 1

Значення щільності σ_0 , г/см³, початкові значення рівняння Адамса-Уільямсона

Latitude	Longitude	σ_0 , г/см ³ на 50 km
27	49	3,36
28,25	50	3,323
28,25	51	3,323
28,25	51,25	3,32
28,25	49	3,32
28,25	50,5	3,324
29,25	48,5	3,319
29,25	49,5	3,324
30,5	49	3,265
31,5	48,5	3,24
31,5	49,5	3,185
32,5	49	3,16
32,5	48	3,326
33,5	48,5	3,343
33,5	49	3,384
34,5	49	3,263
35,5	47,75	3,355
36,5	47,75	3,343
37,5	47,75	3,3
38,5	47,75	3,42

Збалансування мас. Розраховані значення густини були перераховані в масу верхньої та нижньої мантії та перевірені на відповідність до мас еталонної моделі AK135. Таким чином, отримана густина за рівнянням Адамса-Уільямсона при введенні поліноміальних поправок була збалансована відповідно еталонної референтної моделі AK135. Поправки вносились як середнє арифметичне окремо для верхньої та нижньої мантії. Формула для розрахунку маси – система рівнянь (Літнарів, 2007):

$$\begin{cases} \rho(r - \Delta r) = \rho(r) - \Delta\rho = \rho(r) + G \frac{\rho(r)m(r)\Delta r}{Fr^2} \\ m(r - \Delta r) = m(r) - \Delta m = m(r) - 4\pi\rho(r)r^2\Delta r \end{cases}$$

Поправки розраховувались для кожного домену. На рис. 1 показано, як змінюється крива густини, розрахована за рівнянням Адамса-Уільямсона (червона лінія), після введення поліноміальних поправок (сіра лінія), після введення поправок на масу (синя лінія) на прикладі домену верхньої мантії з координатами центра 31.5E; 48.5N. Ми змогли зберегти індивідуальні особливості початкових кривих P -швидкості, зберігаючи баланс мас відповідно до еталонної моделі AK135.

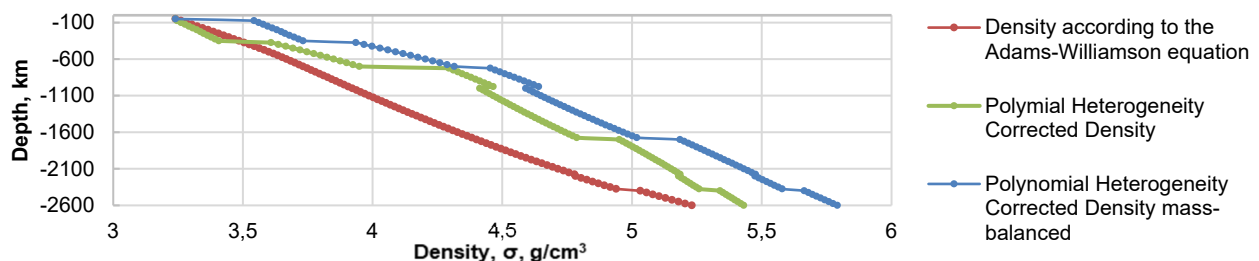


Рис. 1. Приклад введення поправки на масу для кривої густини домену мантії з координатами центральної точки 31.5E; 48.5N.

Червона лінія – крива густини, розрахована за рівнянням Адамса-Уільямсона; сіра лінія – після введення поліноміальних поправок; синя лінія – після введення поправок на масу

Результати

Кінцевий результат перерахунку являє собою набір одновимірних кривих густини для 21 домену мантиї (рис. 2) під УЩ в інтервалі 50–2600 км, отриманих після розв'язання рівняння Адамса–Уільямсона, внесення

поліноміальних поправок (поправка на неоднорідність), з урахуванням поправок на масу.

Вертикальні розрізи густини вздовж профілів AA1, BB1, CC1, DD1, EE1 показано на рис. 3.

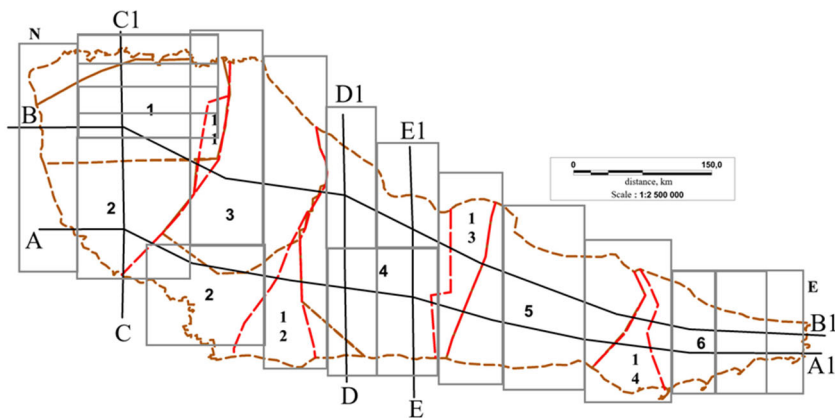


Рис. 2. Розташування профілів AA1, BB1, CC1, DD1, EE1. Сірі квадрати – домени під Українським щитом.

Червоні лінії – тектонічний поділ Українського щита (Круглов та ін., 2007).

Мегаблоки: 1 – Волинський; 2 – Дністровсько-Бузький; 3 – Росинсько-Тикицький; 4 – Ігульський; 5 – Середньопридніпровський; 6 – Приазовський.

Шовні зони: 11 – Немирівсько-Кочерівська; 21 – Голованівська; 31 – Ігулецько-Криворізька; 41 – Оріхівсько-Павлоградська

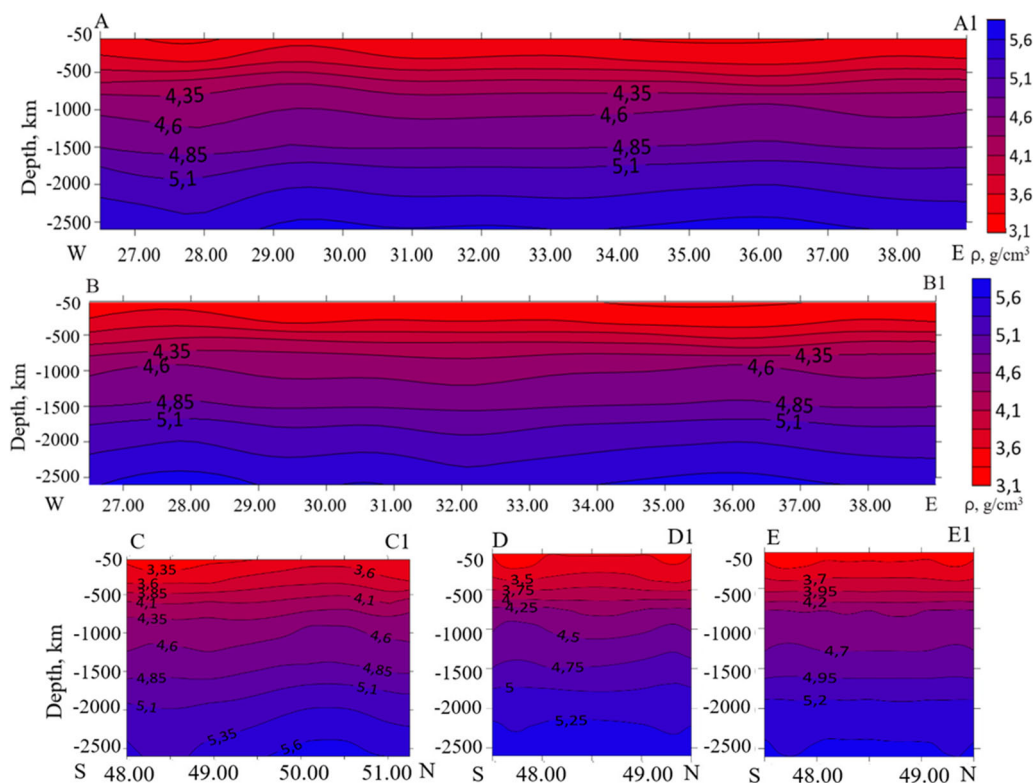


Рис. 3. Вертикальні розрізи густини мантиї під УЩ, г/см³. Розташування профілів див. рис. 2

Як показано на вертикальних розрізах густини (рис. 3), найбільший градієнт нарощування густини відзначається в інтервалі 250 ± 50 км, що відповідає горизонтам, які розташовані між підшоєю літосфери і покрівлею нижньої мантиї. Це дає змогу припустити, що зміни густини відповідають змінам літологічного складу та РТ-умов, що знаходяться в цьому горизонті.

Розглянемо характер густинних неоднорідностей по латералі. За результатами розрахунків горизонтальні перерізи пораховані від 50 до 2600 км з інтервалом

25 км, але для статті було вибрано деякі з них (рис. 4). Результати більш поглибленої тектонічної інтерпретації отриманих даних про розподіл густини мантиї в інтервалі 50–2600 км під УЩ передбачається опублікувати у подальших роботах. Тут ми відзначимо лише основні риси. Незважаючи на пряму залежність у розв'язанні рівняння Адамса–Уільямсона від початково заданих значень щільності першої ітерації, нам вдалося зберегти геометрію первинних кривих швидкості під час наступних перетворень, описаних у розділі, присвяченому методиці

перерахунку P -швидкісної моделі в густину. Якщо в цілому зупинитися на загальній характеристиці аномалій густини, видно, що їх розподіл за структурним планом проходить під Голованівською, Оріхівсько-Павлоградською шовними зонами, Кіровоградським мантійним розломом і виділяє мантію під центральною частиною щита в окрему зону (рис. 4).

Загалом зауважимо, що починаючи з глибини 75 км аномалії густини показують значну варіабельність у геометрії, що відображає неоднорідність геологічного середовища під різними тектонічними одиницями УЩ. Аномалії на 75–200 км (рис. 4) відповідають загальному геоструктурному плану УЩ, що "розривається" великою субмеридіональною зоною у його центральній частині з перепадом густини від 3,2 до 3,6 г/см³. До центральної частини цієї зони приурочений трансрегіональний

тектонічний шов (Кіровоградський мантійний розлом), який добре корелює на зрізах 150–200 км з глибинами підшови літосфери, виділеної за тепловими аномаліями (Гінтов, & Пашкевич, 2010), а також з глибинними неоднорідностями мантії, виділеними за даними комплексу фізичних полів та сейсмічних досліджень, проведених на УЩ (Байсарович та ін., 2005). На протязі усіх інтервалів глибин зона представлена породами з меншою щільністю щодо тих, що межують з нею із заходу і сходу. На зрізі 50 км розуцільнені породи (3,20–3,30 г/см³) поширюються у північному напрямку, що відповідає загальному плану простягання Інгульського мегаблоку. Однак, починаючи з глибини 75 км і до низів верхньої мантії (зріз 500 км), спостерігається зворотна картина, де зона з пониженою густиною має південний напрямок простягання.

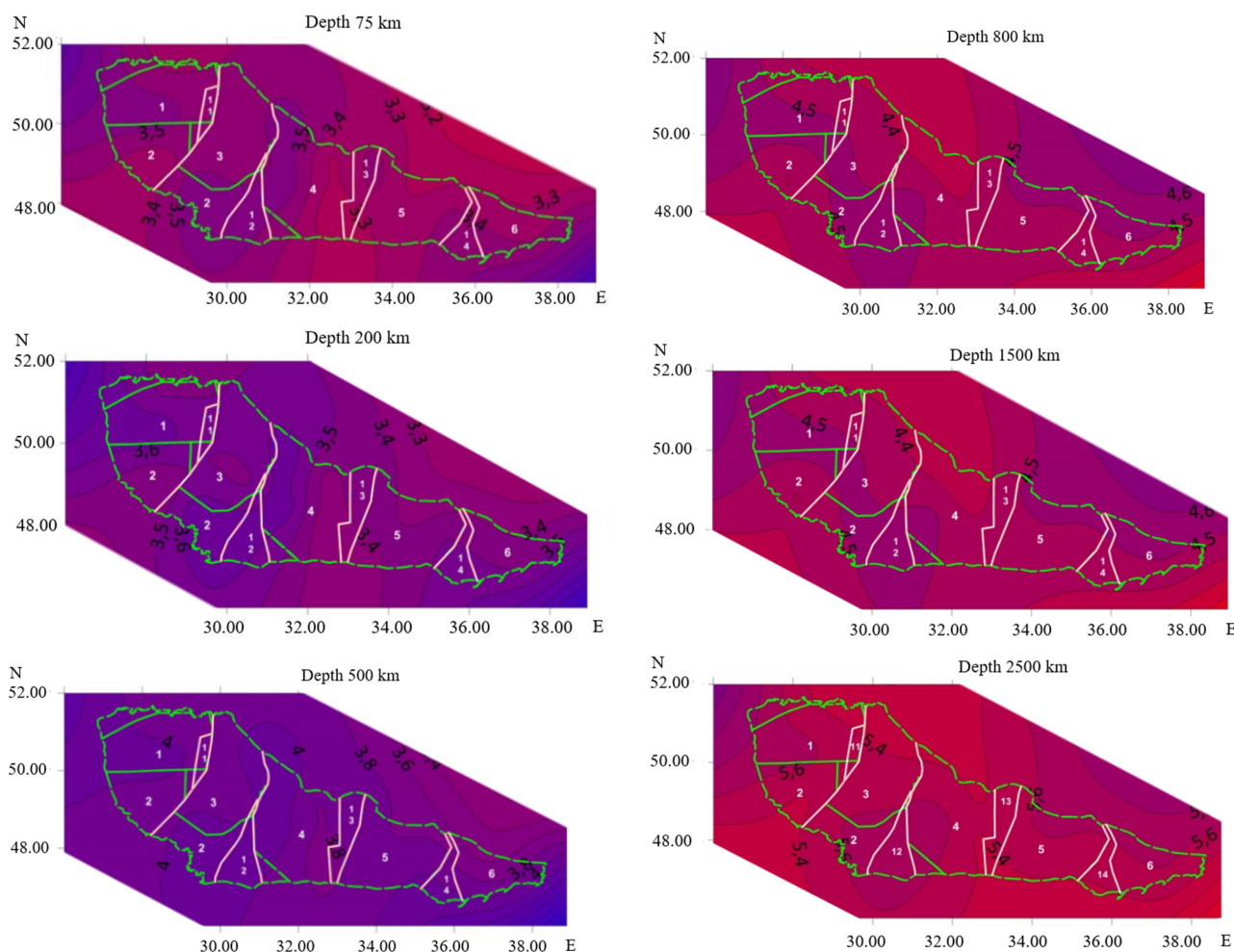


Рис. 4. Горизонтальні зрізи густини мантії під УЩ, г/см³. Умовні позначення див. рис. 2

Загальними рисами мегаблоків і шовних зон, позначених на рис. 4, є присутність характерних формацій, яких немає (або їх розвиток обмежений) у суміжних мегаблоках. Кожен із мегаблоків індивідуальний за своєю внутрішньою будовою та складом структурно-речових комплексів, але для всіх мегаблоків, за винятком Овруцької западини на північному заході УЩ, типовою є "глибинна" складчастість. Усі мегаблоки включають архейські структурно-речові комплекси, які більшою чи меншою мірою зазнали перетворення у протерозой. Водночас на схід від Криворізько-Кременчуцького розлому у складі кори мегаблоків переважає архейська матриця, а на захід від

нього – протерозойська. Загалом мегаблоки можна розділити на дві групи, приблизно рівні за площею поширення: граніт-зеленокам'яні та гранітогнейсові. Перші складають всю східну третину щита (Середньопридніпровський та Приазовський мегаблоки); на заході до цієї групи досить умовно віднесено лише Білоцерківсько-Середньобузький мегаблок, у межах якого, за нашими розрахунками, щільність літосфери на 0,1–0,15 г/см³ нижча, ніж під першими двома, що може вказувати на те, що архейські структурно-речові комплекси, вірогідно, в літосфері більшою мірою зазнали перетворення у протерозой, чим його фіксують за даними буріння.

За результатами комплексних геофізичних досліджень було показано різну будову літосфери з глибиною (Соллогуб, Чекунов, & Гарецький, 1989). У літосфері УЩ було виділено загалом кілька структурних планів, ешелонованих за глибиною. Вони сформувалися в різний час, у різних геодинамічних умовах і часто не узгоджуються між собою. У структурі поверхні Мохоровичича (М) досить добре відбиті шовні зони щита, у яких кора потовщена до 50–60 км, але при цьому середня потужність кори мегаблоків близька до 40 км. Лише між Волино-Подільським та Білоцерківсько-Середньобузьким мегаблоками сутурна зона не відображена у поверхні М. Можливо, це результат більшої товщини кори північно-західної частини УЩ (західніше Інгільського мегаблоку) взагалі. Тут середня потужність кори наближається до 45 км, а в межах Поліського вулканоплутонічного та Бузько-Подільського гранулітового поясу досягає 50–60 км, що є типовою для сутурних зон східної частини УЩ. Збільшення товщини кори у шовних зонах та Поліському поясі задовільно пояснюється колізійними обставинами, які супроводжувалися частковим підсувом кори суміжних мікрокондитентів та підвищенням їх щільності по колізійних швах.

Нижче від розглянутого літосферного шару розташована основна частина верхньої мантії, зрізи на глибині 500 та 600 км. На цих глибинах субмеридіональна диференціація УЩ стає менш контрастною, що може бути пов'язано з РТ-умовами, які нівелюють щільнісні латеральні особливості. Переходячи в нижню мантію, починаючи з глибини 800 км і нижче, структурний план аномалій густини змінює своє простягання на північно-західне у західній частині щита, або відсутнє – у східній (рис. 4).

Дискусія і висновки

У статті представлено 3D-модель щільності мантії під УЩ. Модель густини булл отриман шляхом перерахунку Р-швидкісної сейсмічної томографічної моделі мантії. Швидкісна модель представлена набором з 21 одновимірної кривої швидкості. Кожна Р-крива швидкості має індивідуальні особливості, зберігаючи в цілому шарувату структуру.

Всього в мантії виділено три шари – літосфера, верхня і нижня мантії, кожен з яких істотно відрізняється за розподілом щільності. Аналіз 3D-моделі щільності мантії під Українським щитом показує кореляцію аномалій щільності з глибинними неоднорідностями мантії, виявленими за результатами комплексного аналізу потенціальних фізичних полів, глибинних сейсмічних досліджень та теплового потоку.

Геолого-тектонічна будова Українського щита відображена в аномаліях щільності літосфери. Мегаблоки щита мають нижчу густину літосфери, ніж шовні зони, що їх розділяють. Простежуються повторюваності патерну аномалій підвищеного теплового потоку та аномалій низької щільності, що відображає вплив температури на густину гірських порід, принаймні в літосфері. Зв'язок між тектонічною структурою земної кори та аномаліями щільності літосфери простежується до глибини 200–250 км, а потім вони зникають на глибині ≈ 500 км, демонструючи вплив літосфери як більш холодного шару на властивості гірських порід верхнього шару мантії. На цих глибинах субмеридіональна диференціація щита стає менш контрастною. Водночас у нижній мантії структурний план аномалій густини змінює своє простягання на північно-західне у західній частині УЩ, і не простежується – у східній, що може бути пов'язано з високими значеннями температури та тиску.

Підсумовуючи, слід зазначити, що перші результати побудови (квазі) тривимірної щільнісної моделі мантії під

Українським щитом показують доцільність та необхідність продовження цих досліджень для отримання комплексної моделі її будови та петрофізичних особливостей, що впливають на формування земної кори та корисних копалин.

Внесок авторів: Людмила Шумлянська – концептуалізація, методологія, програмне забезпечення, формальний аналіз, валідація даних, написання (оригінальна чернетка); Петро Пігулевський – концептуалізація, методологія, формальний аналіз, валідація даних, написання (оригінальна чернетка).

Список використаних джерел

- Азаров, Н. Я., Анциферов, А. В., Шеремет, Е. М., & Глевасский, Е. Б. та ін. (2005). *Геолого-геоелектрична модель Оріхово-Павлоградської шовної зони Українського щита*. Наукова думка.
- Азаров, Н. Я., Анциферов, А. В., Шеремет, Е. М., & Глевасский, Е. Б. (2006). *Геолого-геофізическая модель Криворожско-Кременчугской шовной зоны Украинского щита*. Наукова думка.
- Анциферов, А. В., Шеремет, Е. М., Глевасский, Е. Б., Кулик, С. М., & Есипчук, К. Ю. (2008). *Геолого-геофізическая модель Головановской шовной зоны Украинского щита*. Вебер.
- Анциферов, А. В., Шеремет, Е. М., Есипчук, К. Ю., & Анциферов, В. А. (2009). *Геолого-геофізическая модель Немировско-Кочеревской шовной зоны Украинского щита*. Вебер.
- Великанов В. Я., Гурський Д. С., Гожик П. Ф. та ін. (2006). *Літосфера України: Атлас*. ТОВ "Географіка".
- Воларович, М. П. (Ред.). (1977). *Изучение физических свойств минерального вещества Земли при высоких термодинамических параметрах*. Наукова думка.
- Гинтов, О. Б., & Пашкевич, И. К. (2010). Тектонофизический анализ и геодинамическая интерпретация трехмерной геофизической модели Украинского щита. *Геофізичний журнал*, 2(32), 6–27.
- Красовский, С. С. (1981). *Отражение динамики земной коры континентального типа в гравитационном поле (гравитационное моделирование структур земной коры континентального типа)*. Наукова думка.
- Курлов, М. С., Шеремет, Е. М., Козарь, Н. А., & Гурський, Д. С. (2011). *Криворізька наглибока свердловина СГ-8*. Ноулідж.
- Літнарів, Р. М. (2007). *Фізика з основами геофізики*. МЕНУ.
- Пігулевський, П. І., & Свистун, В. К. (2014). *Особенности глубинного строения Приазовского геоблока Украинского щита (Анализ. Обобщение геолого-геофизических исследований. Геоплотностное моделирование)*. Ноулідж.
- Рингвуд, А. Е. (1981). *Склад та петрологія мантії Землі*. Надра.
- Семенов, Б. Г. (1983). Зависимость плотность – скорость с учетом термодинамических условий при построении модели плотности земной коры и верхней манттии. *Геология и геофизика*, 6, 90–99.
- Семенова, С. Г. (1978). *Співвідношення густини та швидкості поведовжніх хвиль для гірських порід земної кори та верхньої мантії. Методика та інтерпретація геофізичних досліджень*. Наукова думка, с. 3–10.
- Соллогуб, В. Б. (1982). Літосфера України. *Геофізичний журнал*, 4(4), 3–25.
- Соллогуб, В. Б., Чекунов, А. В., Гарецький, Р. Г. та др. (1989). *Літосфера Центральної і Східної Європи: Восточно-Европейская платформа*. Наукова думка.
- Старостенко В. И., & Манукян А. Г. Решение прямой задачи гравиметрии на шарообразной Земле. *Фізика Землі*, 12, 34–50.
- Толстой, М. І., Гасанов, Ю. Л., Костенко, Н. В., Гожик, А. П., & Шабатура, О. В. (2003). *Петрогеохімія і петрофізика гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання*. ВПЦ "Київський університет".
- Трипольский А. А., Гейко, В. С., Ливанова, Л. П., Трипольская, И. П., & Цветкова, Т. О. (1988). *Сейсмическая модель земной коры. Литосфера Центральной и Восточной Европы: Геотраверс IV. VI. VIII*. Наукова думка, с. 13–25.
- Трипольский А. А., & Шаров Н. В. Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным. Карельский Центр РАН.
- Усенко, О. В. (2014). *Формування розплавів: геодинамічний процес та фізико-хімічні взаємодії*. Наукова думка.
- Чуйкова, Н. А., & Максимова, Т. Г. (2010). Плотностные неоднородности мантии и ядра Земли. *ВМУ. Серия 3. Фізика. Астрономія*, 2, 67–74.
- Шумлянська, Л., Дубовенко, Ю., & Пігулевський, П. (2021). Про можливість створення синтетичної S-швидкісної моделі шляхом перерахунку Р-швидкісної моделі. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(95), 46–53.
- Шумлянська, Л., & Пігулевський, П. (2022). Застосування поліноміальних поправок для побудови оптимальної одновимірної моделі густини мантії. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(97), 51–59.
- Шумлянська, Л. А., Трипольский А. А., & Цветкова, Т. О. (2014). Воздействие скоростной структуры земной коры на результаты сейсмической томографии Украинского щита. *Геофізичний журнал*, 36(4), 95–111.

- Dubovenko, Yu. I., Shumlianska, L. A., Pigulevskiy, P. I. & Svystun, V. K. (2021). Refined mantle velocity model at Ukrainian Shield adjusted after Karato. *20th International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, May 11–14 2021, Kyiv, Ukraine.
- Geyko, V. S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geophysical journal*, 26(2), 3–32.
- Kern, H., & Tubia Jose, M. (1993). Pressure and temperature dependence of P- and S-wave velocities. seismic anisotropy and density of sheared rocks from the Sierra Alpujata massif (Ronda peridotites. Southern Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 119(1–2), 191–205.
- Marchenko, A. N. (1999). Earth's radial profiles based on Legendre-Laplas law. *Geodynamic*, 1(2), 1–7.
- Marchenko, A. N. (2000). Earth's radial density profiles based on causs'ard Roche's distributions. *Bolletina di Geodesia e Scienze Affini*, LIX(3), 201–220.
- Mooney, W. D., & Kaban, M. K. (2010). The North American upper mantle: Density. composition. and evolution. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(B12).
- Pigulevskiy, P. I., Shumlianska, L. A., Dubovenko, Yu. I., & Svystun, V. K. (2019). The mantle disruptions by P-waves velocity gradients analysis under East of Ukrainian Shield. *18th International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, May 13–16, 2019, Kyiv, Ukraine.
- Ritsema, J., Deuss, A., van Heijst, H.-J., & Woodhouse, J. H. (2011). S40RTS: a degree-40 shear-velocity model for the mantle from new Rayleigh wave dispersion. teleseismic traveltimes and normal-mode splitting function measurements. *Geophys. J. Int.*, 184, 1223–1236.
- Semenov, B. G. (1983). Density-velocity dependence and calculation of thermodynamic conditions when building a density model of the Earth's crust and upper mantle. *Geology and geophysics*, 6, 90–99 [in Russian].
- Semenova, S. G. (1978). *Correlation of density and velocity of longitudinal waves for rocks of the earth's crust and upper mantle. Methodology and interpretation of geophysical research*. Naukova dumka, p. 3–10 [in Ukrainian].
- Shumlianska, L., Dubovenko, Yu., & Pigulevskiy, P. (2020). 2.5 dimensional model of mantle heterogeneities under the Ukrainian shield according to the gradients of the velocities of seismic waves. *Journ. Geol. Geograph. Geocology*, 29(2), 431–441.
- Svystun, V., & Pigulevskiy, P. (2021). Gravimetric survey and gravimetric database in Ukraine "Dniprogeofizika" during 2000–2011 carried out works on collection, analysis and formation of an electronic gravimetric data base (GDB) of the territory of Ukraine. Based on the results of the work car. *20th International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, May 11–14, 2021, Kyiv, Ukraine.
- ### References
- Antsiferov, A. V., Sheremet, E. M., Esipchuk, K. Yu., & Antsiferov, V. A. (2009). *Geological-geophysical model of the Nemirovska-Kocherivska suture zone of the Ukrainian shield*. Weber [in Russian].
- Antsiferov, A.V., Sheremet, E.M., Glevasskiy, E.B., Kulik, S.M., Esipchuk, K. Yu. (2008). *Geological and geophysical model of the Golovaniv suture zone of the Ukrainian shield*. Weber [in Russian].
- Azarov, N. Ya., Antsiferov, A. V., Sheremet, E. M., & Glevasskiy, E. B. et al. (2005). *Geological-geoelectric model of the Orichovo-Pavlograd suture zone of the Ukrainian shield*. Naukova dumka [in Ukrainian].
- Azarov, N. Ya., Antsiferov, A. V., Sheremet, E. M., & Glevasskiy, E. B. et al. (2006). *Geological-geophysical model of the Kryvorizh-Kremenchug suture zone of the Ukrainian shield*. Naukova dumka [in Ukrainian].
- Velikanov, V. Ya., Gurskiy, D. S., Gozhik, P. F. et al. (2006). *Lithosphere of Ukraine: Atlas*. "Geographyca" LLC [in Ukrainian].
- Chuikova, N. A., & Maksimova, T. G. (2010). Density inhomogeneities of Earth's mantle and core. *VMU. Series 3. Physics. Astronomy*, 2, 67–74 [in Russian].
- Dubovenko, Yu. I., Shumlianska, L. A., Pigulevskiy, P. I., & Svystun, V. K. (2021). Refined mantle velocity model at Ukrainian Shield adjusted after Karato. *20th International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, May 11–14 2021, Kyiv, Ukraine.
- Geyko, V. S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geophysical journal*. 26(2), 3–32.
- Gintov, O. B., & Pashkevich, I. K. (2010). Tectonophysical analysis and geodynamic interpretation of the three-dimensional geophysical model of the Ukrainian Shield. *Geophysical journal*, 2(32), 6–27 [in Russian].
- Kern, H., & Tubia Jose, M. (1993). Pressure and temperature dependence of P- and S-wave velocities. seismic anisotropy and density of sheared rocks from the Sierra Alpujata massif (Ronda peridotites. Southern Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 119(1–2), 191–205.
- Krasovsky, S. S. (1981). *Reflection of the dynamics of the continental crust in the gravitational field (Gravitational modeling of the structures of the continental crust)*. Naukova dumka [in Russian].
- Kurlov, M. S., Sheremet, E. M., Kozar, N. A., & Gurskiy, D. S. (2011). *Kryvorizhsk ultra-deep well SG-8*. Knowledge [in Ukrainian].
- Litnarovich, R. M. (2007). *Physics with bases of geophysics*. IEGU [in Ukrainian].
- Marchenko, A. N. (1999). Earth's radial profiles based on Legendre-Laplas law. *Geodynamic*, 1(2), 1–7.
- Marchenko, A. N. (2000). Earth's radial density profiles based on causs'ard Roche's distributions. *Bolletina di Geodesia e Scienze Affini*, LIX(3), 201–220.
- Mooney, W. D., & Kaban, M. K. (2010). The North American upper mantle: Density. composition. and evolution. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(B12).
- Pigulevskiy, P. I., Shumlianska, L. A., Dubovenko, Yu. I., & Svystun, V. K. (2019). The mantle disruptions by P-waves velocity gradients analysis under East of Ukrainian Shield. *18th International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, May 13–16, 2019, Kyiv, Ukraine.
- Pigulevskiy, P. I., & Svystun, V. K. (2014). *Features of the deep structure of the Azov Geoblock of the Ukrainian Shield (Analysis. generalization of geological and geophysical studies. geodensity modeling)*. Knowledge [in Russian].
- Ringwood, A. E. (1975). *Composition and petrology of the Earth's mantle*. McGraw-Hill.
- Ritsema, J., Deuss, A., van Heijst, H.-J., & Woodhouse, J. H. (2011). S40RTS: a degree-40 shear-velocity model for the mantle from new Rayleigh wave dispersion. teleseismic traveltimes and normal-mode splitting function measurements. *Geophys. J. Int.*, 184, 1223–1236.
- Semenov, B. G. (1983). Density-velocity dependence and calculation of thermodynamic conditions when building a density model of the Earth's crust and upper mantle. *Geology and geophysics*, 6, 90–99 [in Russian].
- Semenova, S. G. (1978). *Correlation of density and velocity of longitudinal waves for rocks of the earth's crust and upper mantle. Methodology and interpretation of geophysical research*. Naukova dumka, p. 3–10 [in Ukrainian].
- Shumlianska, L., Dubovenko, Yu., & Pigulevskiy, P. (2020). 2.5 dimensional model of mantle heterogeneities under the Ukrainian shield according to the gradients of the velocities of seismic waves. *Journ. Geol. Geograph. Geocology*, 29(2), 431–441.
- Shumlianska, L., Dubovenko, Yu., & Pigulevskiy, P. (2021). About the possibility of creating a synthetic S-speed model by recalculating the P-speed model. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(95), 46–53 [in Ukrainian].
- Shumlianska, L., & Pigulevskiy, P. (2022). Application of polynomial corrections to build an optimal one-dimensional model of mantle density. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(97), 51–59 [in Ukrainian].
- Shumlianska, L. O., Trypilskiy, O. O., & Tsvetkova, T. O. (2014). The influence of the velocity structure of the earth's crust on the results of seismic tomography of the Ukrainian shield. *Geophysical Journal*, 36(4), 95–117 [in Russian].
- Sollogub, V. B. (1982). The lithosphere of Ukraine. *Geophysical Journal*. 4(4), 3–25 [in Ukrainian].
- Sollogub, V. B., Chekunov, A. V., & Garetsky, R. G. (Eds.). (1989). *Lithosphere of Central and Eastern Europe: Eastern European platform*. Naukova dumka [in Russian].
- Starostenko, V. I., & Manukyan, A. H. (1983). Solution of the direct problem of gravimetry on a spherical Earth. *Physics of the Earth*, 12, 34–50 [in Russian].
- Svystun, V., & Pigulevskiy, P. (2021). Gravimetric survey and gravimetric database in Ukraine "Dniprogeofizika" during 2000–2011 carried out works on collection, analysis and formation of an electronic gravimetric data base (GDB) of the territory of Ukraine. Based on the results of the work car. *20th International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, May 11–14, 2021, Kyiv, Ukraine.
- Tolstoy, M. I., Hasanov, Yu. L., Kostenko, N. V., Gozhik, A. P., & Shabaturo, O. V. (2003). *Petrogeochemistry and petrophysics of granitoids of the Ukrainian shield and some aspects of their practical use*. Kyiv University [in Ukrainian].
- Trypilskiy, O. O., Geiko, V. S., Livanova, L. P., Trypilska, I. P., & Tsvetkova, T. O. (1988). *Seismic model of the earth's crust. Lithosphere of Central and Eastern Europe: Geotransverse IV. VI. VIII*. Naukova dumka [in Russian].
- Trypilskiy, O. O., & Sharov, N. V. (2004). The lithosphere of the Precambrian shields of the Northern Hemisphere according to seismic data. Karelian Center of the Russian Academy of Sciences [in Russian].
- Usenko, O. V. (2014). *Formation of melts: geodynamic process and physical and chemical interactions*. Naukova dumka [in Ukrainian].
- Volarovych, M. P. (Ed.). (1977). *Study of the physical properties of the Earth's mineral matter at high thermodynamic parameters*. Naukova dumka [in Russian].

Отримано редакцією журналу / Received: 11.12.23

Прорецензовано / Revised: 15.04.24

Схвалено до друку / Accepted: 29.05.24

Liudmyla SHUMLIANSKA, PhD (Geol.), Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0003-0234-7916

e-mail: lashum@ukr.net

S. I. Subbotina Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Petro PIGULEVSKIY, DSc (Geol.), Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0001-6163-4486

e-mail: pigulev@ua.fm

S. I. Subbotina Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

CONSTRUCTION AND FIRST INTERPRETATION RESULTS OF THE THREE-DIMENSIONAL MANTLE DENSITY MODEL UNDER THE UKRAINIAN SHIELD

Background. Mantle density models are key tools for understanding fundamental geological and physical processes occurring within the Earth. Many parameters used in mantle density models remain poorly understood and undefined. Among others, these include data on the composition and rheology of the mantle, which can vary significantly.

Methods. The method of creating density models (density) significantly influences the final result. Modeling with one-dimensional models simplifies the calculation process but generalizes the distribution of mantle density, assuming it is homogeneous in the horizontal direction. This limitation does not allow for the consideration of lateral variations in mantle density, which can be important at the regional level. In this study, we present a quasi-three-dimensional model of mantle density beneath the Ukrainian Shield, obtained on the basis of a set of one-dimensional density curves. Polynomial corrections for heterogeneity were applied during the calculations, compensating for the shortcomings of one-dimensional models. This three-dimensional model was derived by recalculating one-dimensional velocity curves obtained by seismic tomography for 21 mantle domains in the depth range of 50 to 2600 km. The process of transforming P-wave velocity curves into a density model includes the following steps: determining seismic boundaries in the mantle as points of inflection of the first derivative of P-wave velocity curves for each mantle domain; creating a synthetic S-wave mantle model beneath the Ukrainian Shield by recalculating P-wave velocity curves; solving the Adams-Williamson equation using seismic velocities (P, S) for each domain with subsequent polynomial correction to account for heterogeneity; selecting a reference mantle model that would serve as the basis for converting velocity curves into density through the comparison of gravitational potential on the Earth's surface and calculated values from existing reference mantle models (PREM, PREMA, PREM6, IASP91 AK135). The AK135 model was chosen as the reference model based on the comparison of calculated and observed gravitational potential at the central point of the Ukrainian Shield. This study focuses on the final stages of constructing the mantle density model, taking into account mass balancing of the upper and lower mantle for each domain when determining density using the Adams-Williamson equation and introducing polynomial corrections relative to the AK135 reference model; calculating densities for each of the 21 mantle domains and their three-dimensional integration.

Results. In this study, we present a quasi-three-dimensional model of mantle density beneath the Ukrainian Shield, obtained on the basis of a set of one-dimensional density curves, with polynomial corrections for inhomogeneity incorporated into the calculations, compensating for the shortcomings of one-dimensional model calculations. This three-dimensional model was obtained by recalculating one-dimensional velocity curves obtained by the seismic tomography method for P-waves, calculated for 21 mantle domains in the depth range from 50 to 2600 km.

Conclusions. This study focuses on the final stages of constructing the mantle density model, considering balancing the mass of the upper and lower mantle for each domain in determining density using the Adams-Williamson equation and introducing polynomial corrections relative to the AK135 reference model; calculating densities for each of the 21 mantle domains and their three-dimensional integration. The obtained mantle density model of the Ukrainian Shield is well aligned with the division of the mantle into three main layers: lithosphere, upper mantle, and lower mantle. Each of the structural layers has its own visual pattern of density heterogeneity.

Keywords: density, mantle, Ukrainian shield.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.